

**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 33 (72) № 2 2022**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2022

## 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 технологій та дизайну;

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

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

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 16 від 20.05.2022 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, 2022

## ЗМІСТ

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Альховик О.В.**

НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ  
ТА ВИРОБІВ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА..... 1

**Пушка О.С., Войтік А.В., Оляднічук Р.В., Кутковецька Т.О.**

АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЖИМІВ РОБОТИ СЕПАРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ  
КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН..... 7

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

**Яглицький Ю.К., Кириченко К.В.**

СУЧАСНІ КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ  
В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДЕН..... 12

### ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

**Лободзинський В.Ю., Бурик М.П., Спінул Л.Ю., Чибеліс В.І., Ілліна О.О.**

ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ЕКРАНІВ  
ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ  
СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ..... 19

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Артюхов В.Г., Бритов О.А., Гіоргізова-Гай В.Ш., Кірюша Б.А., Стіканов В.Ю.**

РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ НЕРЕКУРСИВНИХ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ  
В АНАЛОГО-ЦИФРОВОМУ СХЕМОТЕХНІЧНОМУ СИМУЛЯТОРІ..... 24

**Розорінов Г.М., Сірченко І.А.**

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ  
ДЛЯ МЕРЕЖ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ..... 33

**Семенов А.О., Семенова О.О., Пінаєв Б.О., Куляс Р.О., Шпильовий О.О.**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ  
ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ В ГЕНЕРАТОРІ КОЛПІТЦА  
НА ОСНОВІ МДН ТРАНЗИСТОРА..... 40

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

**Алексієнко Г.В.**

ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПОДАЧІ ЗАГОТІВЛІ В ЗОНУ ОБРОБКИ ТОКАРНИХ  
ТА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ..... 48

**Баган Т.Г., Бунь В.П., Лаврушкін О.В.**

ВИКОРИСТАННЯ СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ ДЛЯ СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ  
ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМ АПАРАТОМ..... 54

**Баришич Л.М., Баклан І.В.**

ВИКОРИСТАННЯ РЕПЛІКАТОРНОЇ ДИНАМІКИ В ІГРАХ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ  
ЯК МОЖЛИВИЙ РОЗВИТОК КОЕВОЛЮЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ ІГОР..... 62

**Гайдукевич С.В., Семенова Н.П., Леськів Я.А.**

КОНЦЕПЦІЇ «SMART ТЕХНОЛОГІЙ» ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ  
В ПРИМІЩЕННЯХ ЗАКРИТОГО ГРУНТУ ..... 68

**Говорущенко Т.О., Лопатто І.Ю., Капустян М.В.**

МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ВРАХУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ  
НА ВСІХ ЕТАПАХ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ..... 74

<b>Головіна Н.В., Ляшенко О.М.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ.....	80
<b>Завгородній В.В., Завгородня Г.А., Демченко І.В., Крамаренко К.С., Шевченко І.О., Юрченко А.В.</b> МЕТОД СТВОРЕННЯ ШТУЧНИХ ТЕКСТУР ІЗ ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ.....	86
<b>Мацуї А.М., Кондратець В.О.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ У КУЛЬОВИХ МЛИНАХ ПРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ ІНВАРІАНТНОМУ КЕРУВАННІ ПОДРІБНЕННЯМ РУД.....	91
<b>Сарнацький В.В., Баклан І.В.</b> МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ.....	100
<b>Ткачук А.Г., Добржанський О.О., Богдановський М.В., Кравчук А.Р.</b> ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА БАЗІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ.....	108
<b>Ушкаренко О.О., Малахова Н.Г., Доманський О.Ю.</b> ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ КОЕФІЦІЕНТУ НЕСИМЕТРІЇ В МЕРЕЖІ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ.....	114
<b>Федотова М.О., Скриннік І.О., Дідик О.К., Березюк І.А., Зубенко В.О., Сербул О.М., Трушаков Д.В.</b> ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗЕРНОСУШАРКИ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ.....	123
<b>Шувалов Д.Р.</b> АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ РОЗКЛАДКИ ПОРТАЛЬНОГО ПРИЙМАЧА ГОТОВОГО КАБЕЛЮ.....	130
<b>Яворський О.В.</b> РОЗРОБКА КІСУ САМОБАЛАНСУВАННЯ ДВОКОЛІСНОГО РОБОТА З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ СТІЙКОСТІ. КОНТРОЛЬ КУТА НАХИЛУ ПРОТОТИПУ.....	138
<b>ЕНЕРГЕТИКА</b>	
<b>Соломаха А.С., Барабаш П.О., Ярошевич М.В.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ СТУПЕНІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ.....	144
<b>Тарасов Д.О.</b> РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГРУПИ ПІДГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ.....	150
<b>РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН</b>	
<b>Коновал В.М.</b> ОЦІНКА ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАРЯДАМИ ВР ЗМІННОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА РІЗНИМИ УМОВАМИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ.....	155
<b>ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ</b>	
<b>Trembus I.V., Hondovska A.S., Tinytska Ye.Yu., Mykhailenko N.V.</b> RESOURCE-SAVING OXIDE-ORGANOSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS.....	170
<b>Фролова Л.А., Шунькін І.С., Закіпна О.П., Сухий М.К.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕНТОНІТУ .....	175
<b>Штефан В.В., Нкука Мабіала Б.Д., Кануннікова Н.О., Кобзев О.В.</b> ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ФОРМУВАННЯ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НА СПЛАВІ ЦИРКОНІЮ E110....	181



## **ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ**

**Пазюк В.М., Дмитренко Н.В., Іванов С.О.**

ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ГАРБУЗА ТА ОСОБЛИВОСТІ  
ЙОГО ТЕПЛООВОГО СУШІННЯ.....187

## **ТРАНСПОРТ**

**Gryshchuk O.K., Petryk A.V., Yerko Ya.V.**

FEATURES OF CUSTOMS SERVICE OF FOREIGN TRADE  
CARGO FLOWS ON MOTOR TRANSPORT.....193

**Колодницька Р.В.**

МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ  
З ВРАХУВАННЯМ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ .....201

**Коскіна Ю.О.**

ТЕОРЕТИКО-ІГРОВА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВИБОРУ ФРАХТОВОЇ СТРАТЕГІЇ  
ПРИ ФОРМУВАННІ РЕСУРСІВ ФЛОТУ .....209

**Півторак Г.В., Гіць І.І., Жила М.П.**

ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ ....215

**Фомін О.В., Ловська А.О.**

ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ  
ВАГОНА-ХОПЕРА ДВОХСЕКЦІЙНОГО.....221

**Шибасєв О.Г., Сільванська Г.М.**

МЕТОД ДІЛОВИХ ІГОР В ОЦІНЦІ ПЕРСОНАЛУ СУДЕН  
У РОБОТІ КРЮЇНГОВИХ КОМПАНІЙ.....227

## **БУДІВНИЦТВО**

**Семичаєвський С.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В., Стилик І.Г., Бенедюк В.С.**

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗАХИСНОГО ВЗУТТЯ ДЛЯ ПОЖЕЖНИКІВ  
ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИМОГ ТЕХНІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ  
БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ, БУДІВЕЛЬ І СПОРУД .....237

## **ЕЛЕКТРОНІКА**

**Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О.**

ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ  
МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОРЕЗИСТОРОМ І МАГНІТОДІОДОМ.....243

**ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....253**

# CONTENTS

## INDUSTRIAL ENGINEERING

**Alkhovyk O.V.**

NON-DESTROYING METHODS FOR CONTROL OF ELECTRIC COATINGS OF PARTS AND PRODUCTS UNDER PRODUCTION CONDITIONS.....1

**Pushka O.S., Voitik A.V., Olyadnichuk R.V., Kutkovetska T.O.**

ANALYSIS OF DESIGNS AND MODES OF OPERATION OF SEPARATING DEVICES OF POTATO HARVESTING MACHINES.....7

## SHIPBUILDING

**Yahlytskyi Yu.K., Kyrychenko K.V.**

MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES AND SYSTEMS IN THE PROBLEMS OF RESEARCH OF SEA QUALITIES OF SHIPS.....12

## ELECTRICAL ENGINEERING

**Lobodzinskiy V.Yu., Buryk M.P., Spinul L.Yu., Chybelis V.I., Illina O.O.**

FAULT IDENTIFICATION OF HIGH-VOLTAGE CABLE SHIELD GROUNDING SYSTEM BASED ON SHORT CIRCUIT CURRENT ANALYSIS.....19

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Artuhov V.G., Brytov O.A., Hiorhizova-Hai V.S., Kyriusha B.A., Stikanov V.J.**

CALCULATION AND SIMULATION OF NON-RECURSIVE DIGITAL FILTERS IN ANALOG-DIGITAL CIRCUIT SIMULATOR.....24

**Rozorinov H.M., Sirchenko I.A.**

MODELING OF INFORMATION SECURITY SYSTEMS FOR AUDIOVISUAL CONTENT DISTRIBUTION NETWORKS .....33

**Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Kulias R.O., Shpylovyi O.O.**

MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMIC CHAOS MODE OF ELECTRICAL OSCILLATIONS IN THE COLPITTS OSCILLATOR BASED ON THE MOSFET....40

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Aleksiienko H.V.**

DEVICES FOR SUPPLYING PROCESSES IN THE AREA OF TURNING AND CNC TURNING AND MILLING MACHINES.....48

**Bahan T.H., Boun V.P., Lavrushkin O.V.**

USE OF STATUS OBSERVERS FOR SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF EVAPORATOR CONTROL SYSTEM.....54

**Baryshych L.M., Baklan I.V.**

REPLICATOR DYNAMICS WITH FEEDBACK-EVOLVING GAMES: TOWARDS A CO-EVOLUTIONARY GAME THEORY.....62

**Haidukevych S.V., Semenova N.P., Leskiv Ya.A.**

CONCEPTS OF "SMART TECHNOLOGIES" AND THEIR APPLICATION IN APARTMENTS OF THE CLOSED SOIL.....68

**Lopatto I.Yu., Hovorushchenko T.O., Kapustian M.V.**

MULTIAGENT SYSTEM OF ACCOUNTING SUBJECT AREA INFORMATION AT ALL STAGES OF SOFTWARE DEVELOPMENT .....74

**Holovina N.V., Liashenko O.M.**

RESEARCH OF METHODS OF RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF IMAGES.....80

<b>Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Demchenko I.V., Kramarenko K.S., Shevchenko I.O., Yurchenko A.V.</b>	
METHOD OF CREATING ARTIFICIAL TEXTURES WITH SPECIFIED PARAMETERS.....	86
<b>Matsui A.M., Kondratets V.O.</b>	
OPTIMISATION OF ENERGY AND MATERIAL USE IN BALL MILLS WITH ENERGY EFFICIENT INVARIANT CONTROL OF ORE GRINDING.....	91
<b>Sarnatskyi V.V., Baklan I.V.</b>	
METHODS AND TOOLS FOR MODELING THE SPREAD OF INFECTIOUS DISEASES.....	100
<b>Tkachuk A.H., Dobrzhanskyi O.O., Bohdanovskyi M.V., Kravchuk A.R.</b>	
PROJECTING OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR MONITORING THE PRESENCE OF HARMFUL AND EXPLOSIVE GASES BASED ON A MOBILE CRAWLER ROBOTIC PLATFORM.....	108
<b>Ushkarenko O.O., Malakhova N.G., Domanskiy O.Yu.</b>	
IMPROVEMENT OF THE METHOD OF THE UNBALANCE FACTOR CONTROL IN THE SHIP POWER SYSTEM NETWORK.....	114
<b>Fedotova M.O., Skrynnik I.O., Didyk O.K., Berezyuk I.A., Zubenko V.O., Serbul O.M., Trushakov D.V.</b>	
TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF SIGNALS OF A BRAIN DRYER WITH A FLUID LAYER AS AN OBJECT OF AUTOMATION AND ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION.....	123
<b>Shuvalov D.R.</b>	
AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE PORTAL RECEIVER DEVICE OF THE FINISHED CABLE.....	130
<b>Yavorskyi O.V.</b>	
DEVELOPMENT OF PSV FOR SELF-BALANCING OF TWO-WHEELED ROBOT TO IMPROVE STABILITY. CONTROL OF PROTOTYPE'S INCLINATION ANGLE .....	138
 <b>POWER ENGINEERING</b>	
<b>Solomakha A.S., Barabash P.O., Yaroshevych M.V.</b>	
DETERMINATION OF THE OPTIMAL NUMBER OF STAGES FOR A DISTILLATION SYSTEM WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP.....	144
<b>Tarasov D.O.</b>	
DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE FUNCTIONAL SCHEME OF AUTOMATION OF THE GROUP OF LOW PRESSURE HEATERS OF A NUCLEAR POWER PLANT.....	150
 <b>RESOURCE DEVELOPMENT</b>	
<b>Konoval V.M.</b>	
EVALUATION OF THE NATURE OF SOLID ENVIRONMENT DESTRUCTION BY CHARGES OF VARIABLE CROSS-SECTION FORM UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF EXPLOSION ENERGY TRANSMISSION.....	155
 <b>CHEMICAL TECHNOLOGY</b>	
<b>Trembus I.V., Hondovska A.S., Tinytska Ye.Yu., Mykhailenko N.V.</b>	
RESOURCE-SAVING OXIDE-ORGANSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS.....	170
<b>Frolova L.A., Shunkin I.S., Zakipna O.P., Sukhyi M.K.</b>	
INVESTIGATION OF PHYSIC-CHEMICAL PROPERTIES BENTONITE.....	175
<b>Shtefan V.V., Hkouka Mabila B.D., Kanunnikova N.O., Kobziev O.V.</b>	
ELECTROCHEMICAL FORMATION OF OXIDE COATINGS ON ZIRCONIUM ALLOY E110.....	181

## **TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY**

**Paziuk V.M., Dmytrenko N.V., Ivanov S.O.**

THERMOPHYSICAL QUALITY OF PUMPKIN SEEDS AND FEATURES  
OF ITS THERMAL DRYING .....187

## **TRANSPORT**

**Gryshchuk O.K., Petryk A.V., Yerko Ya.V.**

FEATURES OF CUSTOMS SERVICE OF FOREIGN TRADE  
CARGO FLOWS ON MOTOR TRANSPORT.....193

**Kolodnytska R.V.**

MODELING OF FUEL CONSUMPTION FOR ROAD TRANSPORT, TAKING INTO ACCOUNT  
TRANSPORT TECHNOLOGIES .....201

**Koskina Yu.O.**

GAME-THEORY BASED SETTING OF THE PROBLEM OF CHOOSING THE CHARTERING  
STRATEGY FOR FORMING THE RESOURCES OF FLEET.....209

**Pivtorak H.V., Gits I.I., Zhyla M.P.**

ESTIMATE OF PASSENGER FLOW DISTRIBUTION IN EXTERNAL TRANSPORT HUB .....215

**Fomin O.V., Lovska A.O.**

INVESTIGATION OF VERTICAL LOADING OF A HOPPER TWO-SECTIONAL WAGON.....221

**Shibaev A.G., Silvanskaya G.N.**

METHOD OF BUSINESS GAMES IN ASSESSMENT THE PERSONNEL  
OF CREWING COMPANIES.....227

## **CONSTRUCTION**

**Semychayevsky S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Stylyk I.G., Benedyuk V.S.**

IMPROVEMENT OF PROCEDURES FOR TESTING OF FOOTWEAR FOR FIREFIGHTERS  
ACCORDING TO QUALITY INDICATORS TO IMPLEMENT THE REQUIREMENTS  
OF TECHNICAL REGULATIONS OF BUILDING PRODUCTS, BUILDINGS AND STRUCTURES....237

## **ELECTRONICS**

**Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O.**

RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC MAGNETIC FIELD TRANSDUCERS  
WITH MAGNETORESISTOR AND MAGNETODIOD.....243

**INFORMATION ABOUT AUTHORS.....253**

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 620.179.18

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/01>**Альховик О.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

### НЕРУЙНІВНІ МЕТОДИ КОНТРОЛЮ ГАЛЬВАНІЧНИХ ПОКРИТТІВ ДЕТАЛЕЙ ТА ВИРОБІВ В УМОВАХ ВИРОБНИЦТВА

У статті проаналізовано застосування неруйнівних методів для контролю гальванічних покриттів деталей та виробів.

Гальванічне покриття – це поверхневий шар металу, який утворюється на поверхні деталі, яка підлягає покриттю, за допомогою електрохімічних процесів. Суть гальваніки не тільки в отриманні декоративного покриття з металу на поверхні іншого металу, а й створення захисного шару, який утворюється в результаті проникнення молекул металу покриття в поверхневий шар вихідної деталі.

Якість покриттів, яка відповідає вимогам стандартів та технічних умов і забезпечує нормальну роботу деталей в умовах експлуатації або збереження їх протягом необхідного терміну зберігання, може бути досягнута лише у випадку, якщо ці покриття нанесені в відповідності до технологічного процесу на сертифікованому обладнанні з застосуванням якісних вихідних матеріалів та реагентів. Якість захисних покриттів окремих деталей значною мірою впливає на тривалість надійної експлуатації всього виробу в цілому, тому контроль якості гальванічних покриттів деталей і виробів має бути під багатоступеневим контролем на підприємстві-виробникові.

Контроль якості гальванічних покриттів в наш час проводиться руйнівними та неруйнівними методами. При контролі якості покриття руйнівними методами з партії деталей відбираються найгірші за зовнішніми ознаками зразки, які при проведенні контролю піддаються значним деформаціям і утилізуються. При руйнівному методі контролю не виключене потрапляння в кінцевий виріб деталей з прихованими дефектами. При неруйнівних методах всі виготовлені деталі можуть бути піддані контролю з достатньою точністю вимірювань.

Для запобігання випуску виробів з неякісними деталями необхідно при виготовленні виробів будь-якого призначення застосовувати систему контролю якості неруйнівними методами, яка складається з трьох рівнів.

В статті розглянуті та описані методи і засоби проведення неруйнівного контролю гальванічних покриттів. При першому рівні контролю проводиться візуальний огляд вхідних деталей та деталей з нанесеним гальванічним покриттям, як озброєним оком так і за допомогою оптичних приладів. При другому рівні контроль проводить спеціаліст відповідальний за виготовлення продукції. При третьому рівні контролю проводиться вибіркова або повна перевірка якості виробів в лабораторії або в відділі технічного контролю.

На підставі проведеного аналізу визначено, що для виготовлення якісних та надійних виробів необхідно проводити трирівневий неруйнівний контроль гальванічних покриттів деталей та виробів. Вибір методів та засобів вимірювання параметрів гальванічних покриттів залежить від призначення, сфер застосування та необхідного терміну експлуатації виробів.

**Ключові слова:** неруйнівний контроль, поверхня, деталь, гальванічне покриття, якість, надійність.

**Постановка проблеми.** Гальванічне покриття – це поверхневий шар металу, що утворюється на поверхні деталі, яка підлягає покриттю, за допомогою електрохімічних процесів. Суть гальваніки не тільки в отриманні декоративного покриття з металу на поверхні іншого металу, а й створення захисного шару, який утво-

рюється в результаті проникнення молекул металу покриття в поверхневий шар вихідної деталі [1].

Металеві покриття нанесені гальванічним способом на поверхні деталей і виробів за призначенням поділяються на наступні категорії:

– захисні покриття, які забезпечують захист деталей та виробів від корозійного впливу навко-

лишнього середовища в умовах зберігання та експлуатації;

– захисно-декоративні покриття, які разом із захистом від корозії забезпечують декоративне оздоблення поверхні.

Якість покриттів, яка відповідає вимогам стандартів та технічних умов та забезпечує нормальну роботу деталей в умовах експлуатації або збереження їх протягом необхідного терміну зберігання, може бути досягнута лише у випадку, якщо ці покриття нанесені в відповідності до технологічного процесу на сертифікованому обладнанні з застосуванням якісних вихідних матеріалів та реагентів. Якість захисних покриттів окремих деталей значною мірою впливає на тривалість надійної експлуатації всього виробу в цілому, тому контроль якості гальванічних покриттів деталей і виробів необхідно виконувати з багатоступеневим контролем на підприємстві-виробникові.

Незначна зміна вмісту окремих складових або забруднення в електроліті та на анодах навіть при дотриманні всіх інших вимог технологічного процесу може викликати зміну структури гальванічного покриття в такій мірі, що деталь з нанесеним покриттям виявиться непридатною для застосування в виробі. Неправильне завантаження деталей, застосування не відповідних анодів або підвісних пристроїв, витік струму в гальванічних ваннах, некоректні показання вимірювальних приладів, недостатня витримка деталей у ваннах призводять до браку гальванічного покриття за товщиною шару покриття, його пористості та інших параметрів, які впливають на експлуатаційні властивості виробу [2]. Для забезпечення необхідної якості продукції та попередження виготовлення бракованої продукції необхідно контролювати дотримання технологічного процесу нанесення всіх видів покриттів.

Контроль якості гальванічних покриттів в наш час проводиться руйнівними та неруйнівними методами. При контролі якості покриття руйнівними методами з партії деталей відбираються найгірші за зовнішніми ознаками зразки, які при проведенні контролю піддаються значним деформаціям і утилізуються. При застосуванні руйнівних методів контролю не виключене використання в виробках деталей з прихованими дефектами. При неруйнівних методах всі виготовлені деталі можуть бути піддані контролю з достатньою точністю вимірювань [3].

В даній роботі проаналізовані неруйнівні методи контролю гальванічних покриттів деталей. Дані методи необхідно застосовувати при

виробництві для підвищення якості, надійності та збільшення терміну експлуатації деталей та виробів, саме тому тема даної наукової роботи є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливим етапом при виготовленні виробів, в які входять деталі з гальванічним покриттям поверхонь, є контроль якості даних складових деталей.

Луїджі Гальвані (1737-1798 рр.), його ім'ям названий метод осадження частин одного металу на поверхню іншого – гальваніка, вивчав анатомію, фізіологію і фізику. Він першим в своїх дослідженнях виявив різницю потенціалів різних видів металів і електроліту при їх контакті. Застосовував цю різницю потенціалів в практичних цілях Моріц Герман (1801-1874 рр.). Переїхавши з Німеччини в Росію німець Моріц Герман змінив ім'я та прізвище на Борис Якобі. В 1840 р. він написав працю під назвою: «Спосіб виробляти за даними зразками з мідних розчинів мідні вироби за допомогою електрики або гальванопластика для прикладних мистецтв». Борис Якобі використовував в своїх дослідженнях результати винаходів Луїджі Гальвані, тому новий метод «просування технологій при виробництві монет, обладнання друкарень та художніх ремесел» він назвав гальванопластикою, а обладнання, в якому відбувається процес нанесення покриття – гальванічною ванною [2].

Науковими дослідженнями в області електрохімії, в тому числі питаннями гальванічних покриттів, займалися акад. АН СРСР Фрумкін О.Н., д.т.н., член-кор. АН УРСР, керівник кафедри електрохімічних виробництв КПІ Антропов Л.І. В їхніх працях описані теоретичні основи нанесення гальванічних покриттів [1]. В наш час науковими дослідженнями в сфері гальванічних покриттів продовжують займатись на кафедрі електрохімічних виробництв НТТУ «КПІ» к.х.н. Панасенко, к.х.н. Яцюк Л.А., к.т.н. Мотрошук Т.І. та інші науковці. Незважаючи на велику кількість публікацій, майже у всіх публікаціях описані руйнівні методи контролю якості гальванічних покриттів, при яких контролю підлягають вибіркові деталі з виготовленої партії, але мало уваги приділяється неруйнівним методам контролю, при яких можливе проведення контролю всіх виготовлених деталей, які пройшли процес гальванічного покриття, тому існує необхідність в подальших дослідженнях сфер і умов застосування неруйнівних методів контролю якості гальванічних покриттів.

**Постановка завдання.** Метою даної статті є аналіз застосування неруйнівних методів конт-

ролю гальванічних покриттів деталей для підвищення надійності, терміну експлуатації та якості деталей та виробів.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Контроль за дотриманням технологічних процесів нанесення покриття в гальванічних відділах підприємств полягає у перевірці:

- параметрів шорсткості поверхні деталей, які надходять на гальванічну обробку, параметрам, зазначеним в технічних умовах на поверхню деталей, які підлягають покриттю (не допускаються: раковини; окалина; не зачищені зварні шви; пошкодження різьб; на поверхнях, які не доступні шліфуванню та поліруванню не допускаються подряпини, риски, пори; після лиття під тиском на поверхнях деталей не повинно бути раковин та включень; при цьому застосування припоїв з основного металу для виправлення дефектів на деталях не дозволяється);

- результатів аналізів усіх матеріалів, що надходять у гальванічне відділах (хімікатів, анодних та ізоляційних матеріалів, паст, тощо);

- стану обладнання, кріпильних виробів (підвісних пристроїв) та контрольно-вимірювальних приладів [5, 6].

При нанесенні гальванічних покриттів (навіть при дотриманні всіх технологічних процесів) на поверхнях деталей можлива поява окремих дефектів, але деталі з дефектами не повинні потрапити в кінцевий виріб.

Для запобігання випуску виробів з неякісними деталями при виготовленні виробів будь-якого призначення необхідно застосовувати систему контролю якості гальванічних покриттів неруливними методами, яка складається з трьох рівнів.

Перший рівень. Первинний контроль якості деталей проводиться кваліфікованим спеціалістом, який наносив гальванічне покриття. Спеціаліст повинен проводити візуальний огляд вхідних деталей (які підлягають процесу обробки) та деталей з нанесеним гальванічним покриттям як неозброєним оком так і за допомогою оптичних приладів. Контроль виконується оглядом деталей на відстані приблизно 25 см від контрольованої поверхні при природному чи штучному освітленні (освітленість повинна бути не менше 300 лк). Оцінку якості зовнішнього вигляду покриттів також необхідно проводити на відповідність зразкам-еталонам, виготовленим з того ж матеріалу, що і деталі.

Другий рівень. Вторинний контроль повинен проводити спеціаліст, відповідальний за виготовлення продукції. Даний спеціаліст також повинен візуально проконтролювати виготовлені деталі.

Третій рівень. Вибіркова або повна перевірка якості виробів в лабораторії або відділі технічного контролю (ВТК). В лабораторії або ВТК необхідно (в залежності від призначення та умов використання виробу) виконувати контроль наступних параметрів:

- зовнішнього вигляду;
- ступеню блиску;
- адгезії покриття до основи (міцності зчеплення);
- пористості;
- корозійної стійкості;
- товщини покриття;
- оцінки паяння;
- електричного опору;
- твердості покриття;
- інших параметрів за необхідністю.

При виборі ділянок поверхонь деталей, які підлягають контролю, необхідно враховувати можливість утворення нерівномірних по товщині гальванічних покриттів через погану розсіювальну здатність електролітів, які застосовуються при гальванічному методі нанесення. Так як захисна здатність покриття в цілому визначається мінімальною товщиною його шару, то саме такі ділянки слід більш ретельно перевіряти при контролі.

При виявленні деталей з дефектами при проведеному всіх рівнів контролю деталі бракуються або направляються на повторне покриття. Після нанесення нового покриття деталі повинні пройти повну перевірку на всіх рівнях контролю.

Контроль зовнішнього вигляду проводиться неозброєним оком та за допомогою оптичних приладів (луп та мікроскопів). Перевіряється відсутність дефектів та зовнішній вигляд покритих деталей. Зовнішнім оглядом виявляються наступні явні дефекти:

- відшарування, здуття, тріщини та часткова відсутність покриття;
- невідповідність кольору та типу покриття;
- різнотонність, підтікання, бруд, тощо;
- візуальна невідповідність товщини покриття;
- недостатній ступінь блиску.

Оцінка ступеня блиску проводиться за допомогою спеціальних інструментів з нанесеними на них малюнками або текстом. При цьому розрізняють чотири ступені блиску:

- дзеркальний блиск – повне та чітке відображення малюнка;
- блиск – дзеркальний блиск, але частина покриття розмита;
- півблиск – малюнок відображений повністю, але розмитий;

– матовість – відображення малюнка присутнє лише в частині виробу.

Оцінка адгезії. Адгезія – показник сили зчеплення покриття із основою частиною виробу. На адгезію впливає багато факторів: стан вихідної поверхні (забрудненість, наявність окалини та іржі, шорсткість), чим більша шорсткість виробу, тим краще адгезія покриття, але гірший блиск; дотримання технологічного процесу нанесення покриття, особливо під час виконання підготовчих операцій (знежирення, травлення); вид металу, з якого виготовлена деталь. Перевірка адгезії виконується наступними методами неруйнівного контролю:

– поліруванням при товщині покриття до 30 мкм. Проводиться матеріалами з б'язі або фетру з використанням полірувальних паст;

– термодинамічним і термостатичним способами – нагріванням виробу до температури 190°C з різким чи поступовим охолодженням;

– обпилюванням (при товщині покриття не менше 5 мкм).

Оцінка пористості покриттів. Захисні властивості катодних покриттів залежать від їх пористості. Підвищеній пористості покриттів може сприяти наявність на поверхні основного металу ділянок, які не проводять струм (повітряні бульбашки, залишками мастил або охолоджуючої рідини при підготовці деталі перед нанесенням покриття), налипання шламу в процесі покриття, тощо. Для оцінки пористості і мікротріщин покриттів використовуються методи, що ґрунтуються на взаємодії реагенту з основним металом виробу та металом покриття в місцях виникнення пор. Метод накладання полягає в накладанні фільтрувального паперу, змоченого спеціальним розчином на деталь та підрахунку точок на папері певного кольору. При оцінюванні пористості багатошарових покриттів використовуються додаткові розчини, які видаляють точки, що проявилися на накладеному шарі паперу, і виявляють точки, що вказують на пори, які присутні на наступному шарі покриття. Метод паст аналогічний методу накладання, але пори виявляються на самому виробі.

Корозійна стійкість. Основне призначення гальванічних покриттів – захист виробів від корозії, тому необхідно контролювати захисну здатність покриття. Для перевірки корозійної стійкості деталей з гальванічним покриттям застосовуються наступні методи:

– для проведення корозійних випробувань використовується одна (чи декілька) з партії галь-

ванічно покритих деталей. При використанні методу проводиться кількісна оцінка ступеня корозії виробів і якісна візуальна оцінка. Тривалість терміну проведення випробувань – не більше 7 діб. Для оцінки результатів використовується прозорий трафарет з сіткою квадратів. Ступінь враження іржею розраховується як відношення кількості квадратів з іржею до квадратів без іржі.

– камера сольового туману – випробування проводяться у спеціальному боксі, в який завантажуються деталі та в який розпиляється розчин солі (в основному використовується 5% розчин NaCl). Корозійна стійкість вимірюється в годинах проведених у камері до появи слідів корозії на виробі.

Один із самих важливих параметрів гальванічного покриття – його товщина. Занижена товщина призводить до передчасної корозії покриття та погіршення його захисних властивостей. Перевищення необхідної товщини гальванічного покриття може привести до неможливості складання виробу.

Основні неруйнівні методи перевірки товщини покриття:

– метод прямих вимірів (за допомогою мікрометра та калібру);

– магнітоіндукційний;

– метод вихрових струмів;

– радіаційний;

– термоелектричний;

– оптичний.

З перерахованих методів контролю на виробництві найчастіше застосовуються магнітоіндукційний метод і метод вихрових струмів.

Оцінка паяння визначає змочуваність покриття припоями і якість паяного з'єднання. Основні методи оцінки паяності: метод розтікання та, капілярний метод. Метод розтікання дозволяє оцінити паяння як якісно, так і кількісно: розтікання припою нульове – припій має форму сфери; низьке припій має форму півсфери з площиною на покритті; високе – припій розтікається поверхнею покриття. Капілярний метод передбачає використання капіляра із двох металевих пластинок, які занурюються в розплавлений припій. Паяність оцінюється за висотою, на яку піднімається припій.

Оцінка електричного опору. При контролі гальванічних покриттів вимірюють три види електричного опору – пробивний, перехідний та питомий:

– пробивний електричний опір – максимальний опір покриття на пробій. Проводиться якісне



і кількісне вимірювання пробивного опору. При якісному вимірюванні пробивного електричного опору застосовуються мультиметр із функцією «продзвону» або мегомметр. При кількісному вимірюванні пробивного опору використовуються двоелектродні системи, де один електрод є металеву кулькою, а другий може бути кулькою або точковим наконечником;

– перехідний електричний опір – опір у місці з'єднання одного металу з іншим. Перехідний електричний опір залежить від контактуючих металів. Метод оцінки перехідного опору базується на вимірі опору між виробом та еталонним електродом;

– питомий електричний опір – величина, що характеризує опір матеріалу протіканню по ньому електричного струму. Чим менший питомий опір провідника, тим легше струм проходить через нього і тим менші втрати струму в ланцюзі. Вимірювання питомого електричного опору проводиться за допомогою спеціального датчика.

Твердість – здатність матеріалу чинити опір проникненню в його поверхневі шари іншого, твердішого тіла. Визначення твердості покриттів проводиться динамічним (методом відскоку) та ультразвуковим методами. Ультразвуковий метод заснований на зміні резонансної частоти коливань металевого стержня із закріпленою на кінці алмазною пірамідкою Віккерса при контакті пірамідки з поверхнею виробу. Ультразвуковий

метод найбільш придатний для контролю твердості поверхневих шарів виробів, тому що глибина проникнення індентора знаходиться в межах 30-50 мкм [4].

При проведенні контролю якості гальванічних покриттів, при необхідності, оцінюються й інші показники:

– мікроструктура покриття – зйомка мікрображень на електронному мікроскопі в режимі топографічного розмаїття з детектором вторинних електронів та в режимі фазового розмаїття з реєстрацією відбитих електронів;

– елементний склад покриття – отримання та розшифрування спектрів енергодисперсійного рентгенівського аналізу, що дають інформацію про елементний склад покриттів у вагових та атомних відсотках.

**Висновки.** Проведений аналіз методів контролю якості гальванічних покриттів деталей та виробів, які повинні забезпечувати відповідність вимогам стандартів та технічних умов і забезпечувати надійну роботу деталей та виробів в умовах експлуатації, показує, що багаторівневі неруйнівні методи контролю гальванічних покриттів оптимальні для використання у виробничих умовах, тому що їх застосування дозволяє контролювати всі виготовлені деталі, які пройшли процес гальванічного покриття, на відміну від руйнівних методів, при яких контролю підлягають вибіркові (з виготовленої партії) деталі.

#### Список літератури:

1. Антропов Л.І. Теоретична електрохімія. – К.: Либідь, 1993. 544 с.
2. Білокур І.П. Дефектологія и неруйнівний контроль. – К.: Вища школа, 1990. 207 с.
3. Топчій Н.В., Шорнікова С.В., Альховик О.В. Іноваційні механізми неруйнівного контролю в умовах виробництва. Комп'ютерно інтегровані технології: Освіта, наука, виробництво, (40), с. 90-96. DOI:<https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2020-40-11>
4. Альховик О.В. Застосування електронних твердомірів для підвищення якості та надійності при виготовленні спецтехніки. – К.: Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки», Том 32 (71). № 2, 2021. с. 1-6
5. ДСТУ EN 17059:2019 Лінії нанесення гальванічних і анодувальних покриттів (EN 17059:2018, IDT)
6. ДСТУ ISO 4042:2004 Кріпильні вироби. Покриття електролітичні (ISO 4042:1999, IDT)

#### Alkhovyk O.V. NON-DESTROYING METHODS FOR CONTROL OF ELECTRIC COATINGS OF PARTS AND PRODUCTS UNDER PRODUCTION CONDITIONS

*The article analyzes the use of non-destructive methods for monitoring galvanic coatings of parts and products.*

*Electroplating is a surface layer of metal that is formed on the surface of the part to be coated using electrochemical processes. The essence of electroplating is not only to obtain a decorative metal coating on the surface of another metal, but also to create a protective layer resulting from the penetration of coating metal molecules into the surface layer of the original part.*

*The quality of coatings that meets the requirements of standards and specifications and ensures the normal operation of parts under operating conditions or their storage for the required storage period can only be achieved if these coatings are applied in accordance with the technological process on certified equipment using high-quality initial materials and reagents. The quality of the protective coatings of individual parts to*

*a large extent affects the duration of reliable operation of the entire product as a whole, therefore, the quality control of electroplated coatings of parts and products should be controlled at the manufacturer.*

*Quality control of electroplated coatings is currently carried out by destructive and non-destructive methods. During quality control of the coating by destructive methods, samples that are worse in appearance are selected from a batch of parts, which, during the control, are subjected to irreparable deformations and disposed of. With the destructive method of control, parts with hidden defects cannot be excluded from entering the final product. With non-destructive methods, all parts made can be controlled with sufficient measurement accuracy.*

*To prevent the release of products with low-quality parts, it is necessary to apply a quality control system by non-destructive methods, consisting of three levels, in the manufacture of products for any purpose.*

*The article discusses and describes the methods and techniques for non-destructive testing of galvanic coatings. At the first level of control, a visual inspection of the input parts and parts with a galvanized coating is performed both with the naked eye and with the help of optical instruments. At the second level, the control is carried out by a specialist responsible for the manufacture of products. At the third level of control, a selective or complete check of the quality of products is carried out in the laboratory or in the technical control department.*

*Based on the analysis, it was determined that for the production of high-quality and reliable products, it is necessary to carry out a three-level non-destructive testing of electroplated coatings of parts and products. The choice of methods and means for measuring the parameters of galvanic coatings depends on the purpose, industries of application and the required service life of products.*

**Key words:** *non-destructive testing, surface, detail, electroplating, quality, reliability.*

УДК 631.356.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/02>**Пушка О.С.**

Уманський національний університет садівництва

**Войтік А.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Оляднічук Р.В.**

Уманський національний університет садівництва

**Кутковецька Т.О.**

Уманський національний університет садівництва

## АНАЛІЗ КОНСТРУКЦІЙ І РЕЖИМІВ РОБОТИ СЕПАРУЮЧИХ ПРИСТРОЇВ КАРТОПЛЕЗБИРАЛЬНИХ МАШИН

У статті проведені теоретичні дослідження щодо конструкцій робочих органів картоплезбиральних машин, а саме роботи сепаруючих пристроїв та їх основних параметрів. В результаті проведених досліджень нами було визначено велику кількість нових конструкцій, а також модифікацій вже існуючих сепараторів. Зокрема, розглянуто дві основні групи робочих органів картоплезбиральних машин це – робочі органи, що здійснюють первинну сепарацію та робочі органи, що здійснюють вторинну сепарацію. У кожну з підгруп входять вальцеві, прутково-барабанні і ротаційні робочі органи, які істотно розрізняються формами, розмірами робочих поверхонь і варіантами виконань, що вказує на тенденцію їх широкого застосування та постійного розвитку. В результаті досліджень визначено, що на сьогодні найбільш поширені ротаційні сепаратори і все частіше використовуються в картоплезбиральних машинах. Вони зазвичай представляють собою набір паралельно розташованих і обертаються в одному напрямку валів, на які встановлюються циліндричні гладкі і рифлені труби, спіральні пружини, пруткові ротори, диски різної форми, багатогранники і зірочки. За рахунок обертального руху і рифленої поверхні ротаційних робочих органів картопляний шар рівномірно розподіляється по всій ширині сепаруючої поверхні, тим самим забезпечується інтенсивне просіювання домішок. При цьому найбільш перспективним є вдосконалення картоплекопачів шляхом комбонування сепараторів ротаційного типу у вигляді комбінованих конструкцій, що працюють спільно з інтенсифікаторами сепарації і спроможних до зміни режимів обертання робочих органів і сепаруючих зазорів для забезпечення щадної взаємодії з бульбами в будь-яких умовах збирання. Таким конструктивним рішенням може бути поєднання приймально-подавального лопатевого бітера та ротаційного сепаратора, що забезпечить підвищення інтенсивності сепарації ґрунту і продуктивності картоплезбиральних машин.

**Ключові слова:** картоплезбиральні машини, сепаруючі пристрої, робочі органи, режими роботи, конструктивні параметри.

**Постановка проблеми.** Вирощування картоплі є одним із найбільш енергоємних технологічних процесів, що вимагає великої механізації робіт. Більше 80% врожаю картоплі збирається механізованим способом в складних ґрунтово-кліматичних умовах, що призводить до зниження ефективності роботи застосовуваних картоплезбиральних машин, підвищення пошкодження бульб й собівартості картоплі.

Досвід експлуатації картоплезбиральних машин в різних регіонах вказує на недостатню ефективність сепарації суглинних ґрунтів, а також на відсутність можливості регулювання робочих

параметрів сепараторів під конкретні умови збирання. У більшості картоплезбиральних машин в якості сепаруючих пристроїв використовуються прутковий елеватор або коливальний грохот. При роботі на суглинних ґрунтах спостерігається значне залипання ґрунтом і забивання рослинними залишками їх робочих органів, через що знижується сепаруюча здатність і продуктивність картоплезбиральних машин, а також збільшується пошкодження бульб. При цьому є актуальним завданням розробка перспективних сепараторів ротаційного типу комбінованої конструкції з регульованими технологічними параметрами.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню питань, що пов'язані з конструкціями картоплезбиральних машин присвячені роботи С.М. Боричева [1, с. 15], Д.Г. Войтюка [2, с. 115], Г.Р. Гаврилюка [2, с. 201], О.В. Кузьміна [5, с. 120], С.С. Остроумова [5, с. 117] та ін. Але, існує ряд питань, які стосуються робочих органів картоплезбиральних машин, а саме сепаруючих пристроїв. Тому, проведення досліджень вище зазначеної проблеми на сьогоднішній день є актуальним.

**Постановка завдання** полягає в проведенні теоретичного дослідження щодо конструкцій та режимів роботи сепаруючих пристроїв картоплезбиральних машин.

**Виклад основного матеріалу.** В результаті проведених досліджень нами було визначено велику кількість нових конструкцій, а також модифікацій вже існуючих сепараторів. Внаслідок цього виникла необхідність доопрацювання загальноприйнятих класифікацій цих пристроїв. Тому, в даній роботі нами запропоновано найбільш поширені робочі органи картоплезбиральних машин механічного принципу дії, що доповнено тенденцією розвитку вальцевих, барабанних і ротаційних сепараторів, а також інтенсифікаторів і доочисних пристроїв. Запропонована класифікація включає в себе дві основні групи робочих органів (рис. 1):

- робочі органи, що здійснюють первинну сепарацію;
- робочі органи, що здійснюють вторинну сепарацію [1, с. 75].

У кожному з підгруп входять вальцеві, прутково-барабанні і ротаційні робочі органи, які істотно розрізняються формами, розмірами робочих поверхонь і варіантами виконань, що вказує на тенденцію їх широкого застосування та постійного розвитку. Тому, ротаційні варіанти конструкцій сепараторів можна розглядати, як перспективний напрямок для підвищення інтенсивності сепарації ґрунту і продуктивності картоплезбиральних машин [2, с. 448].

Розглянемо конструктивні особливості і режими роботи найбільш поширених пристроїв.

Принцип роботи коливальних грохотів, що застосовуються в картоплезбиральних машинах, ґрунтується на сепарації бульб за розмірною ознакою. За конструкцією грохотні сепаруючі пристрої підрозділяються на одно решітні і спарені, а також на горизонтальні з позитивним або негативним кутом нахилу решета. За місцем розташування ексцентрикового вала розрізняють грохоти з верхнім, нижнім і змішаним способом кріплення підвісок [9, с. 90].

Комбіновані сепаруючі пристрої, що складаються з коливального грохоту з встановленим



Рис. 1. Класифікація сепараторів механічного принципу дії

на ньому леміші, набули широкого поширення в невеликих однорядних картоплекопачах, які агрегатуються з тракторами тягових класів 0,6 і 0,9 (Рис. 2).



Рис. 2. Однорядний картоплекопач грохотного типу

За рахунок динамічного впливу комбіновані пристрої краще підкопують картопляний шар. Однак, вони мають значну інерційну невідповідність та енергоємність, через що їх застосування обмежується лише невеликими картоплезбиральними машинами [8, с. 74].

До основних параметрів сепараторів грохотного типу відносяться: кут нахилу решіт, амплітуда коливань, частота обертання ексцентрикового вала, розмір сепаруючого просвіту між прутами, а також довжина решіт [9, с. 112].

Серед розглянутих типів сепаруючих пристроїв широкого використання набув прутковий елеватор. Він відноситься до сепараторів просівного типу і являє собою нескінченне решітчасте полотно, утворене прутами різної форми (рис. 3). До головних переваг пруткових елеваторів відносяться: простота конструкції, можливість транспортування матеріалу під кутом більше  $25^\circ$ ,

а також низький ступінь травмування культури, яка збирається. На відміну від грохотного сепаратора прутковий елеватор може працювати на різних типах ґрунту і прибирати не тільки картоплю, а й інші коренеплоди [3, с. 50].

Робочий процес пруткового елеватора визначається його робочою довжиною, швидкістю руху і кутом нахилу полотна до горизонту, а також сепаруючою відстанню між прутами і типом струшувача.

На сьогодні найбільш поширені ротаційні сепаратори і все частіше використовуються в картоплезбиральних машинах. Вони зазвичай представляють собою набір паралельно розташованих і обертанням в одному напрямку валів, на які встановлюються циліндричні гладкі і рифлені труби, спіральні пружини, пруткові ротори, диски різної форми, багатогранники і зірочки. За рахунок обертального руху і рифленої поверхні ротаційних робочих органів картопляний шар рівномірно розподіляється по всій ширині сепаруючої поверхні, тим самим забезпечується інтенсивне просіювання домішок. Розглянемо ротаційні сепаруючі пристрої, які отримали найбільшого поширення в картоплезбиральних машинах [6, с. 184].

У США і Західній Європі широко застосовуються картоплекопачі і картоплекопачі-навантажувачі з елеватором в якості первинного сепаратора та рифленими трубами, спіральними пружинами, прутковими роторами, як вторинного сепаратора. Причому довжина даних ротаційних робочих органів завжди дорівнює ширині пруткового елеватора, в комплексі з яким вони працюють. Таким чином, забезпечується максимальна сепаруюча здатність картоплезбиральної машини [10].

Одним із таких прикладів є сепаратор картоплекопача навантажувача Англійської компанії «STANDEN-PEARSON» моделі «T2» (рис. 4). Його основний сепаруючий пристрій складається з двох пруткових елеваторів *1*. Регульований зазор

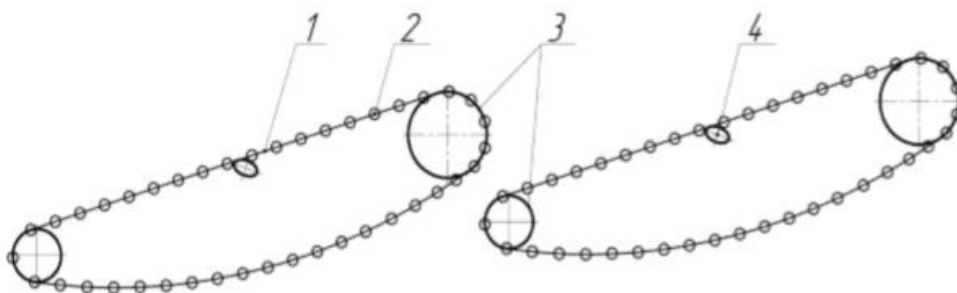
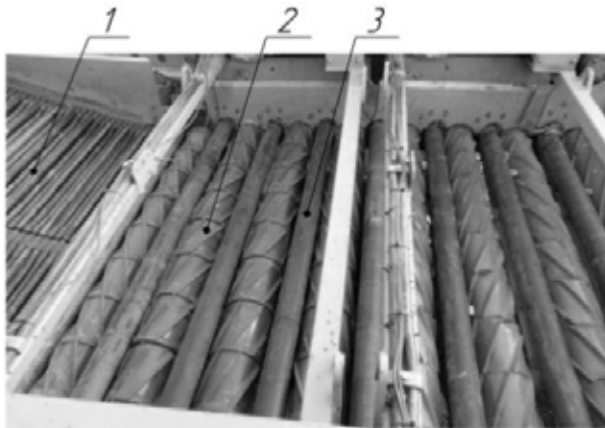


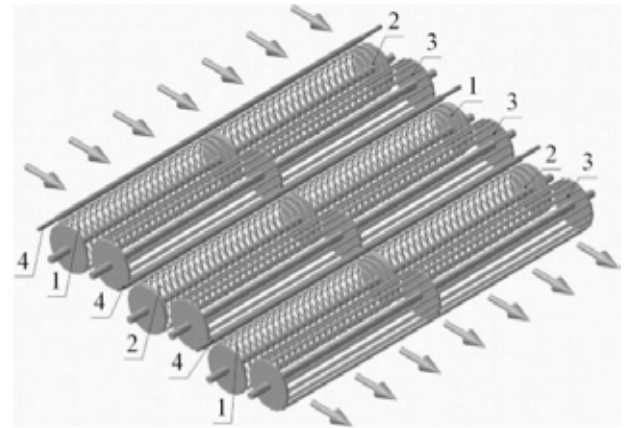
Рис. 3. Схема сепаратора елеваторного типу:

1 – полотно елеватора; 2 – пруток; 3 – ведуча і ведена зірочки, 4 – еліптичний струшувач.



**Рис. 4. Вторинний ротаційний сепаратор:**

1 – прутковий елеватор, 2 – рифлена труба, 3 – гладка труба.



**Рис. 5. Схема ротаційного комбінованого сепаратора:**

1, 2 – спіралі з лівою і правою навивкою; 3 – прутковий ротор; 4 – обмежувальний пруток (стрілками показано напрямок руху картопляної купи)

між першим і другим елеватором дозволяє оптимізувати робочий процес картоплекопача під конкретні умови [7].

Основними параметрами, що визначають процес його роботи є: кут нахилу сепаруючої поверхні, діаметр робочих органів і швидкість їх обертання, а також розмір сепаруючого просвіту між трубами.

Сепаруюча здатність його, ступінь пошкодження бульб і швидкість переміщення картопляної маси безпосередньо залежать від швидкості обертання робочих органів. З її зростанням підвищується просіюваність ґрунту, ступінь пошкодження бульб і швидкість руху картопляної маси.

Робочі органи у вигляді рифлених або гладких труб частково схильні до залипання ґрунтом і намотування бадиллям. Це негативно позначається на ефективності роботи і призводить до того, що при підвищеній вологості переміщення картопляної купи відбувається за рахунок підпору маси, що надходить з елеватора.

У картоплезбиральній техніці робочі органи у вигляді спіральних пружин в основному використовуються тільки в комплексі з сепараторами елеваторного типу. В процесі роботи таких пристроїв частково очищені купи надходять на пружинну сепаруючу поверхню, де під дією динамічних сил відбувається остаточне руйнування ґрунтових грудок, просіювання домішок і переміщення матеріалу до вивантажувального пристрою [9, с. 212].

При машинному збиранні картоплі на полях з суглинистим або глинистим ґрунтом підвищеної вологості ефективність роботи пружинного сепаратора знижується, а ступінь травмування бульб збільшується. Для вирішення цієї проблеми

науковцями був запропонований комбінований сепаратор, що складається з спіральних пружин і пруткових роторів (рис. 5) [5, с. 119]. У порівнянні з пружинами прутковий ротор краще руйнує ґрунтові грудки, але має низьку просіювальну здатність і сильніше травмує бульби.

На підставі проведених досліджень можна зробити висновок, що найбільш перспективним напрямком є розробка і вдосконалення сепаруючих пристроїв на основі активних робочих органів [4, с. 76]. Вони показали хороші результати при збиранні картоплі на полях з легкими та середніми ґрунтами. Їх форма і розташування знижують ймовірність защемлення бульб і грудок, а також намотування рослинних залишків і залипання западин (між сусідніми пальцями) ґрунтом. За рахунок активної дії роторів досягається 85% відділення домішок при допустимій ступені травмування бульб. У той же час огляд показав недостатній ступінь дослідження робочих процесів ротаційних сепараторів в напрямку підвищення їх ефективності і надійності при сепарації значних обсягів вологого суглинистого ґрунту, а також для зниження енергоємності картоплезбиральних машин в цілому.

**Висновки.** Таким чином, в результаті теоретичного огляду конструкцій та режимів роботи сепараторів картоплезбиральних машин найбільш перспективним є вдосконалення картоплекопачів шляхом компонування сепараторів ротаційного типу у вигляді комбінованих конструкцій, що працюють спільно з інтенсифікаторами сепарації і спроможних до зміни режимів обертання робочих органів і сепаруючих зазорів, для забезпечення щадної взаємодії з бульбами в будь-яких

умовах збирання. Таким конструктивним рішенням може бути поєднання приймально-подавального лопатевого бітера та ротаційного сепаратора, що забезпечить підвищення сепаруючої ефективності в картоплезбиральних машин й зниження енергоємності.

#### Список літератури:

1. Борычев С.Н. Технологии и машины для механизированной уборки картофеля: монография. Рязань : РГСХА, 2011. 220 с. 4
2. Войтюк Д.Г., Гаврилюк Г.Р. Сільськогосподарські машини: підручник. Київ : Каравела, 2004. 552 с.
3. Воронков В.В. Интенсификация сепарирующей способности прутковых элеваторов картофелеуборочных машин за счет предварительного разрушения клубненосного пласта. *Аграрный вестник Верхневолжья*. 2014. № 2. С. 50–54. 7
4. Никитин Г.С., Алакин В.М., Плахов С.А. Определение оптимальных параметров и режимов работы лопастного битера. *Наукоёмкие технологии в приборо- и машиностроении и развитие инновационной деятельности в вузе: материалы региональной научно-технической конференции*, 19–21 апреля 2016 Калуга : Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2016. Т. 2. С. 75–77. 17
5. Остроумов С.С., Кузьмин А.В. Обоснование параметров ротора сепаратора картофелеуборочной машины. *Вестник ИрГСХА*. 2015. № 66. С. 117–123. 20
6. Остроумов С.С., Кузьмин А.В. К выбору рациональных параметров роторного сепаратора картофелекопателя. *Вестник КрасГАУ*. 2014. № 9. С. 182–187. 19
7. Офіційний сайт виробника сільськогосподарської техніки Standen Pearson [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.standen.co.uk>. 21
8. Синій С.В., Гевко Р.Б., Осуховський В.М. Новий малогабаритний комбайн для збирання картоплі. *Вісник Інженерної академії України*. Київ. 2012. Вип. 3–4. С. 72–76.
9. Туболев С.С., Шеломенцев С.И., Пшеченков К.А., Зейрук В.Н. Машинные технологии и техника для производства картофеля. М.: Агроспас, 2010. 316 с. 14
10. Grimme.[Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.grimme.de>.

#### **Pushka O.S., Voitik A.V., Olyadnichuk R.V., Kutkovetska T.O. ANALYSIS OF DESIGNS AND MODES OF OPERATION OF SEPARATING DEVICES OF POTATO HARVESTING MACHINES**

*The article conducts theoretical studies on the designs of the working bodies of potato harvesting machines, namely the work of separating devices and their main parameters. As a result of the research, we identified a large number of new structures, as well as modifications of existing separators. In particular, two main groups of working bodies of potato harvesting machines are considered – working bodies that carry out primary separation and working bodies carrying out secondary separation. Each of the subgroups includes roller, rod-drum and rotary working bodies, which differ significantly in shapes, sizes of working surfaces and variants of executions, which indicates a trend of their widespread use and constant development. As a result of research, it is determined that today rotational separators are the most common and are increasingly used in potato harvesting machines. They are usually a set of parallel and rotating shafts in the same direction, on which cylindrical smooth and corrugated pipes, spiral springs, rod rotors, discs of various shapes, polyhedrons and asterisks are installed. Due to the rotational movement and corrugated surface of the rotational working organs, the potato layer is evenly distributed over the entire width of the separating surface, thereby ensuring intensive sifting of impurities. At the same time, the most promising is the improvement of potato diggers by composing rotary-type separators in the form of combined structures working together with separator intensifiers and capable of changing the rotation modes of working organs and separating gaps to ensure gentle interaction with tubers in any harvesting conditions. Such a constructive solution can be a combination of a receiving and feed blade beater and a rotary separator, which will increase the intensity of soil separation and the productivity of potato harvesting machines.*

**Key words:** potato harvesters, separating devices, working bodies, operating modes, design parameters.

## КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 656.61.052

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/03>

**Яглицький Ю.К.**

Херсонський навчально-науковий інститут Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Кириченко К.В.**

Херсонська державна морська академія

### СУЧАСНІ КОМП'ЮТЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ І СИСТЕМИ В ЗАДАЧАХ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДЕН

*Сучасний етап розвитку суднобудування та судноплавства характеризується створенням складних зразків морської техніки, якими все важче управляти і приймати правильні рішення при виникненні небезпечних ситуацій. Аналіз аварій суден свідчить про те, що значна їх частка пов'язана з незначними фактичних показників мореплавства в штормових умовах, тому проблема забезпечення безпеки мореплавства в усі часи зберігається актуальною. Зростаючий вплив системи «людина-судно» в процесі експлуатації суден обумовлює необхідність врахування підвищених вимог до безпеки. Дослідження морехідних якостей виконуються на основі аналізу динаміки судна і вимагає розробки нових підходів, що забезпечують надійні методи прогнозу. Це підкреслює актуальність постановки задачі аналізу і дослідження обчислювальних системоконплексів, що визначають поведінку судна в різних ситуаціях з використанням методів математичного моделювання. Сучасні можливості обчислювальної техніки відкривають перспективи широкого використання засобів і методів математичного моделювання поведінки судна в умовах безперервної зміни зовнішнього середовища. Бортові обчислювальні комплекси (БОК), що створюються в даний час в дослідницькому проектуванні, і повинні забезпечити автоматизовану підтримку прийняття рішень з безпеки мореплавства. Інтегрований БОК – це система інтелектуальної підтримки судноводія, яка призначена для визначення мореплавності судна в даних умовах плавання при режимі руху, який використовується, і як уникнути випадків втрати мореплавства. В сучасних умовах інтегровані БОК можуть бути складовою частиною глобальних комп'ютерних систем, найбільш перспективними напрямками застосування яких є «e-навігація» та безекіпажне судноводіння, які є одними з ключових напрямків розвитку інформаційних технологій у морській галузі.*

*Вивченню особливостей сучасних комп'ютерних технологій і систем з аналізу та прогнозу морехідних якостей суден та інноваційних технологій «e-навігації» й безекіпажного судноводіння і присвячено представлене дослідження.*

**Ключові слова:** безпека мореплавства, морехідні якості, обчислювальний комплекс, інноваційні комп'ютерні технології та системи, «e-навігація», безекіпажне судноводіння.

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах однією з головних тенденцій мореплавства є забезпечення більш високого рівня морехідної безпеки суден [1, с. 170]. Актуальність цього завдання визначається тим, що частка роботи морського судна в умовах вітру і хвилювання становить в середньому 65-70% його ходового часу. Одним з ефективних засобів підвищення безпеки штормового плавання є комп'ютеризація контролю мореплавства на судні.

Дослідження й удосконалення наявних та впровадження нових інформаційних засобів ана-

лізу і прогнозу мореплавства в поєднанні з можливостями і високою продуктивністю персональних комп'ютерів (ПК) сприятиме підвищенню рівня морехідних якостей судна та дозволить значно знизити кількість випадків втрати мореплавства.

Саме тому це питання залишається **актуальним** і для сучасних дослідників технологій контролю мореплавства судна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Найбільш ефективним напрямком отримання значень показників мореплавства є розрахункові методи, які широко використовуються для



оцінки, прогнозу та оптимізації мореплавства в дослідницькому проектуванні і при визначенні параметрів реакції судна на хвилювання. Вони базуються на працях багатьох вчених: В. Г. Власова, Л. М. Ногіда, Ю. В. Ремеза, Г. Є. Павленко, М. Д. Хаскінда, І. К. Бородая, А. В. Бронникова, І. Г. Захарова, В. О. Некрасова, Ю. І. Нечаєва, Неймана, Конолі, Льюїса, Очі, Тасакі та інших.

Алгоритми розрахунку параметрів морехідності вигідно доповнюють вимірвальну апаратуру автоматизованих систем контролю морехідності (АСКМ). З їх допомогою підвищується точність і надійність оперативних оцінок безпеки судна, прогноуються параметри хитавиці, навантажень на корпус і вирішуються інші завдання.

**Основним завданням** даної роботи є необхідність більш наочно розглянути і проаналізувати можливості основних технологій та засобів контролю мореплавства судна і виділити найбільш перспективні з точки зору морехідної безпеки суден.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Процес управління судном має циклічний безперервний характер і протікає в часі та просторі. Для управління безпосередньо рухом обов'язково необхідні наступні дані з автоматизованої навігаційної системи судна:

- мета управління і опис її досягнення (правила, настанови, керівні документи) з особливостями руху суден в даних кліматичних умовах;

- система управління з необхідними параметрами (дані про стан корпусу судна, дані про механізми і обладнання, відомості про маневрені та морехідні якості судна, інформацію про встановлені шляхи руху, райони плавання, про системи суднових повідомлень і службах руху суден, про заходи щодо захисту морського середовища, дані про візуальні і радіотехнічні засоби);

- інформація про зовнішнє середовище (відомості про навігаційні та

- гідрометеорологічні умови, відомості про порти, дані про поточну погоду і прогноз, дані про поточне положення судна) з урахуванням відомостей, що надходить з наземних систем ведення руху морських суден.

Обробка даних в автоматизованій навігаційній системі здійснюється за допомогою інформаційних, технічних та програмних засобів, що встановлені на судні. Однак невизначеність вихідної інформації і неповнота даних про фізичні картини взаємодії судна з зовнішнім середовищем призводять до необхідності всебічного вивчення особливостей динаміки судна.

Дослідження морехідних якостей та особливостей задач динаміки суден на хвилюванні показують, що математичні моделі, які описують поведінку судна, володіють специфічними властивостями – єдиною структурою і загальною ознакою нелінійності. Для їх створення необхідні складні математичні розробки і використання сучасних обчислювальних засобів.

В даний час використання обчислювальної техніки для управління

складними динамічними об'єктами стало повсякденною реальністю. Однак переважна більшість бортових обчислювальних систем призначені виключно для автоматичного управління і використовують тільки деякі прості алгоритми, які вбудовані в логічних контролерах.

У якості альтернативи їм можна розглядати бортові консультуючі системи або системи підтримки прийняття рішень оператора динамічного об'єкта на базі однопроцесорних бортових обчислювачів, які призначені для вирішення конкретних завдань (контролю мореплавства судна). Застосування високопродуктивної багатопроцесорної техніки дозволяє об'єднувати функції бортових систем різного призначення, координувати їх роботу і, як результат, давати навігатору повну картину про стан і прогноз поведінки об'єкта, що управляється.

За даними спеціалістів складності, що виникають на шляху вирішення завдання, пов'язані не тільки з відсутністю відповідного математичного апарату, але і з неповнотою вихідної інформації і невизначеністю зовнішніх умов, в яких протікає конкретна ситуація.

Таким чином, для розробки ефективних методів аналізу і прогнозу поведінки судна в штормових умовах необхідно мати досить надійні алгоритми перетворення інформації для прийняття обґрунтованих рішень. Формалізація знань може бути здійснена на основі сучасних підходів до організації бортових обчислювальних комплексів (БОК). Основну увагу необхідно звертати на контроль і прогноз розвитку екстремальної ситуації в умовах безперервної зміни динаміки судна під впливом зовнішніх хвилювань (рис. 1).

При дослідженні процесу функціонування БОК розглядають поточний  $C^t$ , початковий  $C^0$  і кінцевий  $C^k$  стан судна. Початковий стан відповідає моменту реалізації прийнятого рішення, а кінцевий – стану, який отримується в результаті керуючого впливу (вибір курсового кута хвилі і швидкості судна, баластування та інше). Зазначені стани можна представити у вигляді

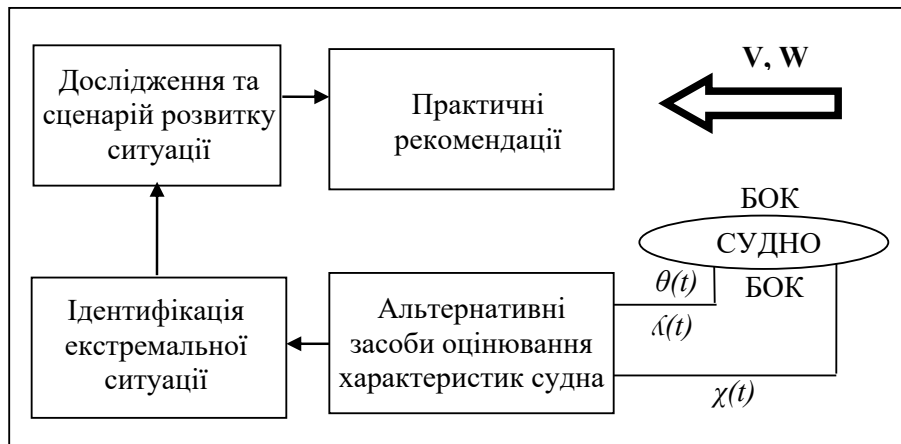


Рис. 1. Загальна схема функціонування БОК (бортових обчислювальних комплексів) дослідження та моніторингу морехідних якостей суден:

$V, W$  – вектори швидкості і напрямку вітру та хвилювання;  
 $\lambda(t), \dots, \chi(t)$  – параметри коливального руху судна при хитах

узагальнених (які задовольняють певним критеріям) векторів:

$$C^i = (C^i_j); C^0 = (C^0_j); C^k = (C^k_j); (i = 1, \dots, n).$$

Кожний з цих станів буде відмінним для підсистем, що утворюють БОК, тому можна записати:

$$C_j^i = (C_{ji}^i); C_j^0 = (C_{ji}^0); C_j^k = (C_{ji}^k);$$

$$(j = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n).$$

Функція управління БОК полягає в тому, щоб з безлічі цільових станів (альтернатив)  $(C^i)^m$  сформулювати узагальнений (який задовольняє певним критеріям) вектор кінцевого стану  $C^k$  відповідно до деякої колективної стратегії  $W^k$ .

$$C_j^k = W^k \{ (C^i)^m, C_{fj}^k \} (f = 1, \dots, n; f \neq j),$$

де  $C_j^k$  – множина цільових станів БОК.

Ці дані дозволяють на заданому інтервалі часу  $[t_0 - t_f]$  визначити розшукуване рішення поставленого завдання. Аналіз повинен вестися в реальному масштабі часу з використанням методів математичного моделювання (ММ).

Розробка управляючих впливів при організації баз знань (БЗ) здійснюється на основі результатів динамічних вимірювань параметрів стану судна та зовнішніх збурень після виконання певних обчислювальних і логічних операцій. Якість роботи БОК при реалізації колективної стратегії визначається функцією неузгодженості, що характеризує розбіжність технічних станів судна для прийнятого рішення  $C_k$  (сценарій) і фактичного стану  $C_f$  в розглянутий момент часу:

$$\Phi(N) - \Phi(C_k, C_f)$$

Для підвищення надійності вимірювань в режимі нормальної експлуатації судна викорис-

товуються математичні методи планування експерименту. Інформаційна технологія створення БОК передбачає наступні умови організації обчислювального комплексу:

1. Аналіз альтернатив, сценарій розвитку ситуації та прийняття рішень здійснюється в реальному масштабі часу на основі даних динамічних вимірювань, ММ і структурованої БЗ.

2. Алгоритм і програмне забезпечення реалізуються з урахуванням функціонування системи в реальному масштабі часу, виходячи з допустимого часу реакції.

3. БЗ в максимальному ступені пристосована до сприйняття фактичної інформації про поведінку судна на хвилюванні при безперервному зміні динаміки зовнішнього середовища.

Сформульовані положення і підхід визначають можливість здійснювати перетворення інформації про динаміку взаємодії судна із зовнішнім середовищем. Вибір і формулювання вирішальних правил і формування процедур аналізу та інтерпретації даних повинні враховувати особливості поведінки судна, як динамічної системи, під впливом зовнішніх випадкових збурень. В цьому випадку при описі предметної області доводиться враховувати особливості функціонування БОК і відобразити:

- поточний стан судна як складної динамічної системи;
- класи допустимих і екстремальних ситуацій об'єкта і зовнішнього середовища;
- закономірності функціонування об'єкта в рамках конкретного стану;
- управляючі впливи, що змінюють стан об'єкта.

Ідентичне відображення такої різноманітної кількісної та якісної інформації пов'язане з використанням інтегрованих моделей представлення знань з можливостями їх представлення на різних рівнях узагальнень. При цьому логічна структура визначає модель об'єкта управління, а продукційна – модель прийняття рішення щодо забезпечення морехідних якостей судна.

Розроблена на основі такого підходу формалізована БЗ представляє безліч взаємопов'язаних каналами передачі даних і логічними схемами програмних об'єктів, що імітують динаміку поведінки судна як складної системи. Процес імітації в реальному часі підтримується управляючою компонентою, що координує послідовність обробки модельних і тимчасових подій. При необхідності моделювання складних безперервних процесів додатково використовується система імітаційного моделювання, а інтеграція знань здійснюється на основі спеціально розроблених інтерфейсів.

Пропоновані затвердження дозволяють визнати можливим те, що використання виміральної діагностуючої інформації для підвищення достовірності оцінки морехідності поряд з високопродуктивною обчислювальною технікою для реалізації режиму реального часу, а також застосування методів штучного інтелекту, дозволить реалізацію таких структур моделей бортових обчислювальних комплексів (БОК), які зможуть забезпечити достовірний опис досліджуваних ситуацій та надійність прийняття практичних обґрунтованих рішень.

Наведені положення умовно можна віднести до одного з 3-х напрямків автоматизації контролю мореплавства – автоматизація вимірювань і розрахунків. Інтегровані комп'ютерні системи (ІКС), що відносяться до цього напрямку, найбільш повно відповідають цілям забезпечення морехідної безпеки судна, так як здатні ідентифікувати поточну ситуацію; моделювати інші ситуації, які виникнуть при зміні курсу і/або швидкості, баластного стану, погодних умов; виробляти рекомендації щодо оптимальних режимів руху.

На судні ІКС входять до складу автоматизованих комплексів судноводіння (АКС), що виконують різні функції судноводіння і контролю його безпеки та містять засоби інформаційної підтримки рішень судноводія щодо забезпечення мореплавства і безпеки судна в штормових умовах. Сучасні АКС називаються інтегрованими містками (ІБС – Integrated bridge systems).

В сучасних умовах АКС можуть бути частиною глобальних комп'ютерних систем, які дозво-

лять не тільки забезпечити морехідну безпеку судна, а й налагодити ефективний обмін даними між судном та берегом зі створенням єдиної інформаційної мережі, що пов'яже всіх учасників та всі елементи морської галузі, і автоматизує безліч процесів аж до судноводіння та формування наскрізних логістичних процесів.

Найбільш перспективні напрямки застосування глобальних комп'ютерних систем у цій сфері – це «е-навігація» та безекіпажне судноводіння, які є ключовими ініціативами Міжнародної морської організації (ІМО), що регламентує питання, які пов'язані з міжнародним торговим судноплаванням.

Поява терміна «е-Навігація» збігається з часом швидкого розвитку новітніх інформаційних технологій та технологій судноводіння, що ґрунтуються на використанні електронних технічних засобів (супутникові навігаційні системи, автоматичні ідентифікаційні системи, електронні картографічні системи, космічний зв'язок тощо). Впровадження цих технологій на морських судах докорінно змінило практику роботи судноводіїв і вимагало внесення змін до ідеології сучасної навігації, а також у більш широкому сенсі, судноплавання [2, с. 4].

В основі «е-Навігації» (концепції, що розроблена ІМО) лежить координація систем морської навігації та допоміжних берегових служб відповідно до потреб користувачів [3, с. 1]. В якості основ для виконання завдань, визначених користувачами, будуть використані три базові компоненти: судові системи, берегові системи та інфраструктура зв'язку.

– бортові навігаційні системи, що об'єднані в єдиний комплекс бортових датчиків і забезпечують необхідною інформацією користувача, а також єдину систему управління охоронними зонами та оповіщенням. Базовими елементами такої системи є електронні засоби позиціонування з високим рівнем інтеграції (електронне позиціонування), електронні навігаційні картки (ENC) та аналітична функція, що мінімізує вплив людського фактора та дозволяє знизити навантаження на моряка;

– система управління рухом суден та роботою відповідних берегових служб, що використовує схеми підтримки та координації комплексних даних, а також обмін ними у форматах зрозумілих для операторів берегових служб, що забезпечують безпеку та ефективність руху морських суден;

– інфраструктура, що забезпечує авторизовану пряму передачу інформації на борту корабля,

між кораблем і берегом, а також між береговими службами та іншими сторонами з усіма супутніми перевагами, включаючи мінімізацію ймовірності впливу людського фактора [4, с. 2].

Мета впровадження «е-навігації» – підвищення безпеки та ефективності мореплавання за рахунок [3, с. 4]:

- створення єдиного інформаційного середовища для суднових та берегових штурманів;
- обслуговування орієнтованої архітектури всіх систем;
- готовність всіх систем до використання нових сервісів «е-навігації» в міру їх появи.

Безсумнівно, що «е-навігація» підвищить рівень безпеки морського судноплавства за рахунок зниження кількості факторів ризику, що сприятиме запобіганню забруднення навколишнього середовища (наприклад, при зіткненнях кораблів та посадці на мілину) [3, с. 3]. Цілком імовірно, що е-навігація допоможе скоротити обсяг викидів вуглецю, сірки та азоту за допомогою вибору більш ефективного алгоритму прокладання маршруту та обслуговування судна, а також є можливість використовувати «е-навігацію» як фінансовий інструмент для розрахунку позовів про компенсацію збитків.

Ідея створення інтегрованої глобальної електронної системи морської навігації давно обговорювалася в рамках заходів, що проводяться зацікавленими організаціями: ІМО, Міжнародною асоціацією маячних служб

[5], Міжнародної гідрографічної організацією. Після обговорень було прийнято рішення взяти за основу концепцію системи автоматичного залежного спостереження (АЗН-В), що існує у цивільній авіації. Враховуючи положення цієї концепції Міжнародна морська організація розробила основні документи для практичного впровадження стратегії «е-навігації», а також проробила велику роботу з реалізації плану спільних дій для її застосування.

Наразі активні роботи з розвитку стандартів та технологій ведуться у Європейському союзі, де реалізуються науково-дослідні проекти в галузі «е-навігації»: *SafeSeaNet*, *Monalisa*, *Efficient Sea* та ін. Проекти сфокусовані на розробці концепції ефективності управління морським транспортом, на безпеці, на пошуково-рятувальних операціях, та на створенні тестових майданчиків «е-навігації» у Балтійському, Північному та Середземному морях.

В США, Австралії, Швеції, Норвегії, Канаді, Японії, Південній Кореї програми з розвитку

цифрової навігації та створення інфраструктури «е-навігації» виконуються структурами державних органів, які відповідають за забезпечення безпеки мореплавання.

Безекіпажне судноводіння – ще одна ініціатива ІМО, реалізація якої тісно пов'язана з «е-навігацією». Для автоматизації судноводіння необхідна розвинена інформаційна інфраструктура, щоб забезпечити системи навігації необхідною та своєчасною інформацією та надати безекіпажному судну можливість взаємодіяти з іншими учасниками судноплавства.

Зменшення чисельності екіпажу на суднах унаслідок автоматизації відбувається протягом кількох десятиліть внаслідок розвитку технологій і зниження впливу людського фактора. Зниження цього впливу досягається засобами підготовки, сертифікації та контролю дій екіпажу, що неминуче викликає збільшення витрат. Поява безекіпажних суден дозволить знизити експлуатаційні витрати, збільшити місткість суден та знизити вплив людського фактора на безпеку мореплавання. Можна з упевненістю прогнозувати, що впровадження безекіпажних технологій судноводіння (систем безперервного дистанційного управління судном) буде відбуватися послідовно, протягом десятиліть: від тимчасової відсутності екіпажу на вахті у нескладних умовах навігації до повної автоматизації процесу судноводіння у будь-яких умовах [6].

Сьогодні автоматизація судноводіння досягла такого рівня, коли при тривалих переходах у відкритому морі у хорошу погоду на вахті на навігаційному містку і в машинному відділенні може бути один член екіпажу. Для цього використовуються наявні на ринку системи напівавтоматичного керування судном типу *Track Control System*.

Тим не менш, поки необхідно, щоб на борту судна було кілька вахт та додатковий персонал. Це означає, що значна частина судна зайнята засобами забезпечення життєдіяльності та безпеки екіпажу, а витрати на екіпаж становлять значну частину експлуатаційних витрат.

Загальноприйнятих правил, що регулюють створення та експлуатацію безекіпажних суден не існує. Ринок безекіпажних суден, їх компонентів, умови обслуговування та експлуатації перебувають у стадії формування і на даний час особливе місце приділяється питанням нормативно-правової бази судноплавства, вирішити які необхідно для застосування безекіпажного судноводіння [7].

У світі розробляються численні проекти безекіпажних суден, наприклад, *MUNIN* у Європі,

англійська Rolls-Royce Autonomous Ship Research Project, проекти військово-морської спрямованості існують у США.

Проте найбільше значення має розробка технологій, що застосовуються саме до комерційного морського транспорту, тому що такі технологічні іновачії дозволять отримати пріоритет у створенні та застосуванні технологій безпекажного судноводіння цивільного призначення.

У якості першого кроку для створення технологій безпекажного судноводіння планується використання методів математичного комп'ютерного моделювання (рис. 2), орієнтованих на комплексне відпрацювання запропонованих рішень, а також на підготовку змін нормативно-правової основи на різних рівнях.

Очевидно, що проведення досліджень у цій галузі на реальних судах вкрай небезпечно і вимагатиме дуже тривалого часу внаслідок нестандартних екстремальних ситуацій, тому створення віртуального інформаційного середовища дозволить судноводіям та експертам безпечно та економічно ефективно відпрацьовувати технології безпекажного судноводіння, включаючи взаємодію зі звичайними суднами та навігаційною інфраструктурою.

Результати таких досліджень дадуть можливість оснащення розробленими технічними засобами суден та пілотної зони «е-навігації», де будуть проводитися фізичні випробування безпекажних суден.

**Висновки.** Проведений аналіз використання комп'ютерних технологій і систем в задачах

дослідження морехідних якостей суден показав, що використовуючи засоби і методи математичного моделювання поведінки судна в умовах безперервної зміни зовнішнього середовища можна обґрунтувати та сформулювати концепцію створення бортового обчислювального комплексу (БОК) із забезпечення безпеки мореплавання. У рамках сформульованої концепції БОК необхідно створити інструментальні та прикладні програмні засоби генерації вітрохвильових обурень, моделювання динаміки взаємодії судна із зовнішнім середовищем, наповнення та тестування бази знань бортової системи аналізу та прогнозу мореплавних якостей суден, що функціонує у реальному масштабі часу.

Використання нових методів обробки інформації пов'язано не лише інтелектуальними бортовими системами, а і з відповідною інфраструктурою берегових сервісів, супутникових систем, а також зміною законодавчої та нормативної основи. Найбільш перспективними напрямками застосування глобальних комп'ютерних систем у сфері динаміки взаємодії судна із зовнішнім середовищем – вважаються «е-навігація» та безпекажне судноводіння, які є одними з ключових напрямків розвитку інформаційних технологій у морській галузі. Успішна реалізація проектів у цих галузях відкриває судноплавним компаніям можливість випереджаючого застосування та комерціалізації нових технологій на світовому ринку і дає можливість підвищити ефективність та безпеку перевезень.

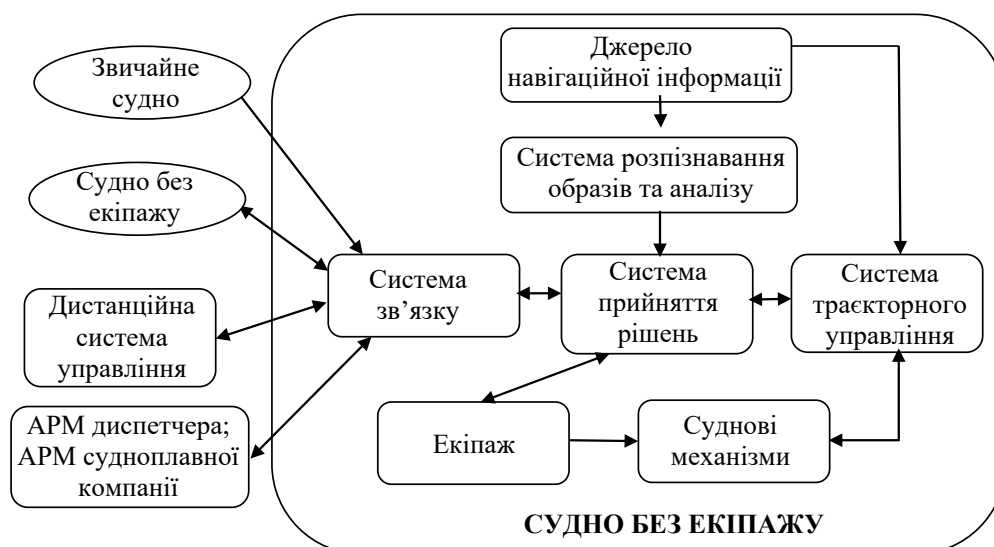


Рис. 2. Орієнтовний варіант принципової схеми систем управління безпекажного судна

АРМ – автоматизоване робоче місце

**Список літератури:**

1. Yahlytskyi Y.K., Kyrychenko K. V. Systemic issues of navigation safety. Proceedings of the I International scientific-practical conference «Current transport safety issues, in energy, infrastructure (STEI-2021)». pp. 170-172.
2. Вагущенко Л.Л. Современные информационные технологии в судовождении [Электронное учебное пособие]. Одесса: ОНМА, 2013. 135 с.
3. Patraiko D. Introducing the e-navigation revolution. Seaways. The Nautical Institute. March 2007. 5 p.
4. Гарнагин Ю. С. Базовые принципы, развитие и внедрение концепции e-Навигации [Электронный ресурс]. Государственный морской университет им. адм. Ф. Ф. Ушакова. – Режим доступа: <http://www.diktan.ru/docs/91/index-204623.html>.
5. International Association of Marine Aids to Navigation and Lighthouse Authorities [Электронный ресурс]. <https://www.iala-aism.org/>
6. Business Insurance, Underwriters get ready for crewless ships. Five-year timeframe for unmanned vessels Posted On: Feb. 14. 2016 12:01 AM CST by Donna Mahone.
7. European commission research and innovation DG Project No.: 314286 Ref: 314286-MUNIN-Final-Report-12-20151222-144137-CET.pdf.

**Yahlytskyi Yu.K., Kyrychenko K.V. MODERN COMPUTER TECHNOLOGIES AND SYSTEMS IN THE PROBLEMS OF RESEARCH OF SEA QUALITIES OF SHIPS**

*The current stage of development of shipbuilding and shipping is characterized by the creation of complex models of marine technology, which are increasingly difficult to manage and make the right decisions in dangerous situations. Analysis of ship accidents shows that a significant proportion of them is due to ignorance of the actual performance of navigation in stormy conditions, so the problem of ensuring the safety of navigation at all times remains relevant. The growing influence of the «man-ship» system in the operation of ships necessitates the need to take into account the increased safety requirements. Research on seaworthiness is based on the analysis of ship dynamics and requires the development of new approaches that provide reliable forecasting methods. This emphasizes the relevance of the problem of analysis and study of computer systems that determine the behavior of the ship in different situations using the methods of mathematical modeling. Modern capabilities of computer technology open up prospects for the widespread use of tools and methods of mathematical modeling of ship behavior in conditions of continuous change in the environment. On-board computing systems (OBCS), which are currently being developed in research design, and should provide automated support for maritime safety decision-making. Integrated OBCS is a system of intellectual support of the navigator, which is designed to determine the seaworthiness of the vessel in these conditions of navigation in the mode of movement used, and how to avoid loss of navigation. In modern conditions, integrated OBCS can be an integral part of global computer systems, the most promising areas of application of which are «e-navigation» and unmanned navigation, which are one of the key areas of information technology development in the maritime industry.*

*The present study is devoted to the study of the features of modern computer technologies and systems for the analysis and forecasting of seaworthiness of ships and innovative technologies of «e-navigation» and unmanned navigation.*

**Key words:** maritime safety, seaworthiness, computer complex, innovative computer technologies and systems, «e-navigation», unmanned navigation.

## ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.315.2.016.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/04>

### **Лободзинський В.Ю.**

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

### **Бурик М.П.**

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

### **Спінул Л.Ю.**

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

### **Чибеліс В.І.**

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

### **Ілліна О.О.**

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

## ІДЕНТИФІКАЦІЯ НЕСПРАВНОСТЕЙ СИСТЕМИ ЗАЗЕМЛЕННЯ ЕКРАНІВ ВИСОКОВОЛЬТНИХ КАБЕЛІВ НА ОСНОВІ АНАЛІЗУ СТРУМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

*Наукові задачі розрахунку перехідних процесів, що виникають в трифазних кабельних лініях електропередачі під час режимних та аварійних змінень пропускної потужності, відносяться до найбільш складних у сучасній електротехніці. Вони додатково ускладнюються при наявності міжфазних електромагнітних та ємнісних зв'язків. У статті аналізуються несправності перехресного з'єднання високовольтних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену напругою 330 кВ, а для моделювання використовується програмне забезпечення для електромагнітних перехідних процесів реалізованого за допомогою Matlab/Simulink. Результати моделювання підсумовують характеристики змін струму короткого замикання при різних пошкодженнях ізоляції кабелю. Чим довша кабельна лінія, тим струм короткого замикання буде більшим, а застосування транспозиції екранів може зменшити наведений струм. Програмне забезпечення для моделювання Matlab/Simulink використовується для створення імітаційної моделі перехідного електромагнітного процесу, яка може моделювати різні можливі несправності системи при струмах короткого замикання в екранах кабелів. Розрахунок та прогнозування перехідних електромагнітних процесів являє собою не просту задачу. Перехідні процеси, які протікають в багатофазних електричних колах, якими являються кабельні лінії електропередачі, потребують поглибленого дослідження. Крім того, ця задача є статичною, що потребує розгляду великої кількості варіантів, в яких змінюються різні фактори та їх сполучення. Розгляд таких задач та доведення їх до технічного рішення не завжди представляється можливим без використання сучасних обчислювальних засобів. Результати можуть забезпечити теоретичну основу для виявлення несправностей системи при використанні транспозиції екранів кабелю.*

*Дослідження у цій статті можуть забезпечити теоретичну основу виявлення пошкоджень екрану кабелю високої напруги. Зокрема, топологія побудованої моделі може бути використана в майбутньому для дослідження двофазних, трифазних та інших складних замикань у кабельній лінії електропередачі.*

**Ключові слова:** *перехідні процеси, комп'ютерне моделювання, трифазні електричні схеми, кабельна лінія, коротке замикання, взаємна індукція.*

**Постановка проблеми.** Завдяки особливій структурі високовольтний кабель з ізоляцією із зшитого поліетилену (СПЕ) має лише однофазний змінний струм, що протікає через його сердцевину, і змінне магнітне поле навколо нього буде створюватися великим струмом. Величина індукованої напруги пропорційна довжині кабелю. Чим довше кабель, тим вище індукована напруга на екрані. Надмірна індукована напруга загрожує безпечній експлуатації кабелю. Правилами експлуатації передбачено, що напруга захисного екрану не може перевищувати 50 В або 100 В і щоб індукована напруга на екрані кабелю не була занадто високою, екран кабелю повинен бути заземлений.

Важливим способом захисту високовольтних кабелів з ізоляцією із зшитого поліетилену є перехресне з'єднання металевих екранів – транспозиція, що зменшує індуковану напругу та циркулюючий струм оболонки, але цей метод заземлення створює великі труднощі для визначення виду несправності. Технологія он-лайн моніторингу використовує високовольтні датчики струму для постійного збору даних про струм заземлення високовольтних кабелів. Завдяки моніторингу струму, що протікає по екрану, потенційні несправності в високовольтних кабельних лініях можна виявити завчасно, ефективно уникаючи незапланованих відключень електроенергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Використання класичної теорії електротехніки і точних аналітичних методів розрахунку перехідних процесів для складних кіл стає все більш проблематичним. Відомі наближені аналітичні методи мають, як правило, обмежену придатність і не в змозі охопити широкий спектр завдань пов'язаних з дослідженням і аналізом електромагнітних перехідних процесів.

Найбільш перспективними для таких цілей дослідження і аналізу є методи, повністю орієнтовані на застосування комп'ютера, тобто універсальні по відношенню до типів елементів і складності електричних кіл, типу високовольтних кабельних ліній з отриманням зображень струмів і напруг для розрахунку і дослідження їх оригіналів [1].

При чисельному аналізі електромагнітних перехідних процесів в кабельних лініях, її основною математичною моделлю є диференціальні рівняння. Відомі загальні алгоритми формування цих рівнянь, які сумісні з багатьма чисельними методами та їх подальшими рішеннями [2].

Однак ці алгоритми досить складні (особливо при наявності в колі взаємоіндуктивних зв'язків),

вимагають виконання невиправдано громіздких математичних перетворень, додаткової логічної обробки вихідних даних і результату [3-5].

**Постановка завдання.** У цій роботі метод аналізу струму короткого замикання між жилою та екраном високовольтного кабелю використовується для розрізнення несправностей при застосуванні транспозиції екранів кабелю, що відрізняється від поточних методів виявлення несправностей. На основі аналізу циркулюючого струму в екрані ми використовуємо програму моделювання електромагнітних перехідних процесів *Matlab/Simulink* для моделювання та розрізнення несправностей при транспозиції екранів високовольтного кабелю на напругу 330 кВ. В роботі узагальнюються характеристики змін струму короткого замикання при різних пошкодженнях ізоляції між жилою та екраном кабелю, що забезпечує теоретичну основу для ідентифікації несправностей системи при струмах короткого замикання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** При розробленні математичної моделі для розрахунку струмів і напруг у струмоведучих жилах та електромагнітних екранах трифазних кабельних ліній однофазного виконання з СПЕ ізоляцією для нормальних і аварійних режимів роботи потрібно враховувати способи заземлення екранів кабелю. При заземленні екранів кабелю з двох сторін виникають струми індукції, що призводить до появи значних поздовжніх струмів, що супроводжуються втратами енергії, в свою чергу це призводить до зниження пропускної спроможності лінії. Найбільш дієвим способом обмеження поздовжніх струмів в екранах є транспозиція, що знижують струми до десятків ампер. При збільшенні довжини КЛ в вузлах транспозиції виникає збільшення діючого значення напруги, яка може перевищувати допустиму електричну міцність ізоляції, зниження якої досягається збільшенням кількості циклів транспозиції [6-8].

Електрична схема у вигляді еквівалентного багатополосника на рис. 1 з урахуванням взаємних індуктивних зв'язків, що існують між індуктивностями жил і екранів.

Ця модель дає можливість розглядати значення напруг і струмів на початку або в кінці лінії. Для аналізу розподілу напруги та струму вздовж лінії ліній розглядалася як ланцюговий еквівалентний контур. Описана модель є спрощеною, оскільки не враховує динамічні характеристики джерел енергії та навантажень. Однак, використовуючи зручний для користувача інтерфейс *Simulink*, відкрита



структура моделі дозволяє швидко змінювати її топологію та параметри блоків в залежності від конкретного завдання. Досліджена високовольтна лінія електропередач має живлення 330 кВ, з навантаженням, обраним з урахуванням номінального струму (750 А) в жилі кабелю, довжина лінії 3000 м. Параметри схеми лінії розраховані з урахуванням геометричних параметрів однофазного кабелю  $r_1=17.4$  мм,  $r_2=42.8$  мм,  $r_3=46.5$  мм,  $r_4=52.5$  мм [6]. Полноси екранів з'єднують за типом транспозиції.

Розглядається випадок несправності у першому вузлі транспозиції, коли через 0.017 с, після виходу системи в усталений режим, відбувається замикання між жилою кабелю фази А та екраном. Через 0.03 с від початку короткого замикання лінії, після нетривалого перехідного процесу, повертається в попередній усталений режим (рис. 2).

Як видно з рис. 2, а показані часові залежності струмів в фазах трифазної кабельної лінії при замиканні короткому замиканні між жилою та екраном кабелю. Струм фази А різко зростає, при цьому з'являється аперіодична складова. Стрибок струму фази А обумовлений дією напруги джерела і зміною запасу енергії магнітного поля в індуктивності, а також замиканню струму жили на землю через екран кабелю.

Підвищення струму в екрані в момент комутації (рис. 2, б), обумовлено зміною запасу енергії магнітного поля індуктивності жили і дією взаємодуції між жилою і екраном. В наслідок збільшення взаємної індукції жили фази А на екрані, ЕРС взаємодуції збільшується, і в тран-

спонованих екранах починають протікати індуквані струми порівнянні з струмами короткого замикання фази, що може призвести до перегріву струмоведучих частин та до термічного руйнування екрану. Коливання струмів непошкоджених фаз В, С викликано наведенням з боку пошкодженої фази А, що пояснюється наявністю взаємної індуктивності між фазами кабельної лінії електропередачі.

На рис. 2, в не спостерігаються великих стрибків струмів в момент комутації, так як весь струм короткого замикання з фази А через екран проходить у землю. В свою чергу амплітуда струму фази А в перший момент часу характеризується появою високочастотних коливань викликаних наявністю в колі безлічі  $RLC$ -контурів, що виникають при послідовному з'єднанні еквівалентних багатополосників. Коливання напруги виникають під час розряду ємностей поперечних віток схем заміщення ділянок кабельної лінії. Це пояснюється тим, що при короткому замиканні в пошкодженій фазі А залишається заряд, який рівномірно розподіляється уздовж фази в результаті перехідного коливального процесу, після загасання якого на фазі встановлюється потенціал (напруга залишкового заряду).

**Висновки.** У статті аналізується механізм генерації струму в жилах та екранах кабелю та взаємозв'язок між струмом заземлення екрану та струмом навантаження. Чим довша кабельна лінія, тим більше буде наведений струм у екрані, а використання транспозиції екранів кабелю може зменшити наведений струм. Програмне забезпе-

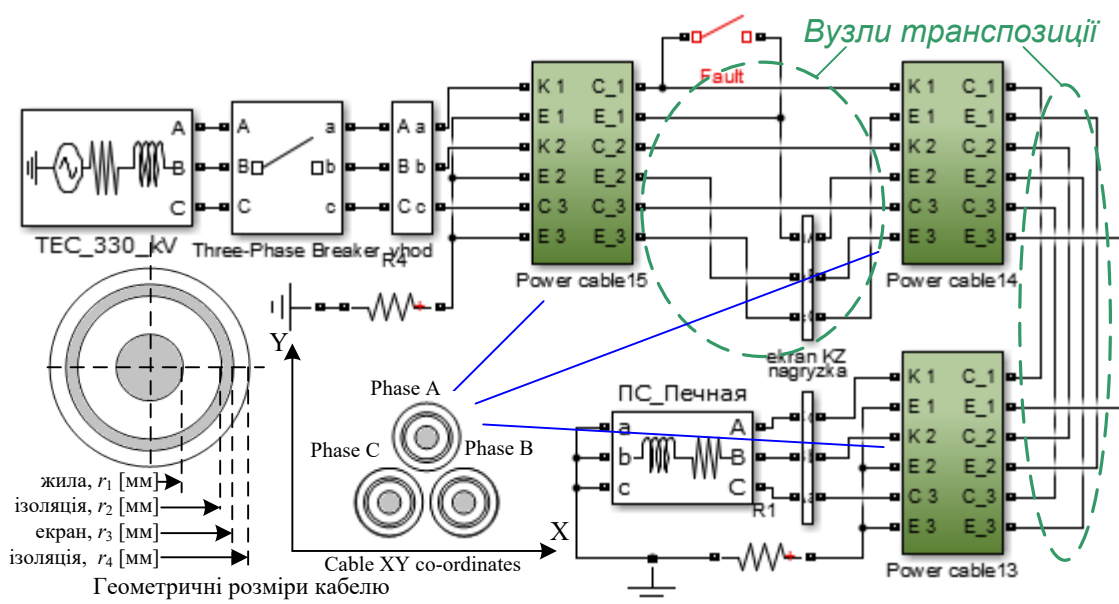
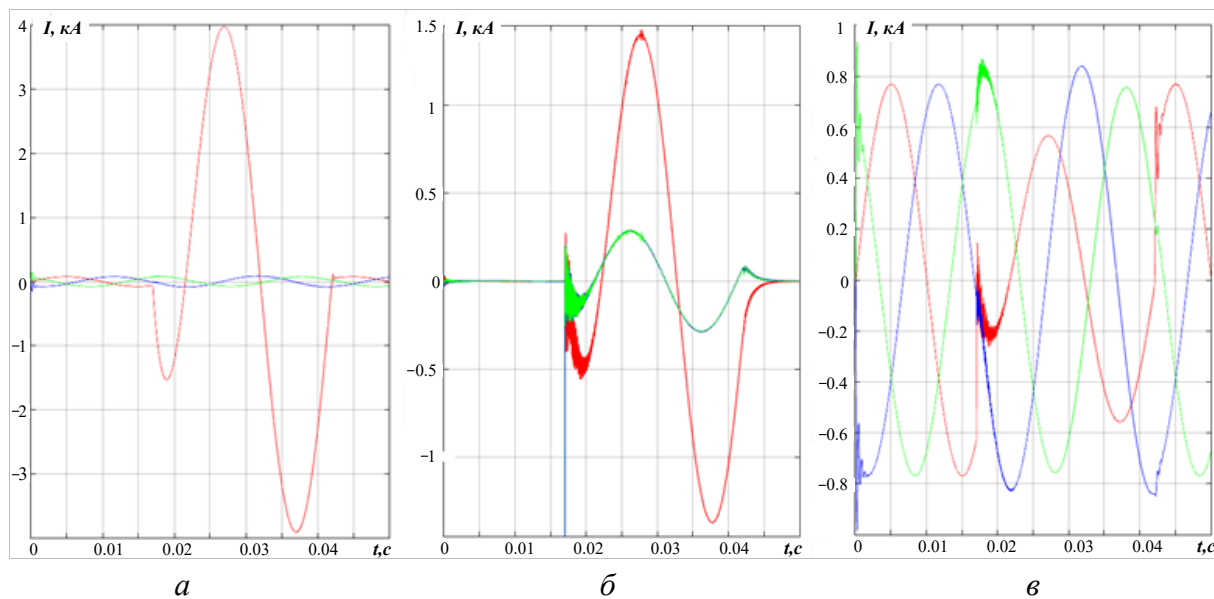


Рис. 1. Схема імітаційної моделі



**Рис. 2. Осцилограми струмів під час короткого замикання між жилою та екраном кабелю:**  
**а) струми в жилі кабелю на початку лінії; б) струми в екрані кабелю у першому вузлі транспозиції;**  
**в) струми в жилі кабелю на навантаженні**

чення для моделювання Matlab/Simulink використовується для створення імітаційної моделі електромагнітного перехідного процесу трифазної кабельної лінії, яка може моделювати різні можливі несправності системи.

Дослідження у цій статті можуть забезпечити теоретичну основу виявлення пошкоджень екрану кабелю високої напруги. Зокрема, топологія побудованої моделі може бути використана в майбут-

ньому для дослідження двофазних, трифазних та інших складних замикань у кабельній лінії електропередачі. Ця модель також дозволяє комплексно вивчати показання віртуальних приладів при включенні в модель паралельних вузлів і навантажень з динамічно змінними параметрами, що дозволяє здійснювати розрахунки різних режимів роботи енергосистеми даного типу на початкових етапах проектування.

#### Список літератури:

1. Jing Yang, XiaoLin Zhu, XiangDong, etal. On-line Monitoring and Diagnosis of HV Cable Faults Based on Sheath Current. *High Voltage Engineering*. 2016. vol.42,no.11. pp.3616-3625.
2. Xinggan Lang, Yuli Wang, Lei Zhang. Sheath overvoltage characteristics for single-phase ground fault in 220KV power cable. *Engineering Journal of Wuhan university*. 2013. vol.46,no.6. pp.747- 751.
3. Yanling Yuan, Hao Zhou, JieDong, etal. Sheath Current in HV Cable systems and Its on-line Monitoring for Cable Fault diagnosis. *High Voltage Engineering*. 2015. vol.41, no.4. pp.1194-1203.
4. Bangle He, YongHuang, TingYe,etal. Temperature prediction of power cable joint based on PSO-LSSVM predict mode. *Electric Power Engineering Technology*. 2019. vol.38,no.1. pp.37-41.
5. Lobodzinskiy Vadim, Chybelis Valeriy, Petruchenko Oleg, etal. Features of Transient Research in Three-Phase High-Voltage Power Transmission Cable Lines. 2021. *Grail of Science*. № 6. pp. 132-145.
6. Lobodzinskiy V. Transient Analysis in Three-Phase Cable Lines with the Transposition Phase Cables Conductive Screens During Short Circuit Fault. IEEE 3rd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON). 2021. p. 413-416.
7. MathWorks. Three-phase AC power cable. URL: <https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/ref/accablethreephase.html> дата звернення: 30.03.2022 р.)
8. Schött-Szymczak A., Walczak K. Analysis of overvoltages appearing in one-sidedly ungrounded MV power cable screen. Poznan University of Technology, Poznan, Poland, 2020.

**Lobodzinskiy V.Yu., Buryk M.P., Spinul L.Yu., Chybelis V.I., Illina O.O. Fault Identification of High-voltage Cable Shield Grounding System Based on Short Circuit Current analysis**

*Scientific problems of calculation of transients occurring in three-phase cable transmission lines during conditional and emergency changes in throughput are among the most complex in modern electrical engineering. They are further complicated by the presence of interfacial electromagnetic and capacitive connections. The article analyzes the cross-connection faults of high-voltage XLPE 330 kV cables, and Matlab/Simulink software for electromagnetic transients is used for modeling. The simulation results summarize the characteristics of changes in short-circuit current with different damage to the cable insulation. The longer the cable line, the greater the short-circuit current, and the use of screen transposition can reduce the induced current. Matlab/Simulink simulation software is used to create a simulation model of the transient electromagnetic process, which can simulate various possible system faults with short-circuit currents in cable screens. Calculation and prediction of transient electromagnetic processes is not an easy task. Transients that occur in multiphase electrical circuits, which are cable transmission lines, require in-depth study. In addition, this problem is static, which requires consideration of a large number of options in which different factors and their combinations change. Consideration of such problems and bringing them to a technical solution is not always possible without the use of modern computing tools. The results can provide a theoretical basis for detecting system faults when using cable shield transposition.*

*The research in this article can provide a theoretical basis for detecting high-voltage cable shield damage. In particular, the topology of the constructed model can be used in the future to study two-phase, three-phase and other complex short circuits in the cable transmission line.*

**Key words:** *transients, computer modeling, three-phase electrical circuits, cable line, short circuit, mutual induction.*

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.391

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/05>

**Артюхов В.Г.**

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

**Бритов О.А.**

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

**Гіоргізова-Гай В.Ш.**

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

**Кірюша Б.А.**

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

**Стіканов В.Ю.**

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

## РОЗРАХУНОК І МОДЕЛЮВАННЯ НЕРЕКУРСИВНИХ ЦИФРОВИХ ФІЛЬТРІВ В АНАЛОГО-ЦИФРОВОМУ СХЕМОТЕХНІЧНОМУ СИМУЛЯТОРІ

У статті розглянута задача розрахунку коефіцієнтів цифрових фільтрів з імпульсною характеристикою скінченної тривалістю (СІХ фільтрів) в середовищі схемотехнічного симулятора. Аналіз методів розв'язання такої задачі, з одного боку, і можливостей популярного схемотехнічного симулятора Micro-Cap, з іншого, приводить до висновку про те, що придатним для реалізації методом є метод розкладання в ряд Фур'є, відомий також як метод вікон. Результатом застосування цього методу є розрахункові формули для відліків імпульсної характеристики шуканого фільтра, які легко реалізуються в середовищі схемотехнічного симулятора Micro-Cap. Ідея метода полягає в розкладанні заданої періодичної частотної характеристики в ряд Фур'є, коефіцієнти якого і є відліками імпульсної характеристики фільтра, що проектується. Для зменшення пульсацій амплітудно-частотної характеристики, обумовлених явищем Гіббса отримана імпульсна характеристика модифікується множенням на функцію вікна.

Наведено детальний опис процедури виведення розрахункових формул для чотирьох типів частотно-селективних фільтрів: фільтрів низьких частот, фільтрів високих частот, смугових та режекторних фільтрів. Бажані частотні характеристики для цих фільтрів задані у вигляді дійсних прямокутних дзеркально симетричних функцій частоти. Отримані розрахункові формули наведені в двох таблицях.

Додатково розглянуто розрахунок цифрових диференціаторів та перетворювачів Гільберта. Розрахункові формули зведені в ще дві таблиці.

Реалізація метода рядів Фур'є в середовищі симулятора Micro-Cap продемонстрована на двох прикладах розрахунку диференціатора і перетворювача Гільберта. Для оцінки результатів розрахунків виконано частотний аналіз. Наведено графіки амплітудно-частотних, фазо-частотних характеристик та характеристик групової затримки. Робота фільтрів в часовій області продемонстрована шляхом моделювання реакції диференціатора на імпульсний вхідний сигнал та перетворювача Гільберта на синусоїдальний вхідний сигнал. Наведено графіки вхідних і вихідних сигналів.

**Ключові слова:** проектування цифрових фільтрів, ряд Фур'є, частотні характеристики, скінченна імпульсна характеристика, цифровий диференціатор, перетворювач Гільберта, моделювання.

**Вступ.**

Гібридний аналого-цифровий симулятор Micro-Cap [1, с. 5] користується широкою популярністю серед інженерів-розробників електронних систем. Це пояснюється наявністю простого графічного інтерфейсу, поєданого з можливістю текстового опису гібридних схем на мові SPICE, великим обсягом бібліотек моделей та набором різноманітних інструментів аналізу і проектування. Важливим фактором популярності пакету є також те, що, починаючи з останньої, дванадцятої, версії, пакет розповсюджується безкоштовно, що робить його доступним для будь-кого з тих, хто займається розробкою електронних схем.

Сучасні електронні системи обробки сигналів все частіше реалізуються в цифровій формі. Важливою стає задача проектування цифрових фільтрів (ЦФ) по вимогам до амплітудно-частотної характеристики. Ряд пакетів для наукових і інженерних розрахунків надають засоби для розв'язання такої задачі. Часто це досить об'ємні або коштовні пакети. Тому корисною виявляється ідея розробки методів проектування ЦФ в рамках пакету схемо технічного стимулятора, що дозволить об'єднати в одному пакеті проектування і моделювання аналогових і цифрових систем.

Для реалізації такої ідеї необхідно вирішити дві задачі: обрати стимулятор, який надає можливості для реалізації методів проектування ЦФ, і обрати або розробити методи проектування, які можна реалізувати в середовищі обраного пакету.

В роботі [2] було показано, як цифрові фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (НІХ) можна ефективно проектувати та моделювати в програмі Micro-Cap, хоча вона не містить модулів проектування НІХ фільтрів. Інструменти, запропоновані Micro-Cap, дозволяють моделювати змішані аналогово-цифрові схеми. Усі етапи процедури проектування НІХ ЦФ від формулювання вимог до аналізу частотної характеристики та моделювання у часовій області можуть бути сформульовані та виконані в середовищі Micro-Cap з використанням вбудованих методів аналізу. Моделювання структур цифрових фільтрів полегшується з використанням механізму макросів.

НІХ фільтри популярні в цифровій обробці сигналів, але вони не покривають усіх потреб обробки сигналів. Основним обмеженням їх використання є їх істотна нелінійна фазова характеристика. Фільтри Бесселя, які призначені для наближення лінійної фазової характеристики,

забезпечують досить погану амплітудну характеристику і погано підходять для частотно-селективних використань.

Крім того, реалізація НІХ фільтрів, особливо з обмеженою довжиною слова, пов'язана з ризиком втрати стійкості, що призводить до виходу за межі розрядної сітки сигналу, тобто великих спотворень, або до коливань граничного циклу, які мають відносно низький рівень, але не відповідають характеру сигналу і спотворюють вихідний сигнал.

Лінійна фазова характеристика є критичною для багатьох застосувань в автоматичному управлінні, акустиці, обробці звуку та інших. І єдиний тип фільтрів, який забезпечує таку характеристику, – це СІХ фільтри.

Тому дуже бажано розширити функціональність Micro-Cap шляхом впровадження процедури проектування СІХ фільтрів у цьому середовищі.

**Виведення розрахункових формул.**

Різницева рівняння КІХ-фільтрів пов'язує вихідний сигнал з вхідним і виглядає наступним чином:

$$y(n) = \sum_{i=0}^{N-1} A_i x(n-i)$$

де  $x(n-i)$  – вибірки вхідного сигналу в поточний та попередній моменти часу,  $y(n)$  – вихідний сигнал в поточний момент часу,  $A_i$  – коефіцієнти фільтра (константи),  $N$  – довжина фільтра.

Метою першого етапу проектування фільтра є обчислення коефіцієнтів  $A_i$  на основі бажаних параметрів амплітудної характеристики. Набір параметрів включає:

- гранична частота смуги пропускання  $f_p$  для фільтрів НЧ і ВЧ або дві граничні частоти  $f_{p1}$ ,  $f_{p2}$  для смуг пропускання смугового і режекторного фільтрів;

- гранична частота смуги затримки  $f_a$  для фільтрів НЧ і ВЧ або дві граничні частоти  $f_{a1}$ ,  $f_{a2}$  для смуг затримки смугових і режекторних фільтрів;

- пульсація АЧХ в смузі (смугах) пропускання  $A_p$  в дБ;

- гарантоване придушення в смузі (смугах) затримки  $A_a$  в дБ;

- частота дискретизації  $F_s$ .

Цей етап називають апроксимацією, тому що коефіцієнти фільтра обчислюються так, щоб АЧХ результуючого фільтра наближалась до заданої форми. Відхилення від заданої форми характеризується параметрами, переліченими вище.

В найбільш повному і математично суворому вигляді задача апроксимації вирішується мето-

дом рівнохвильової (мінімаксної) апроксимації за Чебишевим. Для обчислення коефіцієнтів апроксимації використовується відомий алгоритм Ремеза [3, с. 145]. Програмна реалізація такого алгоритму досить складна. Рішення шукається ітераційно. В деяких випадках алгоритм не збігається, тобто отримати рішення не вдається. По цим двом причинам для рішення нашої проблеми такий алгоритм не підходить.

Нам потрібен метод, який забезпечує обчислення коефіцієнтів по замкненим аналітичним формулам, бажано найпростішим. Таким методом може бути метод розкладання в ряд Фур'є [3, с. 103, 4, с. 5176 5, с. 175]. Використання цього методу обґрунтовується такими фактами:

1) частотна характеристика фільтра пов'язана за імпульсною характеристикою перетворенням Фур'є;

2) відліки імпульсної характеристики фільтра співпадають зі значеннями коефіцієнтів різницевого рівняння  $A_i$ ;

3) частотна характеристика цифрового фільтра є періодичною функцією частоти з періодом  $F_s$ , що дозволяє розкласти її в ряд Фур'є.

Коефіцієнти розкладання в ряд Фур'є бажаної частотної характеристики  $H_r(f)$  в загальному вигляді обчислюються за формулою:

$$C_i = \frac{1}{F_s} \int_{-\frac{F_s}{2}}^{\frac{F_s}{2}} H_r(f) e^{j2\pi i \frac{f}{F_s}} df \quad (1)$$

В якості бажаної функції для частотно-селективних фільтрів, як правило, використовується дійсна прямокутна функція. Оскільки для обчислення коефіцієнтів ряду достатньо визначити функцію лише на одному періоді від  $-F_s/2$  до  $F_s/2$ , цю функцію можна представити у вигляді:

$$H_r(f) = \begin{cases} 1, & -f_p \leq f \leq f_p \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases} \quad \text{— для фільтрів НЧ;}$$

$$H_r(f) = \begin{cases} 1, & -\frac{F_s}{2} \leq f \leq -\frac{F_s}{2} + f_p \\ 1, & f_p \leq f \leq \frac{F_s}{2} \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases} \quad \text{— для фільтрів ВЧ;}$$

$$H_r(f) = \begin{cases} 1, & -f_{p2} \leq f \leq -f_{p1} \\ 1, & f_{p1} \leq f \leq f_{p2} \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases} \quad \text{— для смугових фільтрів}$$

$$H_r(f) = \begin{cases} 1, & -\frac{F_s}{2} \leq f \leq -\frac{F_s}{2} + f_{p2} \\ 1, & -f_{p1} \leq f \leq f_{p1} \\ 1, & f_{p2} \leq f \leq \frac{F_s}{2} \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases} \quad \text{— для режек-$$

торних фільтрів

Для забезпечення лінійної фазо-частотної характеристики імпульсна характеристика має бути дзеркально симетричною відносно її середини. Завдяки цьому достатньо обчислити лише половину коефіцієнтів Фур'є.

З урахуванням дзеркальної симетрії частотно-селективних характеристик, наведених вище, формула для обчислення коефіцієнтів фільтра спрощується до

$$C_i = \frac{2}{F_s} \int_{-\frac{F_s}{2}}^{\frac{F_s}{2}} H_r(f) \cos\left(2\pi i \frac{f}{F_s}\right) df$$

Отримана імпульсна характеристика не може бути реалізована СІХ-фільтром через нескінченну довжину. Тому його необхідно обрізати, використовуючи деяке вікно зважування, щоб мінімізувати явища Гіббса [3-6]. Але цього недостатньо, тому що розрахована імпульсна характеристика симетрична відносно часу початку і не дорівнює нулю при негативних значеннях часу. Це означає, що такий фільтр не є причинним і не може бути реалізований. Для вирішення цієї проблеми імпульсна характеристика затримується в часі на довжину фільтра, поділену на 2. В результаті отриманий фільтр має точно лінійну фазову характеристику.

Отримані описаним способом формули для коефіцієнтів Фур'є частотно-селективних СІХ фільтрів наведені в таблицях 1 і 2.

Відносно фільтрів парної довжини слід зауважити, що такі фільтри насправді не можуть реалізувати характеристики типів ВЧ і РЖ [3, с. 95]. Хоча в таблиці 2 наведені формули для цих фільтрів, вони не є чисто ВЧ і РЖ фільтрами внаслідок наявності нуля на частоті Найквіста, який обумовлений властивостями АЧХ фільтрів парної довжини з дзеркальною симетрією імпульсної характеристики.

Імпульсна характеристика формується з коефіцієнтів Фур'є шляхом їх дзеркального відображення відносно першого коефіцієнта  $C_0$ . Цей процес можна описати наступними формулами:

— для фільтрів непарної довжини

$$h(i) = h(N-1-i) = C_{\frac{N-1}{2}-i}, \quad i = 0 \dots \frac{N-1}{2};$$

Таблиця 1

**Формули розрахунку коефіцієнтів Фур'є  
для частотно-селективних СІХ фільтрів непарної довжини**

Тип АЧХ	Формули
НЧ	$C_0 = 2 \frac{f_p}{F_s}; C_i = \frac{1}{\pi i} \sin\left(2\pi i \frac{f_p}{F_s}\right), i = 1 \dots (N-1)/2$
ВЧ	$C_0 = 1 - 2 \frac{f_p}{F_s}; C_i = -\frac{1}{\pi i} \sin\left(2\pi i \frac{f_p}{F_s}\right), i = 1 \dots (N-1)/2$
СМ	$C_0 = 2 \frac{f_{p2} - f_{p1}}{F_s}; C_i = \frac{1}{\pi i} \left[ \sin\left(2\pi i \frac{f_{p2}}{F_s}\right) - \sin\left(2\pi i \frac{f_{p1}}{F_s}\right) \right],$ $i = 1 \dots (N-1)/2$
РЖ	$C_0 = 1 - 2 \frac{f_{p2} - f_{p1}}{F_s};$ $C_i = -\frac{1}{\pi i} \left[ \sin\left(2\pi i \frac{f_{p2}}{F_s}\right) - \sin\left(2\pi i \frac{f_{p1}}{F_s}\right) \right],$ $i = 1 \dots (N-1)/2$

Таблиця 2

**Формули розрахунку коефіцієнтів Фур'є  
для частотно-селективних СІХ фільтрів парної довжини**

Тип АЧХ	Формули
НЧ	$C_i = \frac{1}{\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)} \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_p}{F_s}\right) \quad i = 0 \dots N/2 - 1$
ВЧ	$C_i = \frac{1}{\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)} \left[ \sin\left(\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)\right) - \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_p}{F_s}\right) \right]$ $i = 0 \dots N/2 - 1$
СМ	$C_i = \frac{1}{\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)} \left[ \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p2}}{F_s}\right) - \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p1}}{F_s}\right) \right]$ $i = 0 \dots N/2 - 1$
РЖ	$C_i = \frac{1}{\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)i} \left[ \sin\left(\pi\left(i + \frac{1}{2}\right)\right) - \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p2}}{F_s}\right) + \sin\left(2\pi\left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p1}}{F_s}\right) \right]$ $i = 0 \dots N/2 - 1$

– для фільтрів парної довжини

$$h(i) = h\left(\frac{N}{2} - 1 - i\right) = C_{\frac{N}{2} - i}, \quad i = 0 \dots \frac{N}{2} - 1.$$

Метод проектування СІХ фільтрів розкладанням в ряд Фур'є може бути також застосований

і до фільтрів, які не є частотно-селективними. Наприклад, це можуть бути цифрові диференціатори та перетворювачі Гільберта.

Цифровий диференціатор має лінійну АЧХ з фазовим зсувом  $\pi/2$  в смузі пропускання. Його

комплексна частотна характеристика і може бути описана уявною функцією:

$$H_r(f) = \begin{cases} j2f, & -f_p \leq f \leq f_p \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases}$$

Комплексна частотна характеристика перетворювача Гільберта, який забезпечує фазовий зсув вхідного сигналу на  $\pi/2$  при незмінній амплітуді в заданій смузі частот, можна описати як:

$$H_r(f) = \begin{cases} j, & -f_{p2} \leq f \leq -f_{p1} \\ -j, & f_{p1} \leq f \leq f_{p2} \\ 0 & \text{для інших } f \end{cases}$$

Реалізація таких фільтрів можлива при центральній симетрії імпульсної характеристики відносно середини імпульсної характеристики. Імпульсна характеристика при цьому пов'язана з коефіцієнтами Фур'є, отриманими з (1) для невід'ємних  $i$ , співвідношеннями:

- для фільтрів непарної довжини  
 $-h(i) = h(N-1-i) = C_{\frac{N-1}{2}-i}, i = 0 \dots \frac{N-1}{2};$
- для фільтрів парної довжини  
 $-h(i) = h\left(\frac{N}{2}-1-i\right) = C_{\frac{N}{2}-1-i}, i = 0 \dots \frac{N}{2}-1.$

Отримані формули для коефіцієнтів Фур'є наведені в таблицях 3 і 4.

Як і у випадку частотно-селективних фільтрів, при необхідності нерівномірність АЧХ може бути згладжена за допомогою вікон [3, с. 106, 6]. Короткий опис деяких популярних вікон можна знайти в [7].

**Реалізація метода в середовищі Micro-Cap.**

Реалізацію розрахункових формул, наведених в попередньому розділі, розглянемо на прикладах.

Таблиця 3

**Формули розрахунку коефіцієнтів Фур'є для диференціаторів і перетворювачів Гільберта непарної довжини**

Тип частотної характеристики	Формули
Диференціатор	$C_0 = 0; C_i = \frac{1}{(\pi i)^2} \left( 2\pi i \frac{f_p}{F_s} \cos\left(2\pi i \frac{f_p}{F_s}\right) - \sin\left(2\pi i \frac{f_p}{F_s}\right) \right),$ $i = 1 \dots (N-1)/2$
Перетворювач Гільберта	$C_0 = 0; C_i = \frac{1}{\pi i} \left( \cos\left(2\pi i \frac{f_{p1}}{F_s}\right) - \cos\left(2\pi i \frac{f_{p2}}{F_s}\right) \right),$ $i = 1 \dots (N-1)/2$

Таблиця 4

**Формули розрахунку коефіцієнтів Фур'є для диференціаторів і перетворювачів Гільберта парної довжини**

Тип частотної характеристики	Формули
Диференціатор	$C_i = \frac{2\pi \left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_p}{F_s} \cos\left(2\pi \left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_p}{F_s}\right) - \sin\left(2\pi \left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_p}{F_s}\right)}{\left(\pi \left(i + \frac{1}{2}\right)\right)^2}$ $i = 0 \dots N/2 - 1$
Перетворювач Гільберта	$C_i = \frac{\cos\left(2\pi \left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p1}}{F_s}\right) - \cos\left(2\pi \left(i + \frac{1}{2}\right) \frac{f_{p2}}{F_s}\right)}{\pi \left(i + \frac{1}{2}\right)},$ $i = 0 \dots N/2 - 1$



**Приклад 1.**

Спроекувати цифровий диференціатор для обробки сигналів в області частот від 0 до 3000Гц при частоті дискретизації 8000 Гц, довжина фільтра N=31.

В Мікро-Сар розрахунки по формулам реалізуються директивою .define [1, с. 143].

Задаємо довжину фільтра:

```
.define N 31
```

В нашому прикладі для розрахунку коефіцієнтів Фур'є потрібно записати 16 директив з формулами Таблиці 3:

```
.define C0 0
.define C1 (sin(2*pi*1*fc/Fs)-2*pi*1*fc/
Fs*cos(2*pi*1*fc/Fs))/(pi*1)^2
.define C2 (sin(2*pi*2*fc/Fs)-2*pi*2*fc/
Fs*cos(2*pi*2*fc/Fs))/(pi*2)^2
...
.define C15 (sin(2*pi*15*fc/Fs)-2*pi*15*fc/
Fs*cos(2*pi*15*fc/Fs))/(pi*15)^2
```

Для зменшення пульсацій АЧХ використаємо вікно Хемінга [3, с. 107, 6, с. 149]:

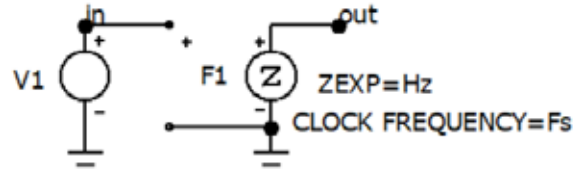
```
.define w0 1
.define w1 0.54+0.46*cos(2*pi*1/(N-1))
.define w2 0.54+0.46*cos(2*pi*2/(N-1))
...
.define w15 0.54+0.46*cos(2*pi*15/(N-1))
```

Нарешті, для коефіцієнтів різницевого рівняння формуємо наступні директиви:

```
.define A15 C0*w0
.define A16 C1*w1
.define A17 C2*w2
...
.define A30 C15*w15

.define A0 -A30
.define A1 -A29
.define A2 -A28
...
.define A14 -A16
```

Найпростіша модель цифрового фільтра являє собою кероване джерело з заданою передатною функцією [1, с. 218]. Схема для дослідження фільтра виглядає так:



Параметром джерела є передатна функція, яка для розрахованого фільтра задається наступним чином:

```
.define Hz A0+A1*z^-1+A2*z^-2+A3*z^-3+A4*z^-4+A5*z^-5+A6*z^-6+A7*z^-7+A8*z^-8+A9*z^-9+A10*z^-10+A11*z^-11+A12*z^-12+A13*z^-13+A14*z^-14+A15*z^-15+A16*z^-16+A17*z^-17+A18*z^-18+A19*z^-19+A20*z^-20+A21*z^-21+A22*z^-22+A23*z^-23+A24*z^-24+A25*z^-25+A26*z^-26+A27*z^-27+A28*z^-28+A29*z^-29+A30*z^-30
```

Для аналізу в частотній області джерело вхідного сигналу повинно бути налаштоване на генерацію синусоїдального сигналу. Тобто параметр джерела VALUE може бути заданий у вигляді [1, с. 199]:

```
DC 0 AC 1 0 Sin 0 1 1k 0 0 0
```

В результаті частотного аналізу отримуємо характеристики, наведені на рисунках 1 і 2.

Роботу фільтра продемонструємо на прикладі обробки імпульсного сигналу. Для цього джерело вхідного сигналу має бути переналаштоване відповідно до параметрів цього сигналу [1, с. 198]:

```
DC 0 PULSE 0 1 0.5ms 1ms 2ms 4ms 12ms
```

Гоафіки вхідного і вихідного сигналів наведені на Рисунку 3.

**Приклад 2.**

Спроекувати, побудувати і дослідити модель цифрового перетворювача Гільберта для обробки сигналів в діапазоні частот від fp1=1 КГц до fp2=3 КГц при частоті дискретизації Fs=8 КГц, довжина фільтра N=31.

Схема для реалізації перетворювача Гільберта буди відрізнятися від схеми диференціатора, розглянутого в першому прикладі, лише директивами обчислення коефіцієнтів Фур'є (Таблиця 3):

```
.define C0 0
.define C1 (cos(2*pi*1*fp1/Fs)-
cos(2*pi*1*fp2/Fs))/(pi*1)
.define C2 (cos(2*pi*2*fp1/Fs)-
cos(2*pi*2*fp2/Fs))/(pi*2)
```

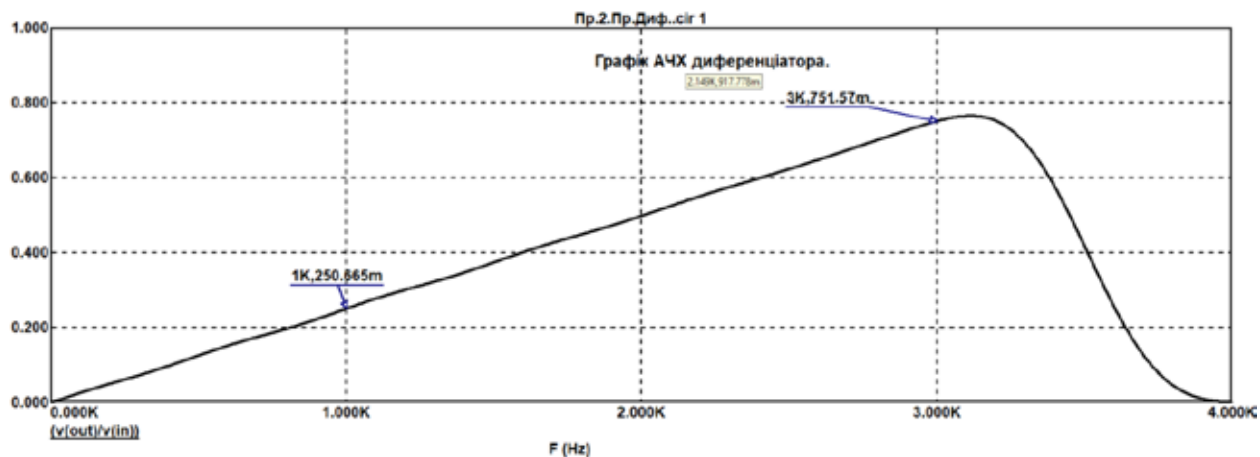


Рис. 1. Амплітудно-частотна характеристики диференціатора

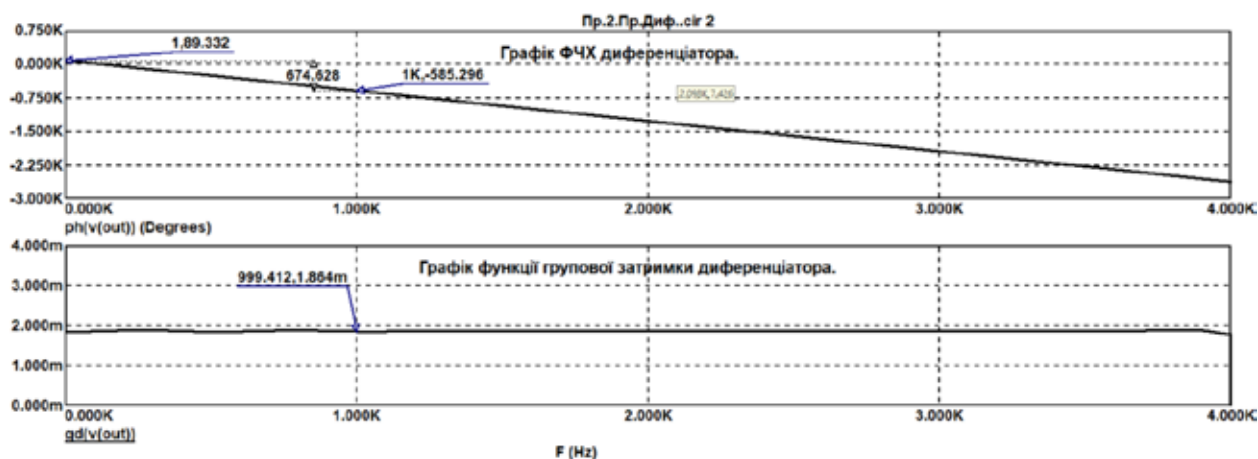


Рис. 2. Фазо-частотна характеристика (верхній графік) та характеристика групової затримки диференціатора

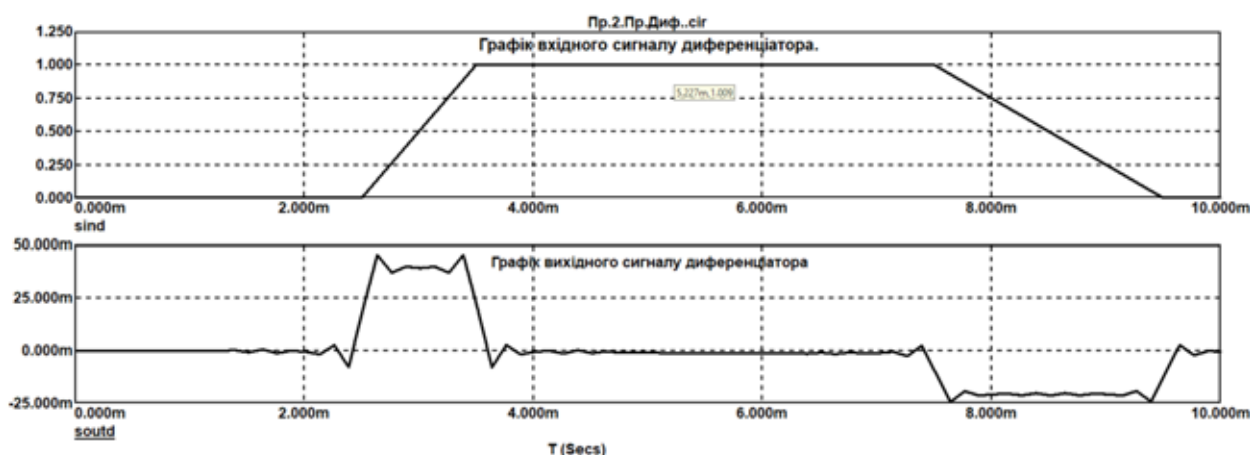


Рис. 3. Вхідний і вихідний сигнали диференціатора в часовій області

...  
 .define C15 (cos(2\*pi\*15\*fp1/Fs) -  
 cos(2\*pi\*15\*fp2/Fs))/(pi\*15)

Частотні характеристики розрахованого фільтру наведені на Рисунках 4 і 5.

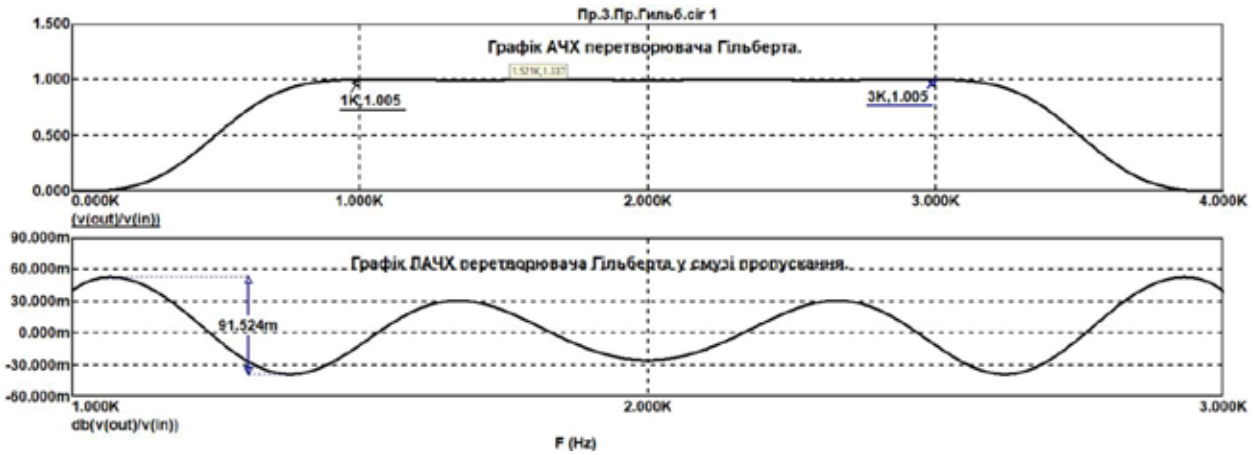


Рис. 4. Амплітудно-частотна характеристика перетворювача Гільберта (на верхньому графіку загальна, на нижньому в смузі пропускання в логарифмічному масштабі)

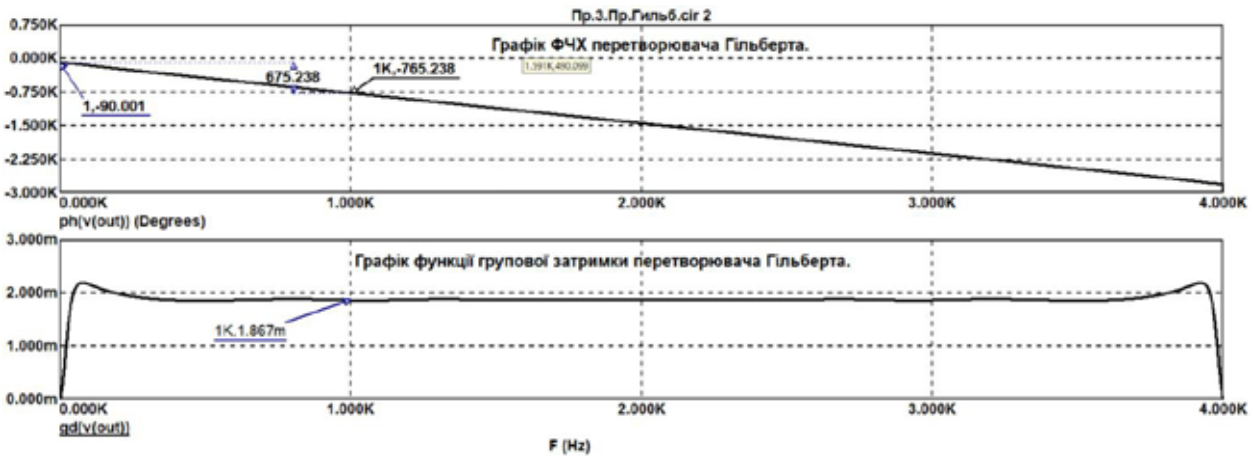


Рис. 5. Фазо-частотна характеристика і характеристика групової затримки перетворювача Гільберта

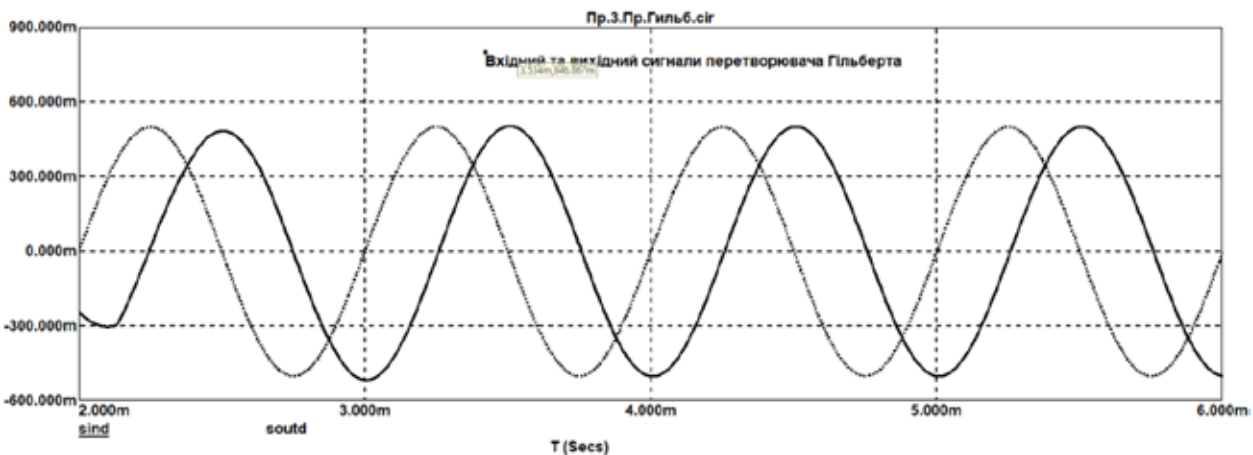


Рис. 6. Вхідний і вихідний сигнали перетворювача Гільберта

Моделювання в часовій області виконувалось при подаванні на вхід синусоїдального сигналу частотою 1 КГц. Графіки вхідного і вихідного сигналів перетворювача наведені на Рисунку 6. При

відображенні вихідного осигналу була скомпенсована групова затримка фільтра. Завдяки цьому ми можемо чітко бачити фазовий зсув сигналу на 90 градусів.

### Висновки.

Метод проектування СІХ фільтрів на основі рядів Фур'є надає проектувальникам аналого-цифрових систем можливість включити такі фільтри до переліку засобів, які надаються популярним безкоштовним схемотехнічним симулятором. Таким чином відпадає необхідність залучення до процесу проектування додаткових програм, деякі з яких можуть коштувати досить дорого.

Нажаль, цей метод не дає змоги обчислювати довжину фільтра, необхідну для реалізації заданих вимог до АЧХ. Тому звичайно для

отримання потрібного результату необхідно виконати кілька ітерацій зі зміною довжини фільтра або типу вікна. Оскільки мова йде про апаратну реалізацію, довжина фільтра в багатьох випадках диктується не стільки вимогами до АЧХ, скільки обмеженнями на об'єм апаратури і час обробки відліків сигналу. В таких системах довжина фільтра фіксована і не може змінюватись в процесі роботи, зміна характеристик фільтра виконується за рахунок перерахунку коефіцієнтів при незмінній довжині фільтра.

### Список літератури:

1. М.А. Амелина, С.А. Амелин. Программа схемотехнического моделирования Micro-Cap. Версии 9,10. Смоленск, Смоленский филиал НИУ МЭИ, 2012, 617 с.
2. V. Artuhov, O. Brytov, "Digital Filter Design by Micro-Cap Tools", IEEE 35th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO), April 21-24, 2015, Kyiv, Ukraine, pp.310-313.
3. Рабинер Л., Гоулд Б. Теория и применения цифровой обработки сигналов. М.:Мир, 1978, 848 с.
4. Alan V. Oppenheim, Ronald W. Shafer, Discrete-Time Signal Processing, 3rd ed. Pearson, 2010, 1055 p.
5. Richard.G. Lyons, Understanding Digital Signal Processing, 2nd ed. Pearson Education, Inc., 2004, 517 p.
6. К.М.М. Prabhu, Windows Functions and their Applications in Digital Signal Processing, CRC Press Taylor & Francis Group, 2014, 382 p.
7. V. Artuhov, O. Brytov, "FIR Filter Design by Micro-Cap Tools", 2019 IEEE 39th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO) Conference Proceedings, April 16-18, 2019, Kyiv, Ukraine, pp. 626-629.

### Artuhov V.G., Brytov O.A., Hiorhizova-Hai V.S., Kyriusha B.A., Stikanov V.J. CALCULATION AND SIMULATION OF NON-RECURSIVE DIGITAL FILTERS IN ANALOG-DIGITAL CIRCUIT SIMULATOR

*The article considers the problem of calculating the coefficients of digital filters with impulse response of finite duration (FIR filters) in the environment of a circuit simulator. An analysis of the methods for solving this problem, on the one hand, and the capabilities of the popular Micro-Cap circuit simulator, on the other, leads to the conclusion that the Fourier series method, also known as the window method, is a feasible method. The result of this method is the calculation formulas for the samples of the impulse response of the desired filter, which are easily implemented in the environment of the circuit simulator Micro-Cap. The idea of the method is to decompose a given periodic frequency response into a Fourier series, the coefficients of which are samples of the impulse response of the filter under consideration. To reduce the pulsations of the magnitude response caused by the Gibbs phenomenon, the obtained pulse response is modified by multiplying by a window function.*

*A detailed description of the procedure for deriving calculation formulas for four types of frequency-selective filters: low-pass filters, high-pass filters, band-pass and band-stop filters. The desired frequency characteristics for these filters are set in the form of real rectangular mirror-symmetric frequency functions. The obtained calculation formulas are given in two tables.*

*In addition, the calculation of digital differentiators and Hilbert converters is considered. The calculation formulas are summarized in two more tables.*

*The implementation of the Fourier series method in the environment of the Micro-Cap simulator is demonstrated in two examples of the calculation of the differentiator and the Hilbert converter. Frequency analysis was performed to evaluate the results of calculations. Graphs of magnitude, phase responses and group delay response are given. The operation of the filters in the time domain is demonstrated by simulating the response of the differentiator to the pulse input signal and the Hilbert converter to the sinusoidal input signal. Graphs of input and output signals are given.*

**Key words:** digital filter design, Fourier series, frequency response, finite impulse response, digital differentiator, Hilbert converter, simulation.

УДК 004.621.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/06>**Розорінов Г.М.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Сірченко І.А.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

## МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЗАХИСТУ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ МЕРЕЖ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ АУДІОВІЗУАЛЬНОГО КОНТЕНТУ

Акцентується увага на тому, що при моделюванні безпечного віддаленого доступу або безпечного з'єднання із віддаленим об'єктом в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту головним є зіставлення наявних захисних засобів і ступеня жорсткості політики безпеки організації відносно контролю такого доступу та дотримання конфіденційності інформації при її передачі по незахищених мережах. При цьому потрібно враховувати статистику випадків несанкціонованого доступу в мережі, що мали місце раніше.

Розглянуті моделі безпечного модемного з'єднання, безпечного з'єднання через роутер, захисту інформації в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту та безпечного Інтернет з'єднання.

Із розгляду представлених моделей взаємодії засобів реалізації атак з засобами забезпечення кожної з функціональних властивостей захищеності мереж розповсюдження аудіовізуального контенту робиться висновок про те, що для унеможливлення подолання неавторизованим користувачем системи захисту мережі необхідно застосовувати: організаційні заходи – зовнішня охорона, перепускний режим; первинні технічні заходи – блокування витоків інформації чи блокування спеціального впливу на неї технічними каналами, унеможливлення фізичного доступу до ресурсів мережі та до матеріальних носіїв даних; основні технічні заходи – засоби адміністрування чи управління доступом, засоби контролю чи контролю та поновлення цілісності та засоби криптографічного захисту інформації у відокремлених терміналах та їх мережах.

На основі розглянутих моделей побудовано загальну модель взаємодії атак та засобів захисту ресурсів мережі. Вона дає можливість отримати, окрім імовірнісних та часових характеристик конфіденційності, цілісності, доступності інформації, узагальнені кількісні характеристики системи захисту та оцінки тих характеристик чи параметрів відповідних засобів, які впливають на можливість забезпечення функціональних властивостей інформації. Загальна модель дозволяє визначити ті елементи, через які захищеність інформації у мережах розповсюдження аудіовізуального контенту є найбільш вразливою для загроз.

**Ключові слова:** віддалений доступ, захищеність, контент, модель, показник.

### Постановка проблеми

При моделюванні безпечного віддаленого доступу або безпечного з'єднання із віддаленим об'єктом в мережах розповсюдження аудіовізуального контенту (МР АВК) головним є зіставлення наявних захисних засобів (активізованих і регулярно використовуваних) і ступеня жорсткості політики безпеки організації відносно контролю такого доступу та дотримання конфіденційності інформації при її передачі по незахищених мережах [1–4]. При цьому потрібно враховувати статистику випадків несанкціонованого доступу (НСД) в мережі, що мали місце раніше. В роботах [5, 6] приведений варіант таблиці показників, якими оперують при моделюванні віддаленого доступу (табл. 1).

**Метою** роботи є визначити можливий склад заходів та засобів для забезпечення кожної з властивостей захищеності МР АВК та розробити загальну модель взаємодії атак та засобів захисту ресурсів МР АВК.

### Виклад основного матеріалу

#### 1. Модель безпечного модемного з'єднання

Імовірність несанкціонованого доступу в локальну мережу через модемне з'єднання можна розрахувати таким чином:

$$P_M^P = M_{ДЗ} \cdot M_{МЛ} \cdot D \cdot P \cdot (1 - M_{ІА} \wedge M_{ВР}) \cdot (1 - M_{\Phi}), \quad (1)$$

де  $P$  – імовірність здійснення спроби несанкціонованого доступу в локальну мережу через комутоване з'єднання. Визначається методом

експертних оцінок, шляхом урахування статистики прояву зовнішніх загроз в локальній мережі;  $D$  – кількість днів в році, в перебігу яких мережа повністю функціонує і пов'язана з видаленими мережами комутованим доступом;  $M_{ДЗ}$  – середнє число вхідних дзвінків на одну лінію;  $M_{МЛ}$  – кількість модемних ліній;  $M_{ІА}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника ступеня використання алгоритмів ідентифікації і аутентифікації, що набуває значень: мінімальне – 0,1; низьке – 0,3; середнє – 0,5; високе – 0,8; максимальне – 0,95;  $M_{ВР}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника важливості ресурсів, до яких є віддалений доступ, що набуває значень: мінімальне – 0,3; низьке – 0,5; середнє – 0,8; високе – 0,9; максимальне – 0,97;  $M_{Ф}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника використання засобів фільтрації дзвінків, що набуває значень: мінімальне – 0,1; низьке – 0,3; середнє – 0,5; високе – 0,8; максимальне – 0,95.

Експериментальна імовірність НСД в локальну мережу через модемне з'єднання за період функціонування мережі, визначається як:

$$P_M^E = M_{ІА} \wedge M_{Ч} \cdot D \cdot (100 - M_{П}), \quad (2)$$

де  $M_{Ч}$  – частота випадків НСД в мережу через модем;  $M_{П}$  – період функціонування локальної мережі.

Загальна імовірність НСД в локальну мережу через модемне з'єднання визначається як:

$$P_M^3 = P_M^P \cdot (1 - K_{Ф}) + P_M^E \cdot K_{Ф}, \quad (3)$$

де  $K_{Ф}$  – чисельний коефіцієнт, що враховує час функціонування локальної мережі, впродовж якого велася статистична обробка випадків НСД.  $K_{Ф}$  набуває значень, відповідно: 0 – менше року; 0,2 – від року до двох років; 0,5 – від двох до чотирьох років; 0,8 – від чотирьох до семи років; 0,9 – більше семи років.

Як видно із формул (2), (3), експериментальна імовірність (яка визначається шляхом урахування статистичної обробки випадків НСД за період функціонування локальної мережі) має тим більший внесок у визначення загальної імовірності, чим за триваліший термін зібрані дані про спроби злому і, відповідно, навпаки, за відсутності тривалих спостережень загальна імовірність повністю визначається розрахунковою імовірністю  $P_M^P$ .

Розраховану таким чином імовірність НСД в МР АВК  $P_M^3$  треба зіставити з синтаксичним показником  $M_{ВР,ЖБ}$  показників  $M_{ВР}$  і  $M_{ЖБ}$  – ступеня жорсткості політики безпеки модемного з'єднання (табл. 1). Імовірності НСД для модем-

ного з'єднання при різних показниках  $M_{ВР,ЖБ}$  зведено в табл. 2.

Розраховані ймовірності НСД для надійно захищеної мережі завжди менше приведених в табл. 2 для відповідних значень показника  $M_{ВР,ЖБ}$ . На основі різниці розрахованого значення  $P_M^3$  і приведенного в табл. 2 визначається необхідний набір захисних засобів. При повторному порівнянні імовірності НСД з урахуванням нових значень показників прагнуть значення  $P_M^3$  довести до якомога близького співпадіння відповідно до табл. 2.

Слід відзначити, що імовірність вдалої спроби НСД приведена за період часу, який дорівнює одному року.

## 2. Модель безпечного з'єднання через роутер

Розрахункову імовірність НСД в локальну мережу через роутер по аналогії з модемним з'єднанням можна визначити таким чином:

$$P_P^P = D \cdot P \cdot R_{АД} \cdot (1 - R_{СД}) \cdot (1 - R_{КА}), \quad (4)$$

де  $P$  – імовірність здійснення спроби НСД в локальну мережу через фізичне з'єднання. Визначається методом експертних оцінок, шляхом урахування статистики прояву зовнішніх загроз в локальних мережах;  $R_{АД}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника ступеня активності доступу до мережі через WAN, що набуває значень: мінімальне – 0,1; низьке – 0,25; середнє – 0,5; високе – 0,85; максимальне – 1;  $R_{СД}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника ступеня довіри до організацій, які мають доступ до мережі, що набуває значень: мінімальне – 0; низьке – 0,2; середнє – 0,4; високе – 0,6; максимальне – 0,75;  $R_{КА}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника ступеня кваліфікації адміністратора мережі, що набуває значень: мінімальне – 0; низьке – 0,2; середнє – 0,5; високе – 0,8; максимальне – 0,95.

Експериментальна імовірність НСД в локальну мережу через роутер, яка визначається за період функціонування локальної мережі, дорівнює:

$$P_P^E = R_{ІА} \wedge R_{Ч} \cdot D \cdot (100 - R_{П}). \quad (5)$$

Загальна імовірність НСД в локальну мережу через роутер визначається як:

$$P_P^3 = P_P^P \cdot (1 - K_{Ф}) + P_P^E \cdot K_{Ф}. \quad (6)$$

Розраховану імовірність НСД в МР АВК  $P_P^3$  порівнюють з відповідним синтаксичним показником  $R_{ВР,ЖБ}$ , який визначається співвідношенням показників  $R_{ВР}$  і  $R_{ЖБ}$  – ступеня жорсткості політики безпеки з'єднання через роутер (табл. 1). Імовірності НСД для з'єднання через роутер при різних показниках  $R_{ВР,ЖБ}$  зведено в табл. 3.

Таблиця 1

**Показники безпечного віддаленого доступу**

Тип	Показник
<i>Модемне з'єднання</i>	
Чисельний	Кількість модемних ліній
Логічний	Наявність вбудованих в модем алгоритмів ідентифікації і аутентифікації
Синтаксичний	Ступінь використання алгоритмів ідентифікації і аутентифікації
Чисельний	Середнє число вхідних дзвінків на одну лінію
Синтаксичний	Важливість ресурсів, до яких є віддалений доступ
Логічний	Випадки НСД в мережу через модем
Чисельний	Частота випадків НСД
Чисельний	Припинення НСД в мережу через модем
Логічний	Використання засобів фільтрації дзвінків
Синтаксичний	Ступінь жорсткості політики безпеки модемного з'єднання
<i>З'єднання через роутер</i>	
Синтаксичний	Ступінь активності доступу до мережі через WAN
Синтаксичний	Ступінь довіри до організацій, що мають доступ до мережі
Синтаксичний	Ступінь кваліфікації адміністратора мережі
Логічний	Випадки НСД в мережі через роутер
Чисельний	Частота випадків НСД
Чисельний	Припинення НСД в мережу через роутер
Синтаксичний	Ступінь жорсткості політики безпеки з'єднання через роутер
<i>Захист інформації в МР АВК</i>	
Логічний	Чи передається важлива інформація по незахищених МР АВК?
Синтаксичний	Об'єми, що передаються по МР АВК
Синтаксичний	Важливість АВК, що передається по МР
Синтаксичний	Ступінь використання криптографічних засобів
Синтаксичний	Ступінь жорсткості політики дотримання конфіденційності даних
<i>Вихід в Інтернет</i>	
Логічний	Чи використовується система Firewall?
Синтаксичний	Ступінь використання захисних засобів
Логічний	Наявність особи, відповідальній за безпеку
Синтаксичний	Ступінь використання антивірусних засобів
Логічний	Чи захищений прогін Java-апплетів (будь-яких інтерактивних програм)?
Логічний	Чи завантажуються сторінки тільки з сертифікованих Web-сайтів?
Синтаксичний	Ступінь контролю за імпортом програм
Синтаксичний	Ступінь навчання користувачів безпеки

Таблиця 2

**Значення імовірностей НСД для модемного з'єднання при різних синтаксичних показниках  $M_{BP, JB}$**

Значення $M_{BP, JB}$	Імовірність $P_M^3$
мінімальне	>0,15
низьке	0,1 – 0,15
середнє	0,03 – 0,1
високе	– 0,03
максимальне	<0,01

Таблиця 3

**Значення імовірностей НСД для з'єднання через роутер при різних синтаксичних показниках  $R_{BP, JB}$**

Значення $R_{BP, JB}$	Імовірність $P_P^3$
мінімальне	>0,15
низьке	0,1 – 0,15
середнє	0,03 – 0,1
високе	0,01 – 0,03
максимальне	<0,01

**3. Модель захисту інформації в МР АВК**

Модель припускає обчислення імовірності порушення конфіденційності при передаванні інформації по незахищених МР АВК:

$$P_k = C_{MI} \wedge P \cdot C_o(1 - C_{K3}), \quad (7)$$

де  $P$  – імовірність перехоплення інформації в МР АВК. Вона визначається методом експертних оцінок, шляхом урахування статистики про-



яву зовнішніх загроз в розподілених мережах;  $C_O$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника об'ємів, що передаються по МР АВК, який приймає значення: мінімальне – 0,1; низьке – 0,2; середнє – 0,5; високе – 0,8; максимальне – 1;  $C_{K3}$  – чисельний еквівалент відповідного синтаксичного показника ступеня використання криптографічних засобів, що набуває значень: мінімальне – 0,5; низьке – 0,7; середнє – 0,8; високе – 0,95; максимальне – 0,999.

У цій моделі не представляється можливим врахувати статистику перехоплення конфіденційних повідомлень при передаванні через МР АВК, оскільки факт перехоплення або несанкціонованого ознайомлення із інформацією в розподілених мережах встановити практично неможливо. Тому в моделі застосовані криптографічні засоби, що дозволяють звести імовірність НСД до нуля [7–9].

Розраховану імовірність порушення конфіденційності при передачі інформації по незахищених каналах зв'язку  $P_K$  порівнюють з відповідним синтаксичним показником  $C_{BP, JB}$ , який визначається співвідношенням показників  $C_{BP}$  і  $C_{JB}$  – ступеня жорсткості політики дотримання конфіденційності даних (табл. 1) подібно до попередніх моделей [10]. Значення імовірностей порушення конфіденційності при різних синтаксичних показниках  $C_{BP, JB}$  зведені в табл. 4.

Таблиця 4

**Значення імовірностей порушення конфіденційності при різних синтаксичних показниках  $C_{BP, JB}$**

Значення $C_{BP, JB}$	Імовірність $P_K$
мінімальне	>0,001
низьке	0,001 – 0,0001
середнє	0,0001 – 0,000001
високе	0,000001 – 0,000001
максимальне	0,0000001

#### 4. Модель безпечного Інтернет з'єднання

Модель безпечного Інтернет з'єднання відповідно до ступеня ризику МР АВК передбачає наявність набору захисних засобів, сумарний ваговий коефіцієнт яких відповідно до табл. 5 зна-

ходиться у межах: низький ризик – 0...3, середній ризик – 4...10, високий ризик – більше 10. Таблиця 5 містить такі позначення:  $K_{CH}$  – ступінь навчання користувачів безпеки,  $K_{ПА}$  – чи захищений прогін Java-апплетів (будь-яких інтерактивних програм)?,  $K_{CC}$  – чи завантажуються сторінки тільки з сертифікованих Web-сайтів?,  $K_{III}$  – ступінь контролю за імпортом програм,  $K_{AZ}$  – ступінь використання антивірусних засобів,  $K_{BB}$  – наявність особи, відповідальній за безпеку,  $K_{FW}$  – чи використовується система Firewall?

#### 5. Загальна модель системи захисту МР АВК

Із розгляду представлених моделей взаємодії засобів реалізації атак з засобами забезпечення кожної з функціональних властивостей захищеності МР АВК можна зробити висновок про те, що для унеможливлення подолання неавторизованим користувачем системи захисту мережі необхідно застосовувати [11, 12]:

- організаційні заходи (організація зовнішньої охорони, перепускного режиму – унеможливлення проникнення через перепускні пункти, унеможливлення крадіжок матеріальних носіїв даних, зберігання в таємниці ідентифікаторів та паролів користувачів та ін.);

- первинні технічні заходи (блокування витоків інформації чи блокування спеціального впливу на неї технічними каналами, унеможливлення фізичного доступу до ресурсів мережі та до матеріальних носіїв даних, в тому числі через елементи будівельних конструкцій – наявність надійних стін, дверей, віконних ґрат, охоронної сигналізації та ін.);

- основні технічні заходи (засоби адміністрування чи управління доступом, засоби контролю чи контролю та поновлення цілісності та засоби криптографічного захисту інформації у відокремлених терміналах та їх мережах, в тому числі в розподілених мережах).

Розглянуті моделі дозволяють побудувати загальну модель взаємодії атак та засобів захисту ресурсів мережі (рис. 1).

Вона дає можливість отримати, окрім імовірнісних та часових характеристик конфіденційності, цілісності, доступності інформації, узагаль-

Таблиця 5

**Вагові коефіцієнти захисних засобів відповідно до ступеня ризику**

$K_{CH}$	$K_{ПА}$	$K_{CC}$	$K_{III}$	$K_{AZ}$	$K_{BB}$	$K_{FW}$
низьк.– 0	так – 1	так – 1	низьк.– 0	низьк.– 0	так – 1	так – 1
сер.– 1	ні – 0	ні – 0	сер.– 2	сер.– 3	ні – 0	ні – 0
вис.– 3			вис.– 4	вис.– 5		



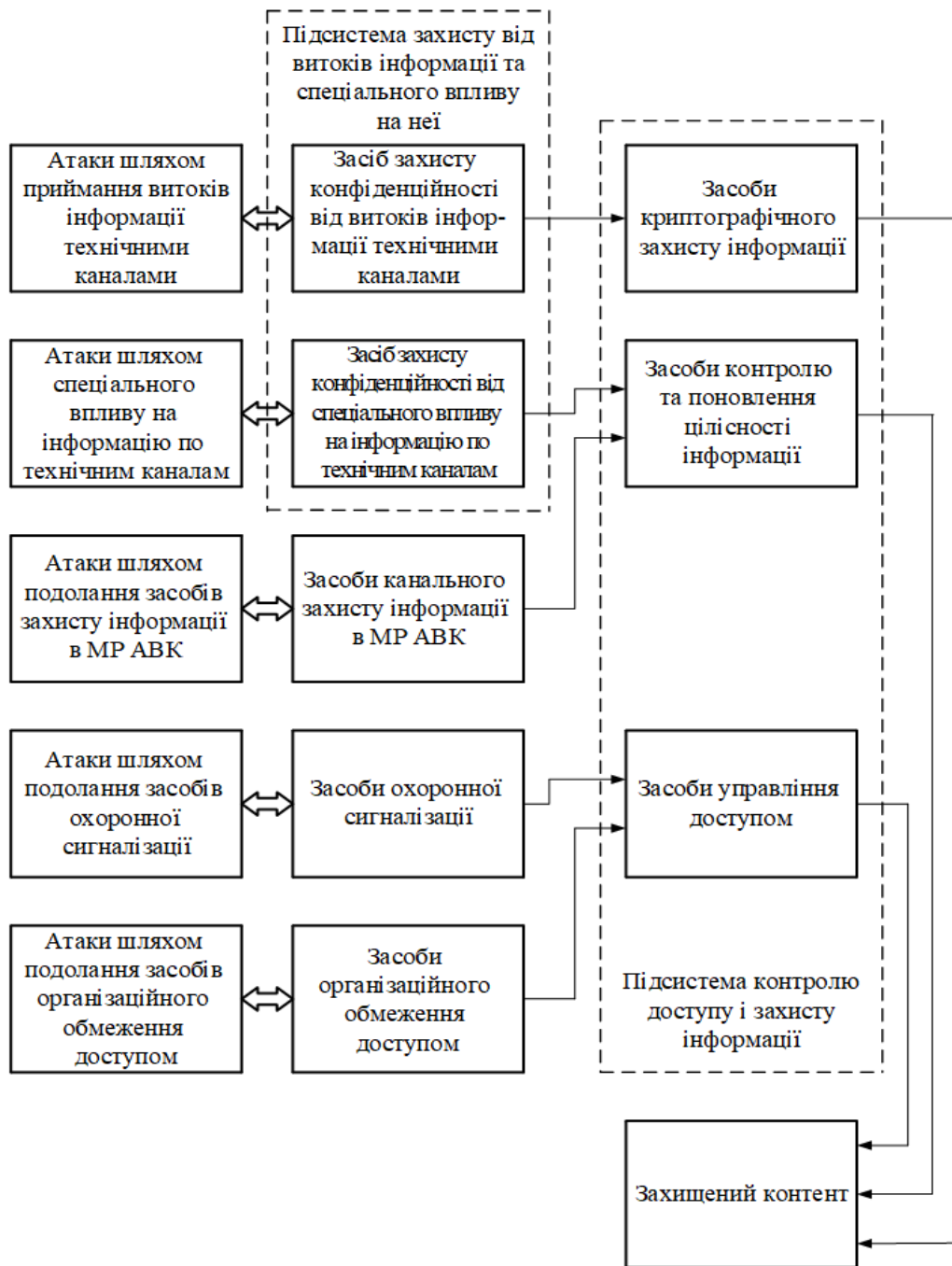


Рис. 1. Загальна модель системи захисту МР АВК

нені кількісні характеристики системи захисту та оцінки тих характеристик чи параметрів відповідних засобів, які впливають на можливість забезпечення функціональних властивостей інформації. Окрім того, ця модель дозволяє визначити ті елементи, через які захищеність інформації у МР АВК є найбільш вразливою для загроз.

При побудові загальної моделі враховано:

- функціональну близькість, схожість, інколи навіть єдність, деяких із засобів захисту, тобто їх здатність виконувати однакові функції захисту,

хоча, можливо, і в різних умовах у складі різних моделей забезпечення функціональних властивостей захищеної системи;

- можливість об'єднати в деяких засобах певну множину близьких чи однотипних функцій, наприклад, в засобах управління доступом – функції адміністрування доступом, контролю та поновлення цілісності, фільтрації пакетів, блокування засобів генерації безперервних запитів та ін.;

- здатність інших засобів захисту виконувати функції захисту від однотипних загроз різ-

ним функціональним властивостям захищених ресурсів.

Це надає змогу об'єднувати різні засоби протидії певним загрозам чи, навпаки, відокремлювати окремі з них у відповідні підсистеми, внаслідок чого у складі системи технічного захисту можна вичленити підсистеми, які виконують свої функції в різних середовищах, чи по відношенню до достатньо характерних лише для них загроз, наприклад:

– підсистему контролю доступу і захисту інформації з функціями побудови моделі захищеної системи, побудови і реалізації правил розмежування доступу до ресурсів МР АВК, управління фізичним доступом, контролю та поновлення цілісності, криптографічного захисту інформації, фільтрації пакетів, блокування спроб підбору паролів тощо;

– підсистему захисту інформації від витоків інформації технічними каналами та спеціального впливу на неї.

Слід зазначити, що на рис. 1 не наведено засобів забезпечення спостереженості за подіями в захищеній системі, які є пов'язаними з усіма процесами використання інформації та її захисту. Це не означає приниження їх значення в процесі захисту контенту, а лише ілюструє те, що ці засоби не виконують функцій безпосереднього захисту ресурсів МР АВК. Але відсутність засобів забезпечення спостереженості чи їх подолання порушниками фактично означає наявність змоги доступу цих порушників до ресурсів мережі та, в цьому сенсі, засоби забезпечення спостереже-

ності відіграють таку ж роль, як і засоби забезпечення інших властивостей захищеності ресурсів МР АВК.

Звернемо увагу також на те, що до складу кожної з моделей взаємодії атак та засобів захисту ресурсів МР АВК входять засоби захисту відповідних властивостей захищеності контенту. Це означає суттєву вразливість стану захищеності МР АВК як раз через канали обміну інформацією та через їх елементи. Наслідком цього є принаймні відокремлення цих засобів захисту в підсистемі захисту інформації в МР АВК. Це дозволяє зробити висновок про актуальність та важливість досліджень та розробок щодо методів та засобів забезпечення властивостей захищеності контенту в мережах, каналах обміну інформацією та їх елементах.

#### Висновки

1. Розроблено моделі взаємодії засобів реалізації загроз кожній з функціональних характеристик захищеності інформації та засобів протидії цим загрозам, тобто моделі подолання неавторизованим користувачам відповідних елементів систем захисту та отримано вирази для розрахунків величин залишкового ризику, кількісної оцінки захищеності інформації в МР АВК.

2. Визначено можливий склад заходів та засобів для забезпечення кожної з властивостей захищеності МР АВК та розроблено загальну модель взаємодії атак та засобів захисту контенту мережі.

3. Побудована загальна модель взаємодії атак та засобів захисту ресурсів мережі розповсюдження аудіовізуального контенту.

#### Список літератури:

1. Домарев В.В. Безопасность информационных технологий. Системный подход. Київ, 2004. 992 с.
2. Богуш В.М., Кудін А.М. Моніторинг систем інформаційної безпеки. Київ, 2006. 414 с.
3. Соколов А.В., Шальгин В.Ф. Защита информации в распределяемых корпоративных сетях и системах. Москва, 2002. 656 с.
4. Сірченко Г.А. Задачі забезпечення цілісності та доступності інформаційних об'єктів в комунікаційних мережах. *Захист інформації*. 2010. № 2. С. 49–54.
5. Хорошко В.А. Модель системы защиты информации. *Захист інформації*. 1999. № 1. С. 5–11.
6. Клейнен Дж. Статистические методы в имитационном моделировании. Москва, 1978. 221 с.
7. Широкин В.П., Мухин В.Е., Крамар Д.И. Анализ рисков в задачах мониторинга безопасности компьютерных систем и сетей. *Захист інформації*. 2003. № 1. С. 28–34.
8. Яремчук Ю. Є., Павловський П. В., Катаев В. С., Сінюгін В. В. Комплексні системи захисту інформації : навч. Посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 120 с.
9. Хорошко В.А., Чекатков А.А. Методы и средства защиты информации. Київ, 2003. 504 с.
10. Конеев И.Р., Беляев А.В. Информационная безопасность предприятия. Санкт-Петербург, 2003. 688 с.
11. Соколов А.В., Шальгин В.Ф. Защита информации в распределяемых корпоративных сетях и системах. Москва, 2002. 656 с.
12. Дмитренко А.П., Сірченко Г.А., Хорошко В.А. Статистическое моделирование для оценки защищенности локальной сети. *Вісник ДУІКТ*. 2010. Т.8. № 1. С. 62–67.

**Rozorinov H.M., Sirchenko I.A. MODELING OF INFORMATION SECURITY SYSTEMS FOR AUDIOVISUAL CONTENT DISTRIBUTION NETWORKS**

*Emphasis is placed on the fact that when modeling secure remote access or secure connection to a remote object in audiovisual content distribution networks, the main thing is to compare the available safeguards and the degree of rigidity of the organization's security policy to control such access and confidentiality unsecured networks. At the same time, it is necessary to take into account the statistics of cases of unauthorized access to the network that took place earlier.*

*Models are considered secure modem connection, secure router connection, protection of information in audiovisual content distribution networks and secure Internet connection.*

*From consideration of the presented models of interaction of realization means of attacks with means of providing each of functional properties of networks protection of audiovisual content distribution it is concluded that to prevent overcoming by the unauthorized user of a network protection system it is necessary to apply: organizational measures – external protection; primary technical measures – blocking information leaks or blocking special influence on it through technical channels, preventing physical access to network resources and physical media; basic technical measures – means of administration or management of access, means of control or control and restoration of integrity and means of cryptographic protection of information in separate terminals and their networks.*

*On the basis of the considered models the general model of interaction of attacks and means of protection of network resources is constructed. It provides an opportunity to obtain, in addition to probabilistic and temporal characteristics of confidentiality, integrity, availability of information, generalized quantitative characteristics of the protection system and evaluation of those characteristics or parameters of appropriate means that affect the functional properties of information. The general model allows us to identify the elements through which the security of information in audiovisual content distribution networks is most vulnerable to threats.*

**Key words:** remote access, security, content, model, indicator.

**Семенов А.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Семенова О.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Пінаєв Б.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Куляс Р.О.**

Вінницький національний технічний університет

**Шпильовий О.О.**

Вінницький національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМУ ДИНАМІЧНОГО ХАОСУ ЕЛЕКТРИЧНИХ КОЛИВАНЬ В ГЕНЕРАТОРІ КОЛПІТЦА НА ОСНОВІ МДН ТРАНЗИСТОРА

*Радіоелектронний генератор динамічного хаосу за схемою Колпітца є базовим елементом нелінійної електроніки. Він отримав широкого поширення як джерело стійких хаотичних коливань у надширококутових системах зв'язку. Генератор динамічного хаосу за схемою Колпітца застосовують на низьких частотах, середніх частотах, високих частотах і надзвичайно високих частотах. Це зумовлено простотою схеми та унікальними властивостями його автоколивальної системи. Тому генератор динамічного хаосу за схемою Колпітца привертає значну увагу дослідників. Відома велика кількість публікацій. У цих публікаціях всебічно досліджені динамічні властивості, схемотехнічні та конструкторські особливості генератора Колпітца на біполярному транзисторі. Менше уваги було приділено дослідженню генератора Колпітца на операційних підсилювачах, інтегральних мікросхемах та можливості його реалізації засобами цифрової схемотехніки, зокрема на програмованих інтегральних мікросхемах. При цьому, мало уваги дослідників було приділено генератору Колпітца на основі польових транзисторів. У роботі наведено результати дослідження хаотичної динаміки генератора Колпітца на основі МДН транзистора. Розглянуто нові схемні варіанти генератора Колпітца динамічного хаосу на основі МДН транзистора з симетричним і несиметричним живленням. Обґрунтована математична модель генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі. Отримано результати математичного моделювання. Проведено аналіз фазових портретів автоколивальної системи генератора в площинах динамічних змінних. Наведено амплітудно-частотні спектри генерованих хаотичних коливань. Розраховано статистичні параметри генерованих хаотичних коливань. Зроблено порівняльний аналіз генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з генератором Колпітца динамічного хаосу на біполярному транзисторі, що отримав широкого поширення в сучасних радіотехнічних і телекомунікаційних системах.*

**Ключові слова:** динамічний хаос, генератор Колпітца, МДН транзистор, математична модель, фазовий портрет.

### Постановка проблеми.

Протягом останнього століття генератор Колпітца є основним елементом засобів зв'язку [1, с. 351]. Це зумовлено простотою схеми, надійністю роботи, стійкою генерацією у широкому діапазоні частот, відсутністю взаємної індуктивності, а також високою стабільністю частоти [1, с. 351]. Тривалий час в радіотехніці та телекомунікаціях генератор Колпітца використо-

вувався як джерело високостабільних синусоїдальних коливань з низьким рівнем спотворень. З часом почав зменшуватися інтерес розробників і дослідників до практичного використання генератора Колпітца, що було зумовлено розвитком інтегральної схемотехніки. Але ця тенденція кардинально змінилася після публікації М. П. Кеннеді в 1994 році дослідницької роботи [2], у якій він виявив і теоретично обґрунтував

режим динамічного хаосу в простому генераторі Колпітца на одному біполярному транзисторі. Подальші дослідницькі роботи М. П. Кеннеді [3, 4] сприяли приділення високої уваги дослідників до нелінійних і хаотичних автоколивальних систем і стрімкому розвитку теорії та практики генераторів динамічного хаосу.

На сьогоднішній опубліковано велику кількість наукових з розроблення та дослідження генератора Колпітца [5]. Так, у пошуковій системі ScienceDirect (Elsevier) у результаті пошуку отримано 642 статті в назві яких фігурує ключова фраза «Colpitts oscillator». В результаті пошуку в науково-метричній базі Web of Science Core Collection за цією ключовою фразою отримано 113 статей. Якщо врахувати анотації та ключові слова, тоді буде знайдено кілька тисяч статей з цього напрямку. Але усі ці статті в переважній більшості присвячені дослідженню класичного схемотехнічного варіанту генератора Колпітца на біполярному транзисторі або різноманітних схемотехнічних варіантах активного елементу на біполярних транзисторах (біполярному транзисторі з динамічним навантаженням, біполярному транзисторі зі струмовим дзеркалом, диференціальному каскаді на двох або чотирьох біполярних транзисторах, складені біполярні транзистори та ін.) або операційних підсилювачах за біполярною інтегральною схемотехнікою [6]. При цьому, дослідженню динамічних режимів генератора Колпітца на польових або МДН транзисторах приділено мало уваги [7]. Відомо, що польові та МДН транзистори володіють низкою переваг у порівнянні з біполярними транзисторами, основною з яких є висока енергоефективність [7]. Тому, на сучасному етапі науки та техніки виникла актуальна науково-прикладна задача дослідження хаотичної динаміки генератора Колпітца на МДН транзисторі.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Безліч сучасних дослідників працюють у напрямку розроблення та дослідження хаотичної динаміки радіоелектронних генераторів. У роботі [8] запропонований новий схемотехнічний варіант генератора Колпітца на операційному підсилювачі за КМОН інтегральною технологією. Застосування інтегральної мікросхеми підвищило порядок хаотичної системи та ввело додаткові нелінійності. Однак результати моделювання та тестування такого генератора показали, що його продуктивність еквівалентна продуктивності математичної моделі автоколивальної системи класичного генератора Колпітца.

Оригінальний схемний варіант хаотичного генератора Колпітца імпульсного типу запропонований в роботі [9]. Його активним елементом є операційний підсилювач із класичним розташуванням реактивних елементів коливального контуру – двох конденсаторів і котушки індуктивності. Ключовим компонентом схеми є польовий транзистор, що працює на нелінійній ділянці прохідної ВАХ. Польовий транзистор являє нелінійний резистор з антисиметричною вольт-амперною характеристикою, що імітує хаотичне електричне коло типу схеми Колпітца.

У роботах [10-12] наведені результати теоретичних та експериментальних досліджень класичного генератора Колпітца на МДН транзисторі з симетричною схемою живлення. У той же час, дослідження хаотичної динаміки класичного генератора Колпітца на МДН транзисторі з несиметричною схемою живлення не були проведені.

#### Постановка завдання.

Метою роботи є дослідження нелінійної динаміки генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з несиметричним живленням. Для досягнення поставленої мети потрібно вирішити такі завдання: 1) запропонувати схемне рішення генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з несиметричним живленням; 2) обґрунтувати його математичну модель; 3) отримати результати математичного моделювання нелінійної динаміки генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з несиметричним живленням.

#### Виклад основного матеріалу.

На рисунку 1,а наведена електрична схема генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з симетричним живленням. У роботах [10, с. 113; 11, с. 4] наведена математична модель генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з симетричним живленням відносно динамічних змінних (струму котушки індуктивності та напруги на конденсаторах  $C_1$  і  $C_2$ ), має вигляд співвідношень (1)-(2)

$$\begin{cases} L \frac{di_L}{dt} = -i_L R_L - u_{C1} + u_{C2} + V_{CC}, \\ C1 \frac{du_{C1}}{dt} = i_L - i_D(u_{C2}), \\ C2 \frac{du_{C2}}{dt} = -i_L + \frac{V_{EE} - u_{C2}}{R_S}. \end{cases} \quad (1)$$

де  $i_D(u_{C2})$  – нелінійна функція апроксимації прохідної характеристики МДН транзистора, що має вигляд [10, с. 113; 11, с. 4]

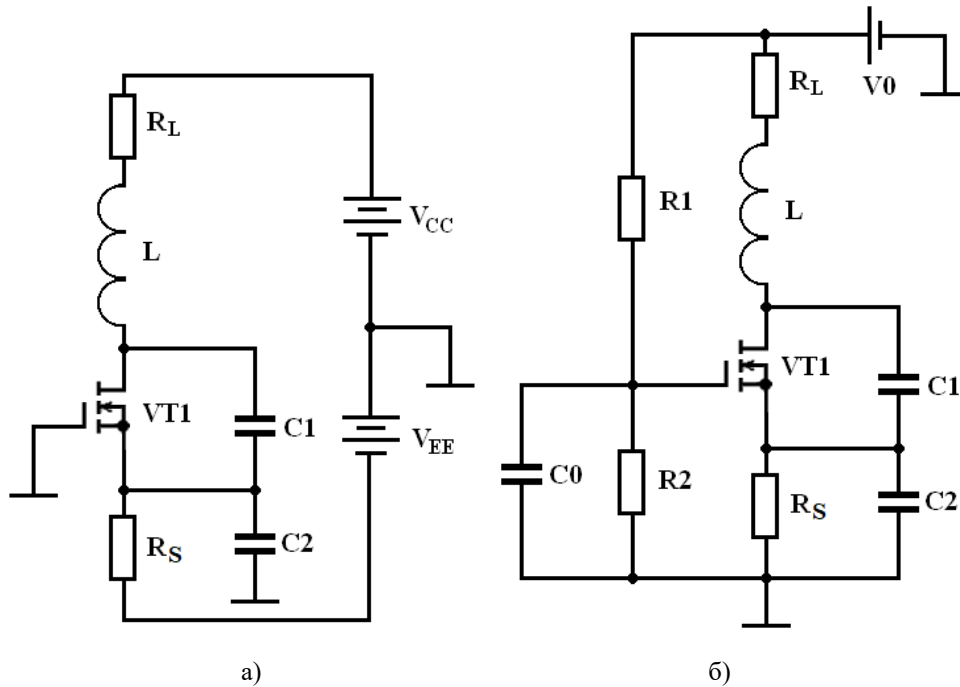


Рис. 1. Електричні схеми генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі з симетричним (а) та з несиметричним (б) живленням

$$i_D(u_{GS}) = \begin{cases} S(u_{GS} - U_0), & \text{if } u_{GS} \geq U_0, \\ 0, & \text{if } u_{GS} < U_0, \end{cases} \quad (2)$$

де  $u_{GS}$  – напруга затвор-витік МДН транзистора,  $U_0$  – напруга відсікання. МДН транзистора.

У роботах [12, 13] наведені результати дослідження динаміки хаотичних коливань в генераторі Колпітца на МОН транзисторі з крутизною прохідної ВАХ  $S \approx 50$  мА/В, напругою відсікання  $U_0 \approx 0,75$  В при таких параметрах елементів електричної схеми на рисунку 1,а:  $V_{CC} = 7$  В,  $V_{EE} = 2$  В,  $R_1 = 1,2$  кОм,  $R_2 = 12$  кОм,  $L = 358$  нГн,  $C_1 = 0,106$  пФ,  $C_2 = 0,212$  пФ. Максимум спектральної густини потужності хаотичних коливань при цьому зосереджений поблизу частоти 1 ГГц, основна частина енергії сигналу зосереджена в діапазоні частот нижче 3 ГГц [10, 11].

Недоліком запропонованої в роботах [12-13] і апробованої в роботах [10-11] математичної моделі (1)-(2) є спрощена кускова-лінійна апроксимація прохідної ВАХ МДН транзистора (2). У роботі [14, с. 2] використана така нелінійна апроксимація прохідної ВАХ МДН транзистора

$$i_D(u_{GS}, u_{DS}) = \begin{cases} 0, & \text{if } u_{GS} < U_0, \\ K_n [2(u_{GS} - U_0)u_{DS} - u_{DS}^2] & \text{if } u_{GS} > U_0 \text{ and } u_{DS} \leq u_{GS} - U_0, \\ K_n (u_{GS} - U_0)^2 & \text{if } u_{GS} > U_0 \text{ and } u_{DS} > u_{GS} - U_0, \end{cases} \quad (3)$$

де коефіцієнт  $K_n = \mu_n C_{OX} W / 2L$ ,  $\mu_n$  – рухомість вільних електронів,  $C_{OX}$  – ємність затвору

на одиницю площі,  $W$  – ширина каналу,  $L$  – довжина каналу.

На рис. 2 наведені еквівалентна схема генератора Колпітца на МОН транзисторі (рис. 2,а) та еквівалентна схема МДН транзистора (рис. 2,б), що були використані в роботі [14, с. 2].

Скорочена система рівнянь Кірхгофа для еквівалентної схеми генератора Колпітца на рис. 2,а має вигляд [14, с. 2]

$$\begin{cases} C_1 \frac{du_{C1}}{dt} = -i_D(u_{C1}, u_{C2}) + i_L, \\ C_2 \frac{du_{C2}}{dt} = i_L - I_0, \\ L \frac{di_L}{dt} = -u_{C1} - u_{C2} - i_L R_L + V_{CC}, \end{cases} \quad (4)$$

де функція апроксимації струму стоку МДН транзистора має вигляд (3) з урахуванням, що  $u_{C1} = u_{DS}$  та  $u_{C2} = -u_{GS}$ .

Математична модель генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі у нормованих динамічних змінних має вигляд [14, с. 3]

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = \alpha(z - h(x, y)), \\ \frac{dy}{dt} = \beta z, \\ \frac{dz}{dt} = -\gamma z - \lambda(x + y), \end{cases} \quad (5)$$

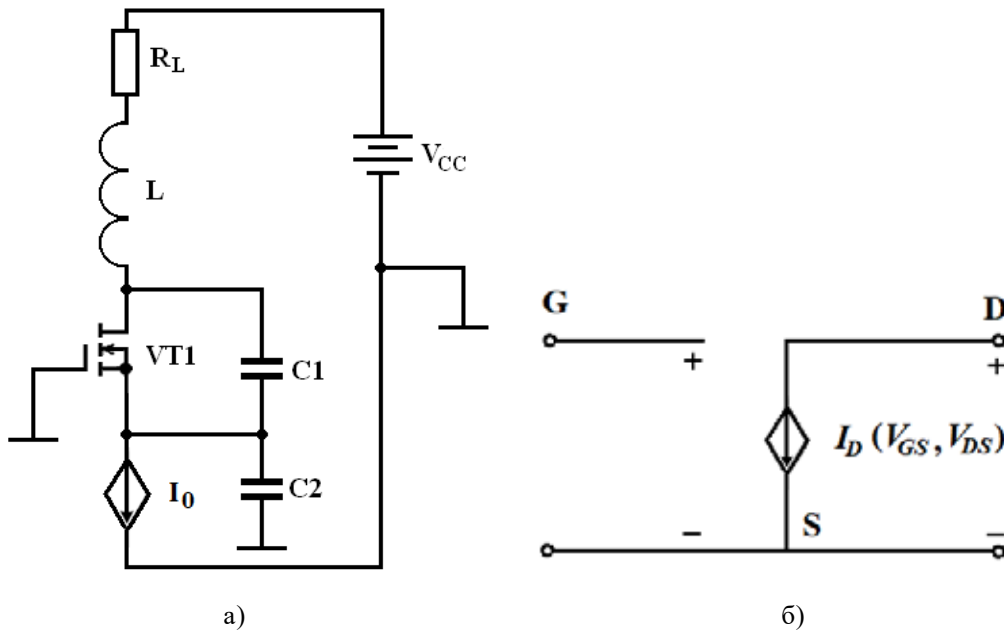


Рис. 2. Еквівалентна схема генератора Колпітца на МДН транзисторі (а) та еквівалентна схема МДН транзистора (б)

де

$$h(x, y) = \begin{cases} -a, & \text{if } y \geq \sqrt{a/k}, \\ -k(x+b+\sqrt{a/k})(x+b-\sqrt{a/k}-2y) & \text{if } y < \sqrt{a/k} \text{ and } x+y \leq -b, \\ k(y-\sqrt{a/k})^2 - a & \text{if } y < \sqrt{a/k} \text{ and } x+y > -b, \end{cases} \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt{K_n}/C2, \quad \alpha = \sqrt{K_n}/C1, \quad \gamma = R/L, \quad \lambda = 1/L\sqrt{K_n}, \quad (7)$$

Коефіцієнти системи диференціальних рівнянь (5) з урахуванням рівняння апроксимації (6) і (7) мають такі значення [14, с. 3]

$$\alpha = 4.5, \quad \beta = 4.5, \quad \gamma = 0.7, \quad \lambda = 0.112, \quad (8)$$

$$a = 0.55, \quad b = 15, \quad k = 1.$$

Автори здійснили математичне моделювання хаотичного режиму генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі в програмному пакеті Mathcad 15 за початкових умов (1, 0, 0) згідно з методикою [15, 16]. Результати математичного моделювання наведені на рис. 3 – рис. 5.

Порівнюючи отримані результати математичного моделювання генератора Колпітца на МДН транзисторі з результатами математичного моделювання генератора Колпітца на біполярному транзисторі у роботах [17, 18] потрібно зазначити обмежений динамічний простір генерованих хаотичних коливань та їх порівняну вузько-смуговість.

У роботі за допомогою програми MathCad 15 був розрахований безрозмірний коефіцієнт взаємної кореляції (9) нормованих динамічних змінних автоколивної системи генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі

$$\rho = \frac{R_{X1X2}(\tau)}{\sigma_{X1}\sigma_{X2}}, \quad (9)$$

де  $\sigma_{X1}$  і  $\sigma_{X2}$  – відхилення випадкових величин  $X1(t)$  і  $X2(t)$  від їх математичних сподівань відповідно. Отримані значення коефіцієнт взаємної кореляції для пар хаотичних сигналів складають такі значення:

$$\rho(X1, X2) = 0,39788, \quad \rho(X1, X3) = -0,75589,$$

$$\rho(X2, X3) = -0,0176957.$$

Порівнюючи статистичні параметри генерованих хаотичних коливань генератора Колпітца на МДН транзисторі зі статистичними параметрами генерованих хаотичних коливань генератора Колпітца на біполярному транзисторі, які отримані у роботах [17, 18], можна стверджувати, що електричні сигнали генератора Колпітца на МДН транзисторі мають більш високий коефіцієнт взаємної кореляції.

**Висновки.**

Автори запропонували нове схемне рішення генератора динамічного хаосу за схемою Колпітца на основі МДН транзистора з несиметричним живленням (рис. 1,б). Як математичну модель у нормованих динамічних змінних генератора хаотичних електричних коливань за схемою Колпітца на основі МДН транзистора з несиметричним живленням у роботі було обґрунтовано застосувати систему нелінійних диференціальних рівнянь (5) з використанням нелінійної апроксимації прохідної ВАХ МДН транзистора (6).

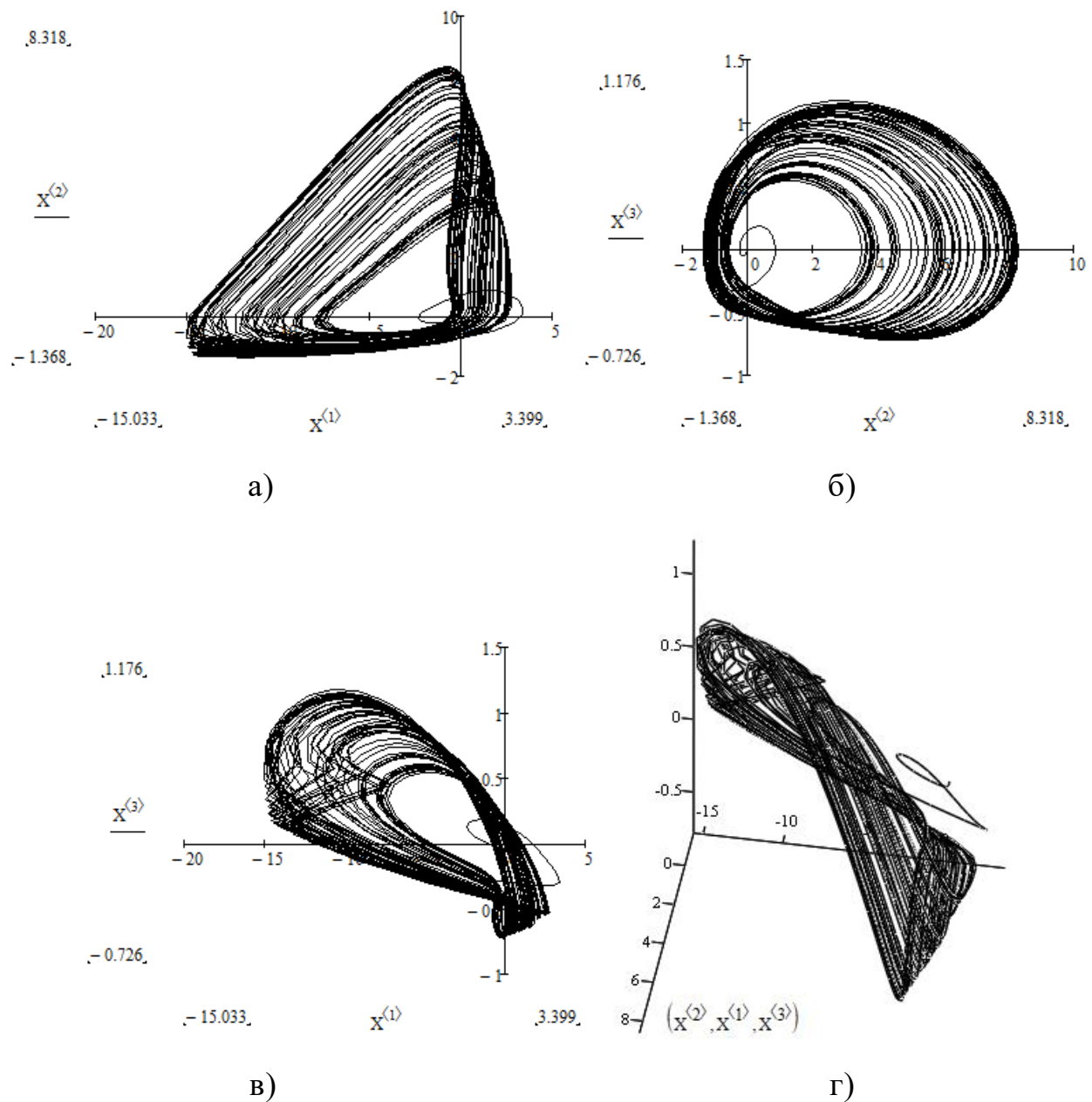
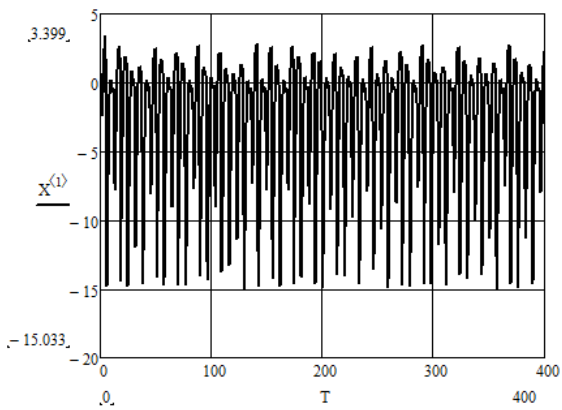


Рис. 3. Фазові портрети математичної моделі (5)-(8) автоколивальної системи генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі у площинах нормованих динамічних змінних  $x_1-x_2$  (а),  $x_2-x_3$  (б),  $x_1-x_3$  (в) та в просторі нормованих динамічних змінних  $x_1-x_2-x_3$  (г)

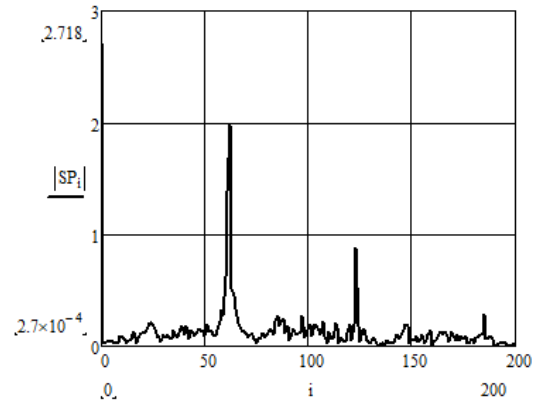
Отримано фазові портрети автоколивальної системи генератора Колпітца динамічного хаосу на МДН транзисторі у площинах нормованих динамічних змінних і просторі нормованих динамічних змінних, часові діаграми та амплітудно-частотні спектри генерованих хаотичних коливань. У порівнянні з генератором динамічного хаосу за схемою Колпітца на основі біполярного транзистора, хаотичні електричні сигнали генера-

тора динамічного хаосу за схемою Колпітца на основі МДН транзистора є вузькосмуговими. На відміну від наведених результатів у роботах [10, 11] отримані в цій роботі результати математичного моделювання не підтвердили можливість синтезу генератора динамічного хаосу за схемою Колпітца на основі МДН транзистора з постійною спектральною густиною потужності у широкій робочій смузі частот.

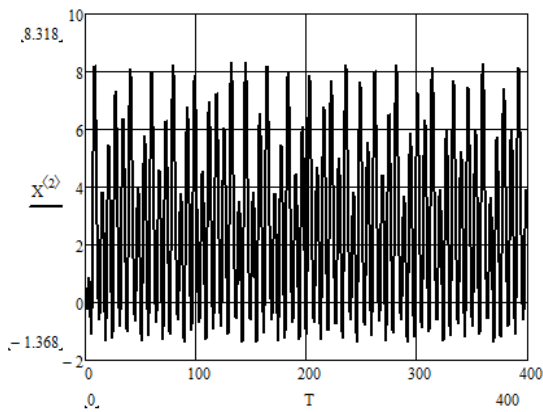




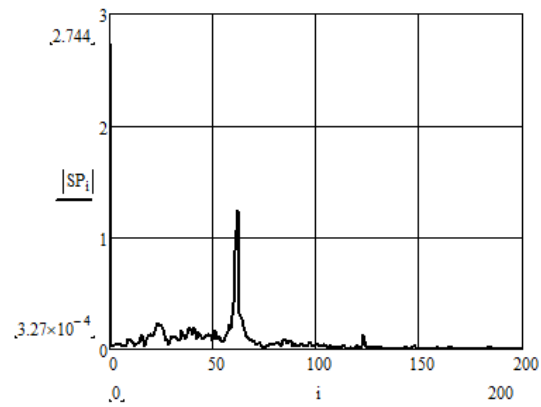
a)



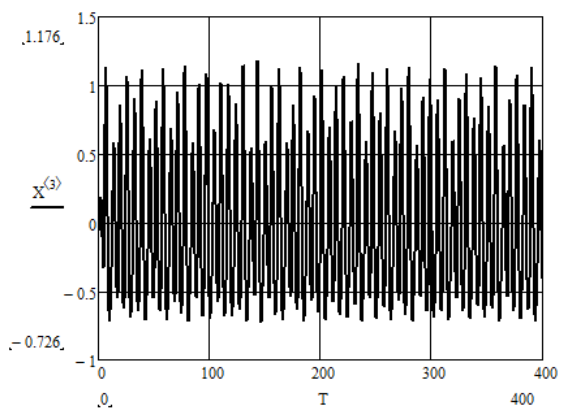
a)



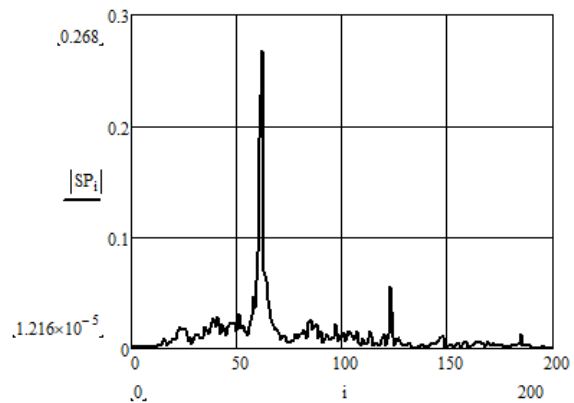
б)



б)



в)



в)

**Рис. 4.** Діаграми нормованих динамічних змінних  $x_1$  (а),  $x_2$  (б) і  $x_3$  (в) автоколивальної системи генератора Колпітца відносно нормованого часу

**Рис. 5.** Амплітудно-частотні спектри нормованих динамічних змінних  $x_1$  (а),  $x_2$  (б) і  $x_3$  (в) автоколивальної системи генератора Колпітца у частотному домені, що нормований відносно резонансної частоти коливального

**Список літератури:**

1. Raoul Blaise Wafo Tekam, Jacques Kengne, Germaine Djuidje Kenmoe. High frequency Colpitts' oscillator: A simple configuration for chaos generation. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2019. Volume 126, pp. 351-360. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2019.07.020>
2. M. P. Kennedy. Chaos in the Colpitts oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1994. Vol. 41, no. 11, pp. 771-774. DOI: <https://doi.org/10.1109/81.331536>
3. M. P. Kennedy. On the relationship between the chaotic Colpitts oscillator and Chua's oscillator. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1995. Vol. 42, no. 6, pp. 376-379. DOI: <https://doi.org/10.1109/81.390276>

4. G. M. Maggio, O. De Feo, M. P. Kennedy. Nonlinear analysis of the Colpitts oscillator and applications to design. *IEEE Transactions on Circuits and Systems I: Fundamental Theory and Applications*. 1999. Vol. 46, no. 9, pp. 1118-1130. DOI: <https://doi.org/10.1109/81.788813>
5. Ludovico Minati, Giacomo Innocenti, Gorana Mijatovic, Hiroyuki Ito, Mattia Frasca. Mechanisms of chaos generation in an atypical single-transistor oscillator. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Volume 157, Paper ID 111878. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.111878>
6. R. Zebaze Nanfa'a, R. Tchitnga, P.H. Louodop Fotso, R. Kengne, F.C. Talla, B. Nana, F.B. Pelap. Non periodic oscillations, bistability, coexistence of chaos and hyperchaos in the simplest resistorless Op-Amp based Colpitts oscillator. *Heliyon*. 2020. Vol. 6, Issue 2, e03482. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03482>
7. Ludovico Minati, Korkut Kaan Tokgoz, Hiroyuki Ito. Distributed sensing via the ensemble spectra of uncoupled electronic chaotic oscillators. *Chaos, Solitons & Fractals*. 2022. Vol. 155, 111749. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.111749>
8. B. K. Rhea, R. C. Harrison, F. T. Werner, E. Perkins, R. N. Dean. Approximating an Exactly Solvable Chaotic Oscillator Using a Colpitts Oscillator Circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2021. Vol. 68, no. 3, pp. 1028-1032. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3024147>
9. R. Tchitnga, T. Nguazon, P. H. Louodop Fotso, J. A. C. Gallas. Chaos in a Single Op-Amp-Based Jerk Circuit: Experiments and Simulations. *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*. 2016. Vol. 63, no. 3, pp. 239-243. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSII.2015.2483218>
10. Пилипенко А.М. Моделирование генератора сверхширокополосных хаотических колебаний и оценка точности полученных результатов. *Сборник научных трудов по итогам международной научно-практической конференции «Новые технологии и проблемы технических наук»*. Красноярск, 2014. С. 112-114.
11. Пилипенко А.М., Тарасенко Г.В. Численный анализ динамики генератора хаотических колебаний для сверхширокополосной связи. *Scientific Researches and Their Practical Application. Modern State and Ways of Development '2014. 1-12 October 2014, Одесса, Украина, изд-во SWorld*. С. 1-11. URL: <https://www.sworld.com.ua/konfer36/102.pdf>
12. Григорьев Е.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В., Анагностопулос А.Н., Милиу А.Н. Генератор хаоса на полевом транзисторе. *Успехи современной радиоэлектроники*. 2008. № 1, с. 32-36.
13. Григорьев Е.В., Дмитриев А.С., Ефремова Е.В., Кузьмин Л.В. Генератор хаоса на полевом транзисторе. Математическое и схемотехническое моделирование. *Радиотехника и электроника*. 2007. Т. 52. № 12, С. 1463-1471.
14. Wang Chun-Hua, Xu Hao, Wan Zhao, Hu Yan. A Colpitts chaotic oscillator based on metal oxide semiconductor transistors and its synchronizaiton research. *Acta Phys. Sin*. 2013, 62(20): 208401. DOI: <https://doi.org/10.7498/aps.62.208401>
15. V. S. Osadchuk, A. V. Osadchuk, A. A. Semenov and E. A. Semenova. Experimental research and simulation of microwave oscillator based on structure of static inductance transistor with negative resistance. *2010 20th International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*, 13-17 Sept. 2010, Sevastopol, Ukraine, pp. 187-188. DOI: <https://doi.org/10.1109/CRMICO.2010.5632543>
16. A. Semenov. Mathematical model of the microelectronic oscillator based on the BJT-MOSFET structure with negative differential resistance. *2017 IEEE 37th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 18-20 April 2017, Kyiv, Ukraine, pp. 146-151, DOI: <https://doi.org/10.1109/ELNANO.2017.7939736>
17. Andriy Semenov, Oleksandr Osadchuk, Olena Semenova, Serhii Baraban, Oleksandr Voznyak, Andrii Rudyk, Kostyantyn Koval. Research of Dynamic Processes in the Deterministic Chaos Oscillator Based on the Colpitts Scheme and Optimization of Its Self-oscillatory System Parameters. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) *Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies*, vol. 48. Springer, Cham. 21 June 2020, pp. 181-205. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-43070-2\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-030-43070-2_10)
18. A. Semenov, O. Osadchuk, O. Semenova, O. Bisikalo, O. Vasilevskiy, O. Voznyak. Signal Statistic and Informational Parameters of Deterministic Chaos Transistor Oscillators for Infocommunication Systems. *2018 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications. Science and Technology (PIC S&T)*, 9-12 Oct. 2018, Kharkiv, Ukraine, pp. 730-734, DOI: <https://doi.org/10.1109/INFOCOMMST.2018.8632046>

**Semenov A.O., Semenova O.O., Pinaiev B.O., Kulas R.O., Shpylovyi O.O. MATHEMATICAL MODELING OF THE DYNAMIC CHAOS MODE OF ELECTRICAL OSCILLATIONS IN THE COLPITTS OSCILLATOR BASED ON THE MOSFET**

*The radio-electronic oscillator of dynamic chaos according to the Colpitts scheme is the main element of nonlinear electronics. It has become widespread as a source of stable chaotic oscillations in ultrawideband communication systems. The dynamic chaos oscillator according to the Colpitts scheme is used at low frequencies, medium frequencies, high frequencies, and ultra-high frequencies. This is due to the simplicity of the circuit and the unique properties of its self-oscillating system. Therefore, the dynamic chaos oscillator according to the Colpitts scheme attracts much attention from researchers. There are a huge number of publications. In these publications, the dynamic characteristics, circuitry, and design features of the Colpitts oscillator based on a bipolar transistor are comprehensively investigated. Less attention was paid to the study of the Colpitts oscillator based on operational amplifiers, integrated circuits, and the possibility of its implementation by means of digital circuitry, including programmable integrated circuits. At the same time, little attention was paid to the Colpitts oscillator based on field-effect transistors. The paper presents the results of a study of the chaotic dynamics of the Colpitts oscillator based on the MOSFET. New circuit versions of the Colpitts oscillator of dynamic chaos based on a MOSFET with symmetrical and asymmetric power supply are considered. A mathematical model of the Colpitts oscillator of dynamic chaos based on a MOSFET is substantiated. The results of mathematical modeling are obtained. An analysis of the phase portraits of the self-oscillatory system of the generator in the planes of dynamic variables has been carried out. The amplitude-frequency generated chaotic oscillations are presented. The statistical parameters of the generated chaotic oscillations are calculated. A comparative analysis of the Colpitts oscillator of dynamic chaos based on a MOSFET with the Colpitts oscillator of dynamic chaos based on a bipolar transistor, which is widely used in modern radiofrequency engineering and telecommunication systems, is carried out.*

**Key words:** *dynamic chaos, Colpitts oscillator, MOSFET, mathematical model, phase portrait.*

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 621.941

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/08>

**Алексієнко Г.В.**

ТОВ НВФ «Вест Лабс ЛТД»

### ПРИСТОСУВАННЯ ДЛЯ ПОДАЧІ ЗАГОТІВЛІ В ЗОНУ ОБРОБКИ ТОКАРНИХ ТА ТОКАРНО-ФРЕЗЕРНИХ ВЕРСТАТІВ З ЧПУ

У статті описано пристосування для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ. Описано необхідність використання механізму подачі прутка у зону обробки. Наголошено, що у рамках сучасного виробництва модернізація токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ полягає у скороченні часу яке займає подача та встановлення прутка в патроні верстата. Визначено недоліки барфідера, як головного сучасного податчика прутка, що являє собою гідродинамічний пристрій, який має спеціальний магазин (накопичувач) для подачі заготовок. Запропоновано для мілко серійного та середньо серійного виробництва застосування механізму пружинного типу, розташованого в інструментальній голові верстата, що є найбільш економічно вигідним. Описано головні вимоги, що пред'являються до пристосування для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ на металообробних підприємствах. Наголошено, що основна вимога до механізму подачі: забезпечення точності подачі прутка по довжині в необхідних межах після розтискання при заданій тривалості цього процесу протягом гарантованого періоду експлуатації. Описано схему по якій працює механізм пружинного типу, розташований в інструментальній голові верстата та наведено його конструкцію. Підкреслено, що реалізація принципу захвату здійснюється за рахунок пружин стискування та зазначається, що система пружинного типу для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ повинна мати можливість приймати велику партію прутків, подаючи їх на верстат один за одним, як того вимагає описаний вид верстатів з ЧПУ. Визначено низку принципів роботи описаного механізму та наголошено на питаннях, які обов'язково необхідно вирішити у процесі проектування механізму пружинного типу. Складено математичну модель приводу системи та наголошено на дотриманні швидкості роботи. У результаті дослідження підкреслено, що застосування механізму пружинного типу для подачі заготовлі збільшує ефективність роботи; збільшує загальну продуктивність праці для підприємства; зменшує загальні виробничі витрати; скорочує кількість відходів; збільшує вихід ліквідної продукції.

**Ключові слова:** подача, заготовка, пруток, обробка, технологічна лінія, токарний верстат, токарно-фрезерний верстат, числове програмне управління.

**Вступ та постановка завдання.** Сучасний розвиток наукової думки у сфері автоматизації виробничого процесу на базі металообробного обладнання направлено на розробку та вдосконалення механізмів, які здатні скоротити час роботи верстату відповідно до технологічного процесу та підвищити загальну продуктивність лінії. Модернізація токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ полягає у скороченні часу яке займає подача та встановлення прутка в патроні верстата. У зв'язку з цим, на машинобудівних підприємствах своє поширення набув податчик прутка або барфідер. Барфідер являє собою гідродинамічний пристрій, що має спеціальний магазин (накопи-

чувач) для подачі заготовок. З накопичувача заготовки подаються поштучно у спеціальні пластикові канали, які підібрані за розміром. Через ці канали прутки за допомогою штовхача подається у порожнистий (наскрізний) шпindel токарного верстата та затискається у приймальній цангі токарного верстата. Для регулювання довжини подачі прутка до верстата застосовують спеціальний упор.

Недоліком використання барфідера, у першу чергу, є його висока вартість та виробнича площа, яку займає обладнання, другим негативним фактом є експлуатаційні витрати та коштовне обслуговування обладнання. Барфідери вигідно застосову-

вати виключно для великосерійного виробництва. Для невеликих виробництв, де обмежені виробничі площі, або дрібні серії випуску деталей встановлення барфідерів не вигідно.

Для мілко серійного та середньо серійного виробництва найбільш економічно вигідним є застосування механізму пружинного типу, розташованого в інструментальній голові верстата.

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

Упродовж останніх років оприлюднено ряд праць, у яких досліджуються основні аспекти автоматизації верстатів з ЧПУ для серійного виробництва, їх розвиток, становлення та інноваційні відкриття у сфері металообробки.

В. В. Щербатих [1] розкрив доцільність автоматизації процесу подачі інструменту старих токарних верстатів. На основі проведеного дослідження автором підкреслено можливість модернізації старих токарних верстатів, так як продуктивність процесу може збільшитися в 2 рази.

Д. Ю. Каравай та О. С. Колодій [2] дослідили принципи проектування та програмування обробки на верстатах з ЧПУ. Навели низку показників що прямо впливають на ефективність від впровадження верстатів з ЧПУ. Також О.С. Колодій, С.В. Кюрчев, О.В. Сушко та О.О. Ковальов [3] описали механізми автоматичного управління процесами обробки металів різанням.

CAD-CAM технології проектування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК [4] описали О. А. Литвиненко, Ю. І. Бойко та В. А. Яновський авторами наведено поетапну послідовність проектування і виготовлення нової вдосконаленої (модернізованої) деталі замість зношеної, можливості та переваги сучасних програмних комплексів CAD-CAM, технологічні можливості обладнання з ЧПК.

У роботі [5] проаналізовано способи обробки сферичних поверхонь фасонними різцями, копіюванням профілю, на верстатах з ЧПУ, огинанням та обкатним фрезеруванням. Для кожного способу наведена схема обробки з описом процесу та виділені переваги й недоліки. Встановлено граничну шорсткість поверхні, обробленої кожним зі способів та проведено порівняння продуктивності на прикладі неповної сферичної деталі гіроскопу. Систематизовано способи обробки за їх універсальністю.

У роботі [6] представлена класифікація п'ятиосьових верстатів та описані сфери їх застосування. Розглянуто переваги та проблеми п'ятиосьової обробки. Проаналізовано сучасні методи підвищення її ефективності.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: Kozak Nikolay & Stas Anna & Obukhov Alexander [7], Fatriyana Maya [8], Agrisa Herick [9], Sumiry Ts. Hisam [10], Andrade Alexander [11], Rastvorova I.I. & Klyucherev Nikita [12], Miscevic Milan & Dihovični Djordje [13], Elshakhs Yahia & Pudzs Mihails [14], Liberman Ya & Gorbunova L. [15] Zhilevski Marin & Mikhov Mikho & Zhilevska Madlena [16], A Arefin Utsho & Hosen Md & Hossain Riad & Ahamed Md & Hossan Farhad & Rahman Mizanur [17], Rocha Paulo & de Souza e Silva Rogério & Tostes Maria [18], Yinsheng Wan [19] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки, за темою, питання розробки та аналізу пристосування для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Здійснити розробку пристосування для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Подача прутка це один з механізмів переміщення заготовлі в робочу зону токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ. Останнім часом відбувається значна модернізація даних механізмів у зв'язку з необхідністю зниження витрат на виробництво та підвищення виробничої потужності. Це пояснюється тим, що на автоматах після подачі прутка до упору та його затиску зазвичай не досягається досить стабільне положення переднього торця, і тому для отримання точної довжини деталі доводиться додатково підрізати передній торець прутка, що призводить до зайвої витрати матеріалу, ріжучого інструменту, додаткових витрат часу.

В умовах металообробної промисловості до пристосування для подачі заготовлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ пред'являються наступні вимоги:

- забезпечення точності довжини прутка при взаємодії з іншими механізмами, що визначається відхиленням довжин деталей, відрізаних з поперечного супорта із прутка, поданого до упору (відсутність відскоку прутка);
- мінімізація часу подачі прутка до упору (швидкість);
- забезпечення осьової сили зчеплення, що виключає прослизання прутка під час подачі. Ця сила повинна бути обрана з умови подолання сумарних сил інерції та сил тертя прутка про напрямні, враховуючи запас на зношування;

- запобігання поломки механізму, наявність блокування при витраті прутка (поломка механізму може статися при подачі залишку прутка торцем патрона, що подає або цанги);
- довговічність та зносостійкість механізму;
- зручність та простота завантаження прутка в лінію шпинделя;
- зниження шуму при роботі прутка, що обертається.

Таким чином, основна вимога до механізму подачі: забезпечення точності подачі прутка по довжині в необхідних межах після розтискання при заданій тривалості цього процесу протягом гарантованого періоду експлуатації.

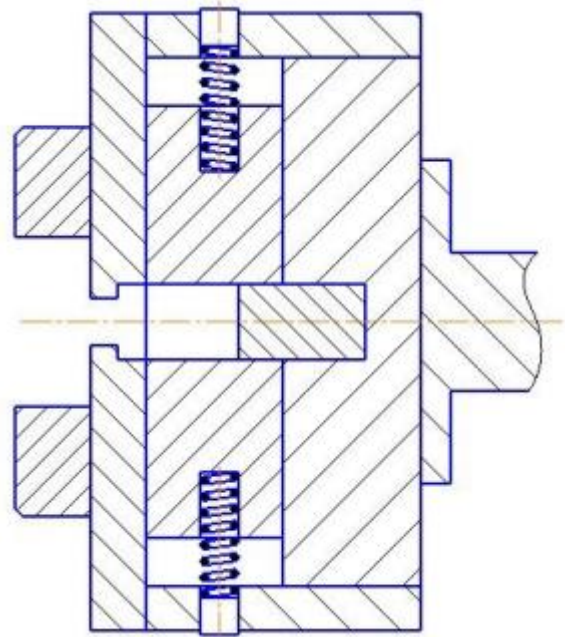
Механізм пружинного типу, розташований в інструментальній головці верстата працює по наступній схемі:

1. Механізм пружинного типу для подачі прутка встановлюється у інструментальну головку верстата;
2. При необхідності переміщення заготовки на певну довжину для продовження обробки верстат зупиняється;
3. Інструментальна головка підходить до дроту і механізм пружинного типу захоплює його;
4. Гідравлічний затискний пристрій токарного патрона верстата звільняє пруток;
5. Інструментальна головка переміщується вздовж осі Z, витягуючи пруток на певну довжину;
6. Після досягнення необхідного положення прутка, гідравлічний затискний пристрій токарного патрона верстата знову затискає його;
7. Механізм пружинного типу звільняє заготовку;
8. Інструментальна головка повертається у початкове положення.

Конструкція механізму пружинного типу для подачі заготовки в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ наведена на рисунку 1. Реалізація принципу захвату здійснюється за рахунок пружин стискування.

Система пружинного типу для подачі заготовки в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ повинна мати можливість приймати велику партію прутків, подаючи їх на верстат один за одним, як того вимагає описаний вид верстатів з ЧПУ. Обладнання призначене в основному для подачі прутка на токарний та токарно-фрезерний верстат механічної обробки та видалення решти необробленого прутка.

Головними принципами роботи описаного механізму пружинного типу є:



**Рис. 1. Конструкція механізму пружинного типу для подачі заготовки в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ**

- мінімізація циклу подачі до 30 секунд;
- мінімізація стоків мастила;
- простота експлуатації;
- робота з циліндричним прутком діаметром від 3 мм до 28 мм;
- робота з шестигранними стрижнями з максимальним розміром від 2,6 мм до 26 мм;
- контроль позицій установки числовим управлінням та їх оптимізація у процесі роботи;
- максимізація безпеки оператора та оточуючих людей на виробництві.

Головними питаннями у процесі проектування механізму пружинного типу полягають є:

- дослідження можливості використання відомих механізмів, їх максимальна оптимізація, підвищення продуктивності;
- вибір приводного двигуна, оскільки саме він відповідає за привід переміщення механізму;
- окремі об'єкти системи ті, що вимагають механічного налаштування, повинні бути розроблені з мінімальною кількістю гвинтів для затягування та ослаблення;
- налаштування системи переміщення пружинного механізму повинно виконуватися в цифровому вигляді за допомогою людино-машинного інтерфейсу.

Двигун приводу відповідає за переміщення пружинного механізму за допомогою ланцюгової передачі та відповідає за виконання наступних дій (етапів):

- 1) видалення частини прутка всередині верстата з ЧПУ;
- 2) центрування нового прутка, який потрібно прикріпити до пружинного механізму;
- 3) встановлення нового прутка у верстат із ЧПУ.

Час обробки заготівлі на токарних та токарно-фрезерних верстатах з ЧПУ має прямий вплив на час циклу обладнання, тому що саме система пружинного механізму подачі прутка задає основний темп щодо процесу і представляє найтриваліший час роботи в технологічному циклі.

Щоб оптимізувати тимчасові характеристики системи пружинного типу для подачі заготівлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ, швидкість виконання операцій повинна бути якомога вище, але це можна розглядати тільки для кроків 1 і 2, перерахованих вище. Крок 3 залежить від прутка, що подається (для прутків малого діаметра швидкість повинна бути меншою, для прутків великого діаметра швидкість може бути вищою). Якщо пруток має невеликий діаметр (від 3 мм до 12 мм), при виконанні верстатом кроку 3 з високою імовірністю пруток може деформуватися та пошкодити верстат. Але, якщо пруток має середній або великий діаметр (від 12 мм до 28 мм), то він може рухатися з середніми швидкостями без можливості пошкодити верстат.

Для оптимізації робочої швидкості необхідно підібрати приводний двигун, здатний здійснювати рух за необхідний встановлений час.

Математична модель приводу має вигляд:

$$\alpha_{max} = \frac{T_{вх.валу} \cdot \eta}{r_{н.диам.} \cdot m_{сис}} = \frac{T_{прив} \cdot m_{ред} \cdot \eta}{r_{н.диам.} \cdot m_{сис}}$$

$$T_{вх.валу} = T_{прив} \cdot m_{ред}$$

$$V_{max}^2 = V_0^2 + 2 \cdot \alpha_{max} \cdot \Delta S \Leftrightarrow \alpha_{max} = \frac{V_{max}^2 - V_0^2}{2 \cdot \Delta S}$$

$$V_{max} = \frac{n_{max} \cdot 2\pi \cdot r_{н.диам.}}{60 \cdot m_{ред}}$$

$$t_{1,min} = \frac{V_{max} - V_0}{\alpha_{max}}$$

$$t_{2,min} = \frac{\Delta S}{V_{max}} + t_{1,min}$$

$$\min f(t) = t_2$$

де  $\alpha_{max}$  – максимальне прискорення системи;

$T_{вх.валу}$  – крутний вихідного валу;

$\eta$  – продуктивність системи;

$T_{прив}$  – крутний момент приводу;

$m_{ред}$  – коефіцієнт редукції;

$r_{н.диам.}$  – початковий діаметр ланцюгового колеса;

$m_{сис}$  – маса системи;

$S$  – довжина приводу візка;

$n_{max}$  – максимальна кількість обертів двигуна;

$V_{max}$  – максимальна швидкість системи;

$V_0$  – початкова швидкість системи;

$t_1$  – час розгону;

$t_2$  – постійний час.

Наведена модель має деякі припущення:

1) приводний двигун має лінійну криву прискорення;

2) інерція, викликана кутовим рухом ланцюга, не враховується;

3) втрати на тертя, викликані підшипником і системою ковзання, не вважаються точними.

Однак продуктивність системи запропоновано з урахуванням втрат, згаданих у пунктах 2 та 3 вище. Таким чином, математична модель вказує на продуктивність системи 85% з огляду на попередні втрати. Це значення нижче очікуваного для системи, але модель вважається прийнятною.

Обладнання повинно мати великий робочий діапазон, пов'язаний з діаметром стрижнів, щоб задовольнити вимогу до діаметру (від 3 мм до 28 мм). Тому для підвищення продуктивності обладнання необхідно створити діапазони діаметрів стрижнів і відповідно до них формувати налаштування обладнання. Для забезпечення безперебійної роботи обладнання набір деталей був розділений на три великі робочі групи: А, В і В. Цей поділ впливає тільки на механічне налаштування, оскільки ці групи необхідно збирати та розбирати в обладнанні відповідно до експлуатаційної необхідності. Робочий діапазон трьох груп описано у таблиці 1.

Таблиця 1

Робочий діапазон трьох груп

Параметри	Робочі групи		
	А	Б	В
Діаметр напрямної	14	20	30
Робочий діапазон для циліндричного прутка	03-12	12-18	18-28
Робочий діапазон для шестигранного прутка	2,6-10	10-15,5	15,5-24

В умовах механічного налаштування можливі дві різні ситуації:

а) наступний набір прутків, що обробляються, лежить у тому ж діапазоні діаметрів, що і попередній,

б) наступний набір прутків, що підлягають обробці, не відповідає попередньому діапазону.

У разі виникнення ситуації (а) налаштування відбувається швидше, ніж у другому випадку, тому що є лише одна частина обміну. В першому випадку налаштування складається з налаштування деяких комплектів обладнання, таких як система стабілізації, система подачі та система відводу мастила.

Коли пруток, що подається, не поміщається в робочу групу деталей, (ситуація (б)), згідно таблиці 1, необхідно замінити частину комплекту деталей та виконати налаштування відповідно до початкового набору.

Для зміни робочих груп та виконання всіх механічних налаштувань розрахунковий час становить 15 хвилин, а для виконання лише механічних налаштувань розрахунковий час становить 6 хвилин. Для цифрових налаштувань (у людино-машинному інтерфейсі) складно оцінити час

виконання, оскільки дана операція може виконуватися швидко чи повільно. Тим не менш, гарантія гарної гнучкості у процесі забезпечується простим та інтуїтивно зрозумілим інтерфейсом.

**Висновки.** У роботі розроблено пристосування для подачі заготівлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ. Застосування механізму пружинного типу для подачі заготівлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ при обробці деталей збільшує ефективність роботи; збільшує загальну продуктивність праці для підприємства; зменшує загальні виробничі витрати; скорочує кількість відходів; збільшує вихід ліквідної продукції.

Перспективами подальшої роботи є проектування системи налаштування механізму пружинного типу для подачі заготівлі в зону обробки токарних та токарно-фрезерних верстатів з ЧПУ з урахуванням можливості виникнення ситуацій з різними наборами прутків.

#### Список літератури:

1. Щербатих В. В. Доцільність автоматизації процесу подачі інструменту старих токарних верстатів. «Інформаційні системи та комп'ютерно-інтегровані технології: ідеї, проблеми, рішення – 2021»: Матеріали І міжнародної науково-практичної конференції ІС та КІТ. 2021. С. 112-113. URL: [http://ir.znau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/11762/1/MimprkIC\\_2021\\_112-113.pdf](http://ir.znau.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/11762/1/MimprkIC_2021_112-113.pdf) (дата звернення: 21.02.2022).
2. Каравай Д. Ю., Колодій О. С. Проектування та програмування обробки на верстатах з ЧПУ. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі*: матеріали І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції (Мелітополь, 01- 24 квітня 2020 р.) / ТДАТУ: ред. кол. В. М. Кюрчев, В. Т. Надикто, О. Г. Скляр [та ін.]. Мелітополь: ТДАТУ, 2020. С. 316-318.
3. Колодій О.С., Кюрчев С.В., Сушко О.В., Ковальов О.О. Автоматичне управління процесами обробки металів різанням. Мелітополь: ТОВ «Люкс», 2020. 136 с.
4. Литвиненко О. А., Бойко Ю. І., Яновський В. А. CAD-CAM технології проектування та виготовлення деталей на верстатах з ЧПК. *Технічна інженерія*, 2020. № 1. С. 15-22.
5. Крейда Р. М., Сапон С. П., Канашевич Г. В. Аналіз способів обробки неповних зовнішніх сферичних поверхонь лезовим інструментом. *Технічні науки та технології*. 2020. № 2 (20). С. 89-99.
6. Бондарь І.В., Криворучко Д.В. Обзор современных методов пятиосевой обработки на фрезерных станках с чпу деталей сложных форм типа моноколесо из монолитной заготовки [Текст] / И.В. Бондарь, // Сучасні технології у промисловому виробництві: матеріали та програма V Всеукраїнської міжвузівської науково-технічної конференції, м. Суми, 17–20 квітня 2018 р. / редкол.: О.Г. Гусак, І.В. Павленко. – Суми: СумДУ, 2018. – С. 43.
7. Kozak N., Stas A., Obukhov A. Automation of the process of determining the errors of the installation of blanks for CNC machines in unmanned industries. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 709. P. 044061. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/709/4/044061> (date of access: 21.02.2022).
8. Fatriyana M. CNC program and programming of cnc machine. *Journal of Mechanical Science and Engineering*. 2020. Vol. 7, no. 1. P. 019–023. URL: <https://doi.org/10.36706/jmse.v7i1.37> (date of access: 21.02.2022).
9. Agrisa H. H. An Overview of process CNC Machining. *Journal of Mechanical Science and Engineering*. 2020. Vol. 6, no. 2. P. 029–033. URL: <https://doi.org/10.36706/jmse.v6i2.32> (date of access: 21.02.2022).
10. Sumiry Ts. Hisam. Conventional Clamping CNC Machine. 2020. [https://www.researchgate.net/publication/341256064\\_Conventional\\_Clamping\\_CNC\\_Machine](https://www.researchgate.net/publication/341256064_Conventional_Clamping_CNC_Machine) (date of access: 21.02.2022)
11. Andrade A. (cnc machining within manufacturing processes) web of science.2022. [https://www.researchgate.net/publication/358147751\\_cnc\\_machining\\_within\\_manufacturing\\_processes\\_webofscience](https://www.researchgate.net/publication/358147751_cnc_machining_within_manufacturing_processes_webofscience) (date of access: 21.02.2022).
12. Rastvorova I. I., Klyucherev N. A. Design and modelling of a universal CNC machine. *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. Vol. 1753, no. 1. P. 012040. URL: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1753/1/012040> (d



ate of access: 21.02.2022).

13. Miscevic M., Dihovicni D. Application of Robotics and CNC Machines in Production. *Applied Engineering Letters : Journal of Engineering and Applied Sciences*. 2020. Vol. 5, no. 4. P. 135–141. URL: <https://doi.org/10.18485/aeletters.2020.5.4.4> (date of access: 21.02.2022).

14. Elshakhs Y., Pudzs M. Communication System for Standardized Multipurpose CNC Machine. 2021. P. 1-5. URL: <https://doi.org/10.1109/AIEEE54188.2021.9670310>. (date of access: 21.02.2022).

15. Liberman Ya., Gorbunova L. Selection of Positioning Devices for the Components of CNC Machines. *Russian Engineering Research*. 2021. Vol. 41. P. 1067-1070. URL: <https://doi.org/10.3103/S1068798X21110204>. (date of access: 21.02.2022).

16. Zhilevski M., Mikhov M., Zhilevska M. Productivity Improvement in a Class of CNC Machine Tools. 2021. P. 214-218. URL: <https://doi.org/10.1109/ICAI52893.2021.9639792>. (date of access: 21.02.2022).

17. Evens R., Jost R., Evens R. Economic and utilization analysis of magnetic resonance imaging units in the United States in 1985. *American Journal of Roentgenology*. 1985. Vol. 145, no. 2. P. 393–398. URL: <https://doi.org/10.2214/ajr.145.2.393> (date of access: 21.02.2022).

18. da Rocha P. A. S., de Silva e Souza R. D., de Lima Tostes M. E. Prototype CNC machine design. *2010 9th IEEE/IAS International Conference on Industry Applications – INDUSCON 2010*, Sao Paulo, 8–10 November 2010. 2010. URL: <https://doi.org/10.1109/induscon.2010.5740068> (date of access: 21.02.2022).

19. Yinsheng W. Influence of CNC Tools on CNC Machining Technology. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 569. 032043. URL: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/569/3/032043>. (date of access: 21.02.2022).

#### **Aleksiienko H.V. DEVICES FOR SUPPLYING PROCESSES IN THE AREA OF TURNING AND CNC TURNING AND MILLING MACHINES**

*The article describes the device for feeding the workpiece in the processing area of lathes and CNC lathes. The necessity of using the rod feed mechanism in the processing zone is described. It is emphasized that in the framework of modern production the modernization of CNC lathes and lathes is to reduce the time it takes to supply and install the rod in the machine chuck. The disadvantages of the barfider as the main modern rod feeder, which is a hydrodynamic device that has a special store (drive) for feeding blanks. The use of a spring-type mechanism located in the tool head of the machine, which is the most cost-effective, is proposed for small-scale and medium-scale production. The main requirements for the device for feeding the workpiece in the processing area of lathes and CNC lathes at metalworking plants are described. It is emphasized that the main requirement for the feed mechanism: ensuring the accuracy of the rod length along the required limits after unclamping at a given duration of this process during the guaranteed period of operation. The scheme according to which the spring-type mechanism located in the tool head of the machine works is described and its design is given. It is emphasized that the principle of gripping is implemented by compression springs and it is noted that the spring-type system for feeding the workpiece in the processing area of CNC lathes and milling machines should be able to accept a large batch of rods, feeding them to the machine one after another. requires the described type of CNC machines. A number of principles of operation of the described mechanism are defined and the issues that must be resolved in the process of designing a spring-type mechanism are emphasized. A mathematical model of the system drive is compiled and the speed of work is emphasized. As a result of research it is emphasized that application of the mechanism of spring type for giving of preparation increases efficiency of work; increases the overall productivity for the enterprise; reduces total production costs; reduces the amount of waste; increases the yield of liquid products.*

**Key words:** feed, workpiece, bar, processing, production line, lathe, lathe, numerical program control.

**Баган Т.Г.**

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

**Бунь В.П.**

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

**Лаврушкін О.В.**

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

## **ВИКОРИСТАННЯ СПОСТЕРІГАЧІВ СТАНУ ДЛЯ СИНТЕЗУ АЛГОРИТМІВ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ ДІАГНОСТИКИ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ВИПАРНИМ АПАРАТОМ**

*У статті досліджено синтез алгоритму функціональної діагностики системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату з використанням спостерігачів стану.*

*Технологічне забезпечення якості функціонування системи управління методами виявлення і діагностики порушень полягає в контролі технічного стану системи з одночасною оцінкою параметрів. При оцінці технічного стану системи проводиться обробка спостережуваних сигналів, за результатами якої визначаються параметри, і приймається рішення про стан системи управління, класифікація і діагностика станів, оперативне відображення інформації про стан для контролю і управління. На підставі вимірів спостережуваних відгуків в режимі, що встановився або перехідному, при відомих (чи невідомих) вхідних величинах можна оцінити величини змінних, що характеризують стан процесу, і коефіцієнти моделі. Місцезнаходження порушення можна визначити точно, співвідносивши параметри моделі з фізичними особливостями процесу і використовуючи при цьому такі теоретичні закономірності, як масовий і енергетичний баланси. У міру розширення об'ємів автоматизації технологічних процесів і зростання вимог по технологічному забезпеченню якості функціонування об'єктів зростає значення контролю і діагностики. Завданнями спостереження є інформування про поточний стан процесу, повідомлення про небажані або неприпустимі відхилення в ході процесу і виконання відповідних заходів для підтримки нормальних режимів, відвертання ушкоджень або нещасних випадків.*

*Мета роботи полягає в створенні системи контролю та діагностуванню порушень в роботі системи керування багатокорпусним випарним апаратом, яка дозволяє вирішувати такі завдання: 1) власне виявлення, у процесі якого встановлюється сам факт появи відмови та в момент появи видається сигнал тривоги; 2) локалізації, або ідентифікації відмови. При вирішенні цього завдання визначається місце відмови, тобто елементи матриць параметрів, що змінилися внаслідок відмови; 3) Оцінювання впливу відмови на працездатність системи. Запропоновано підхід діагностування роботи системи керування з використанням спостерігачів стану. Сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі стану повного порядку. Розроблено структурну схему алгоритму діагностики відмов виконавчих механізмів. Результати проведених досліджень та імітаційне моделювання системи діагностування порушень показали, що застосування цієї системи дозволяє підвищити надійність та якість роботи системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату.*

**Ключові слова:** багатокорпусний випарний апарат, функціональна діагностика, спостерігач стану, аналітична модель.

У міру розширення обсягів автоматизації багатокорпусних випарних апаратів та зростання вимог до надійності, безпеки та якості їх функціонування зростає значення контролю та діагностики. Завданнями спостереження є інформування про поточний стан процесу, повідомлення про

небажані або неприпустимі відхилення в ході процесу та виконання відповідних заходів для підтримання нормальних режимів, запобігання пошкодженням або нещасним випадкам. При цьому виділяється кілька видів контролю: 1) контроль обмежень: безпосередньо вимірювані величини

піддаються перевірці з виходу межі допустимих значень і видаються сигнали тривоги; 2) автоматичний захист: при небезпечних станах процесу система контролю обмежень автоматично запроваджує заходи для переведення процесу у нормальний стан; 3) контроль з діагнозом помилок: за змінними величинами розраховуються ознаки, виробляються симптоми, проводиться діагностика та виробляються рішення щодо запобігання виниклому порушенню.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій

За висновками останніх досліджень та публікацій для вирішення вищеперелічених задач пропонується використання наступних спостерігачів лінійних систем [1]:

1. Спостерігач з використанням прогнозу на один крок уперед (спостерігач Льюенбергера).

2. Спостерігач, який уточнює в наступний момент часу.

3. Спостерігач із узагальненою структурою.

Спостерігачі, які уточнюють в наступний момент часу мають вигляд [2]:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= (F - LCF)\hat{x}(k) + (G - LCG)u(k) + L_1y(k+1) + L_2y(k) \\ e(k) &= x(k) - \hat{x}(k) \\ e(k+1) &= (F - LCF)e(k) + (E - LCE)d(k) \end{aligned} \right\} (1)$$

Спостерігачі з узагальненою структурою мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \hat{x}(k+1) &= (F - L_1CF - L_2C)\hat{x}(k) + (G - L_1CG)u(k) + L_1y(k+1) + L_2y(k) \\ e(k) &= x(k) - \hat{x}(k) \\ e(k+1) &= (F - L_1CF - L_2C)e(k) + (E - L_1CE)d(k) \end{aligned} \right\} (2)$$

Аналіз літературних джерел показав, що максимальна надійність може бути отримана з використанням спостерігачів повного порядку [3].

### Синтез алгоритму функціональної діагностики відмов функціонування виконавчого механізму

Так як синтез спостерігача Льюенбергера повного порядку для невідомого входу неможливий, були сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі повного порядку типу (1) та (2). Так спостерігач повного порядку для невідомого входу (1) може бути синтезований за таких умов:

а)  $p \geq q$ ;

б)  $\text{rank } C = p, \text{rank } E = \text{rank } CE = q$ ;

в) четвірка  $(C, F, E - PE)$  має стійкі інваріантні нулі.

Спостерігач повного порядку для невідомого (2) входу може бути синтезований за таких умов:

а)  $p \geq q$ ;

б)  $\text{rank } C = p, \text{rank } E = \text{rank } CE = q$ ;

в) четвірка  $(C, F - LCF)$  детектується, де  $L$  є рішенням рівняння:

$$E - LCE = 0.$$

Рівняння динаміки для  $i$ -го спостерігача має вигляд

$$\hat{x}^i(k+1) = (F - L_1^iCF - L_2^iC)\hat{x}^i(k) + (G^i - L_1^iCG^i)u^i(k) + L_1^iy(k+1) + L_2^iy(k), \quad (3)$$

$$\text{де } G^i = [g_1 \dots g_{i-1} g_{i+1} \dots g_m], \quad (4)$$

$$u^i(k) = [u_1(k) \dots u_{i-1}(k) u_{i+1}(k) \dots u_m(k)]^T, \quad (5)$$

де  $u^i(k)$  – сигнал управління, сформований регулятором  $\bar{u}_j(k) = u_j(k) + a_j(k)$ , а  $a_j(k)$  залежить від типу відмови.

Динаміка помилки визначається рівнянням:

$$e^i(k+1) = (F - L_1^iCF - L_2^iC)e^i(k) + (E^i - L_1^iCE^i)d^i(k) + (G^i - L_1^iCG^i)a^i(k), \quad (6)$$

$$\text{де } e^i(k) = x(k) - \hat{x}^i(k), \quad (7)$$

$$E^i = [g_i E], \quad (8)$$

$$a^i(k) = [a_1(k) \dots a_{i-1}(k) a_{i+1}(k) \dots a_m(k)]^T, \quad (9)$$

$$d^i(k) = [\bar{u}_1(k)d_1(k) \dots d_q(k)]^T. \quad (10)$$

Динаміка помилки (6) не пов'язана з  $di(k)$ , якщо:

$$E^i - L_1^iCE^i = 0, \quad (11)$$

і  $L_1^i$ , що задовольняє (11) може бути знайдена тоді, коли:

$$p \geq q + 1; \quad (12)$$

$$\text{rank } C = p, \text{rank } E^i = \text{rank } CE^i = q + 1. \quad (13)$$

Якщо умови (12) та (13) виконуються, то  $L_1^i$  може бути знайдена шляхом використання декомпозиції сингулярного значення. Якщо пара  $(C, L_1^i F - CF)$  детектується, то як другий крок  $L_2^i$  може бути знайдена так,

щоб  $(F L_1^i - CF - L_2^i C)$  була стійкою матрицею, що забезпечує задовільні перехідні процеси. Вектор сигналу розходження, що формується за допомогою  $i$ -го спостерігача, є різницею між виходом реальної системи та виходом, який оцінюється за допомогою  $i$ -го спостерігача:

$$\bar{e}^i = y(k) - C\hat{x}^i(k) \quad (14)$$

Рівняння (3.85) описує всі типи відмов виконавчих механізмів. Наприклад, якщо  $v_i = g_i$ , де  $g_i$  –  $i$ -тий стовпець матриці  $G$  і  $a_i = -u_i$ , це означає повна відмова виконавчого механізму, якщо  $v_i = g_i$  і  $a_i = \text{const}$ , то моделюється відмова типу зміщення, якщо  $v_i = g_i$  і  $a_i = k_i - u_i$ , моделюється поломка тяги при постійному значенні  $k_i$ .

Передбачається, що в даний час можлива поява не більше однієї відмови. Для виявлення відмови виконавчого механізму необхідно синтезувати банк  $m$  спостерігачів для невідомого входу, у яких

$i$ -й керуючих вхід  $u_i(k)$  розглядається як невідомий вхід на додаток до невідомих входів  $d_i(k), \dots, d_n(k)$  для  $i$ -го спостерігача [4].

Структурна схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчого механізму наведена на рис. 1.

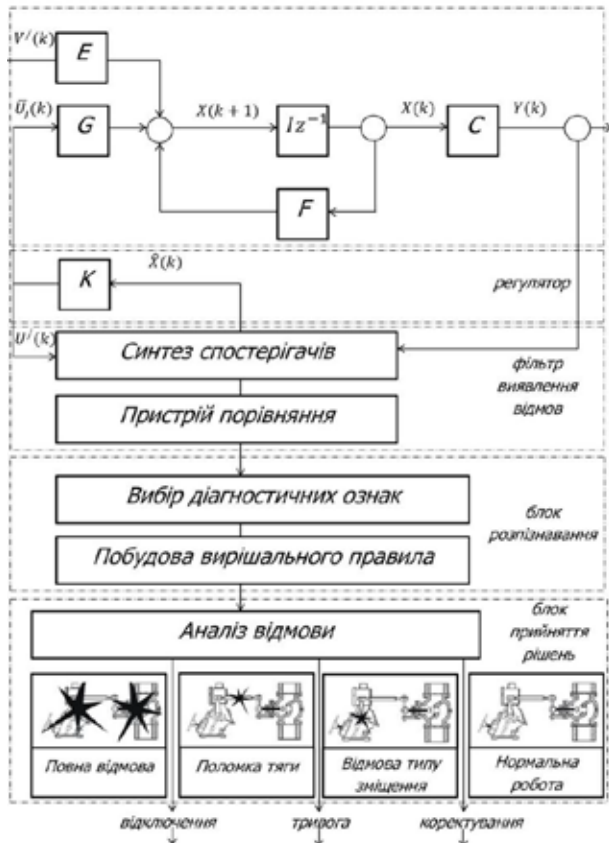


Рис. 1. Структурна схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчого механізму

Дослідження алгоритму розпізнавання порушень у системі управління багатокорпусним випарним апаратом (рис. 2).

Відповідно до схеми початковий розчин, що характеризується витратою  $F_0$  та концентрацією  $C_0$  надходить у перший корпус для випарювання. Випарювання здійснюється за рахунок нагрівання парою при температурі  $T_0$ . Другий розчин  $F_1$ , що залишився в першому корпусі, характеризується конденсацією  $C_1$ , температурою  $T_1$  подається в другий корпус. Випарювання у другому корпусі здійснюється при зменшеному тиску за допомогою вторинної пари, що утворюється у першому корпусі. Концентрація, що отримується при цьому розчину становить  $C_2$ . Нехай також  $W_1$  та  $W_2$  – втрати в обох апаратах.

Тоді, якщо врахувати матеріальний, елементарний та тепловий баланси для обох корпусів,

а також лінеаризацію отриманих рівнянь в околиці встановленого режиму, отримаємо систему рівнянь п'ятого порядку:

$$\left. \begin{aligned} x(k+1) &= Fx(k) + Gu(k) + Ed(k) \\ y(k) &= Cx(k) \end{aligned} \right\} \quad (15)$$

в якому вектори стану  $x$  управління  $u$ , виходу  $y$  та обурення  $d$  визначаються таким чином:

$$x = [W_1 C_1 T_1 W_2 C_2],$$

$$u = [F_1 F_2 T_3],$$

$$d = [F_0 C_0],$$

а матриці  $A, G, C, E$  мають вигляд

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -0.0013 & 0 & 0 \\ 0 & 0.98 & 0.0005 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.562 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -0.0014 & 1 & 0 \\ 0 & 0.046 & 0.0021 & 0 & 0.97 \end{bmatrix},$$

$$G = \begin{bmatrix} -0.5 & 0 & -0.00033 \\ 0 & 0 & 0.00013 \\ 0 & 0 & 0.619 \\ 0.458 & -0.5 & -0.00035 \\ -0.295 & 0 & 0.00055 \end{bmatrix},$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad E = \begin{bmatrix} 0 & 0.5025 \\ 0.031 & -0.066 \\ 0 & -2.744 \\ 0 & -0.0027 \\ 0.0007 & -0.0057 \end{bmatrix}.$$

Тоді рівняння спостерігачів повного порядку мають наступний вигляд:

$$\hat{x}^i(k+1) = (F - L_1^i C F - L_2^i C) \hat{x}^i(k) +$$

$$+ (G^i - \hat{L}_1^i C G^i) u^i(k) + L_1^i y(k+1) + L_2^i y(k),$$

для  $i=1, 2, 3$ .

Відповідно (11) динаміка помилки не пов'язана з  $d^i(k)$ , якщо:

$$E^i - L_1^i C E = 0.$$

Матриці  $L_1^i$  отримаємо за допомогою сингулярного розкладання матриці  $E^i$  [5]. Матриці  $L_2^i$  отримаємо шляхом вирішення рівняння Ріккати [6]:

$$(F - L_1^i C F) P + P (F - L_1^i C F) + Q - P C^T R^{-1} C P = 0;$$

$$L_2^i = P C^T R^{-1}, i=1,2,3.$$

$$Q = 0.1 I_5, R = I_5.$$

Для простоти невід'ємний критерій якості може бути пов'язаний із  $i$ -м спостерігачем:

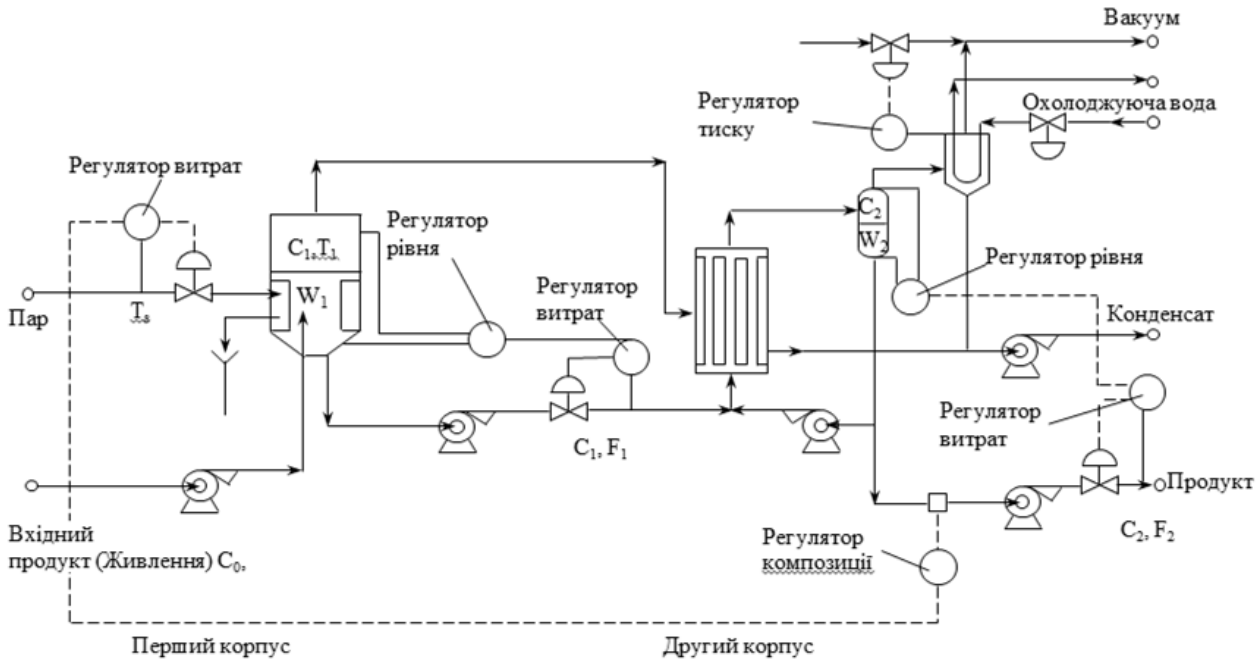


Рис. 2. Схема багатокорпусного випарного апарату

$$S^i(k) = |e_1^i| + |e_2^i| + |e_3^i| + |e_4^i| + |e_5^i|, \quad (16)$$

Якщо відмовив  $i$ -й виконавчий механізм і відповідний вектор випадок  $v_i = g_i$ , динаміка помилки  $i$ -го спостерігача, не змінюється з відмовою, так як

$$E^i - L_i^j C E^i = 0$$

$i$  помилка буде близька до нуля в стані. Отже, сигнал розходження  $S_i(k)$  також дорівнює нулю. З іншого боку, динаміка помилки  $j$ -го спостерігача,  $j \neq i$  у випадку (якщо  $g_j - L_j^i C g_j = 0$ ) залежить від сигналу  $a_i(k)$ , який залежить від типу відмови.

Таким чином сигнали розходження  $S_i(k)$ ,  $j \neq i$ , для  $j=1, \dots, m$  у загальному випадку відхиляються від нуля і від сигналу розходження, який близький до нуля, і виконавчий механізм, що відмовив, може бути ізольований.

### Моделювання різних видів відмов функціонування виконавчих механізмів

Схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчих механізмів створена в середовищі MatLAB за допомогою пакету Simulink наведена на рис. 3.

Проведено імітаційне моделювання наступних варіантів функціонування системи керування випарним апаратом:

Варіант 1- Моделювання роботи системи керування без відмов.

Варіант 2 – Моделювання повної відмови виконавчого механізму.

Варіант 3 – Моделювання роботи системи з відмовою типу «Зміщення».

Варіант 4 – Моделювання роботи системи з відмовою типу «Поломка тяги».

Варіант 5 – Моделювання роботи системи керування з багатьма відмовами.

Для прикладу детальніше розглянемо Варіант-4 – Моделювання роботи системи діагностики з відмовою типу «Пошкодження тяги».

Проаналізуємо графіки сумарних помилок  $S^1(k)$ ,  $S^2(k)$ ,  $S^3(k)$  та графіки передбачуваних помилок по  $X$  ( $x-x1$ ,  $x-x2$ ,  $x-x3$ ) рис. 4 – 7.

Як видно з графіків сумарної помилки, сумарна помилка для першого виконавчого механізму прагне нуля, тоді як інших виконавчих – відмінна від нуля. Ймовірна помилка по  $X$  прагне до нуля саме для першого виконавчого механізму. З усього вищесказаного робимо висновок, що відмовив саме перший виконавчий механізм і його можна ізольовати. Аналогічну картину отримаємо при виборі відмови другого та третього виконавчого механізму.

**Висновки.** В статті досліджено синтез алгоритму функціональної діагностики системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату з використанням спостерігачів стану. Створена імітаційна модель системи контролю та діагностуванню порушень в роботі системи керування багатокорпусним випарним апаратом. Сформульовані умови за яких можуть бути синтезовані спостерігачі стану повного

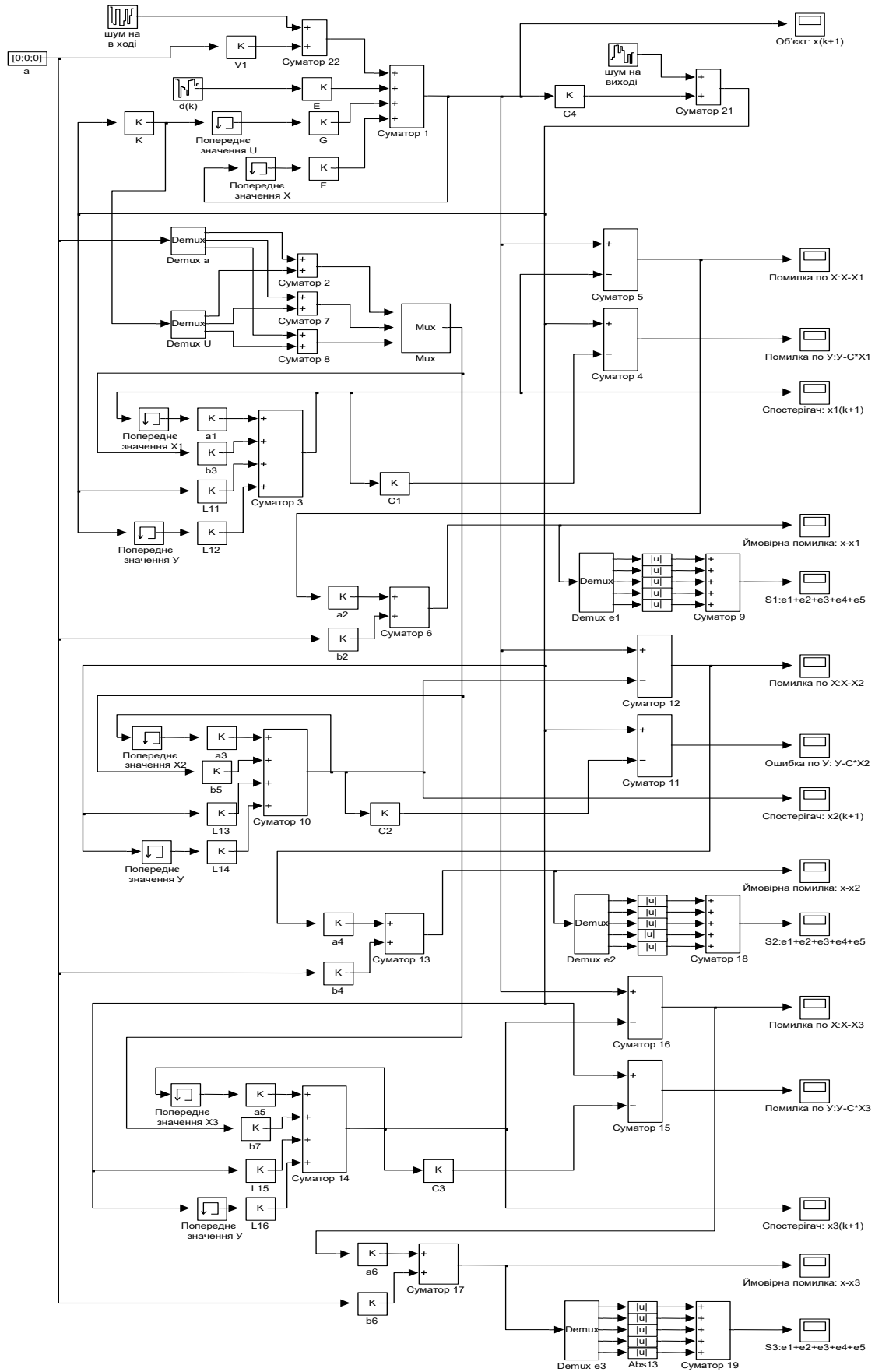


Рис. 3. Схема алгоритму діагностики відмов функціонування виконавчих механізмів

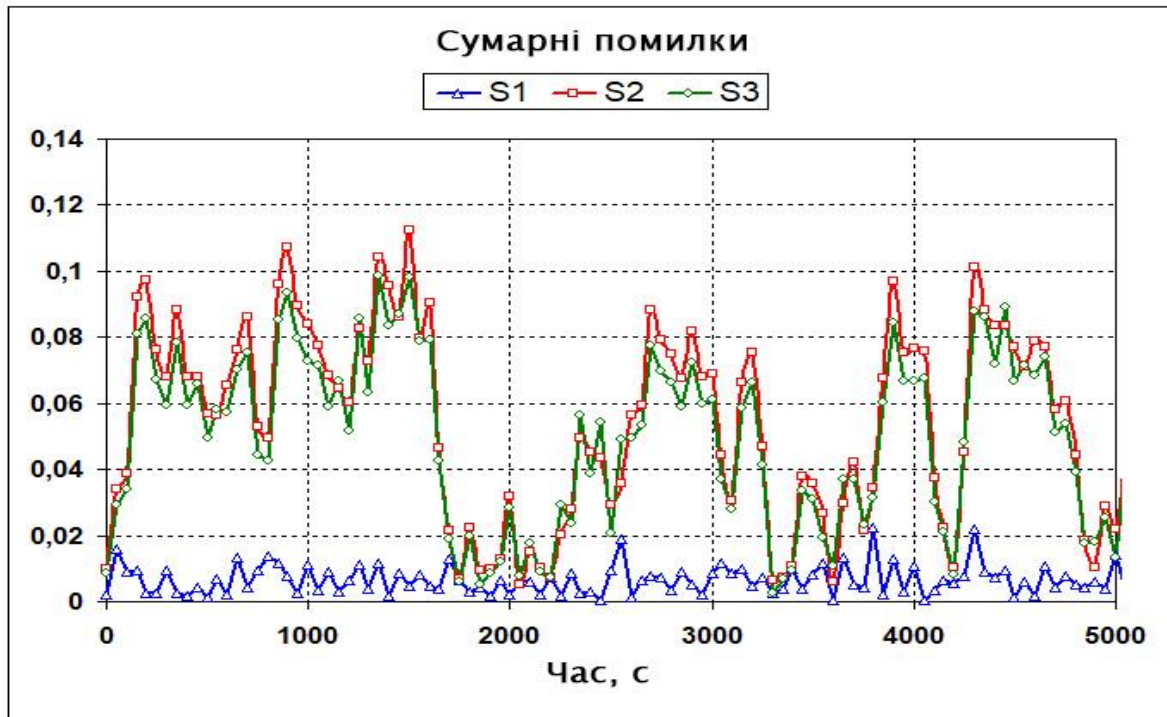
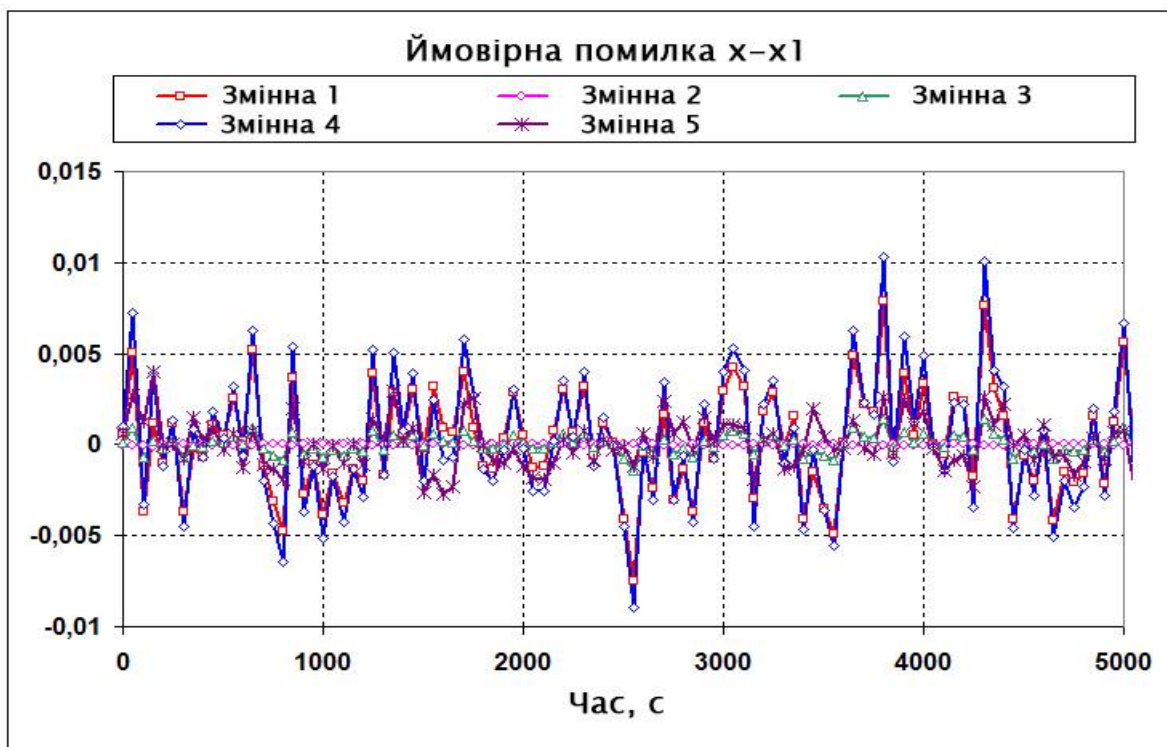


Рис. 4. Сумарні помилки

Рис. 5. Ймовірна помилка  $x-x_1$ 

порядку. Розроблено структурну схему алгоритму діагностики відмов виконавчих механізмів. Результати проведених досліджень та імітаційне моделювання системи діагностування порушень

показали, що застосування цієї системи дозволяє підвищити надійність та якість роботи системи автоматичного керування багатокорпусного випарного апарату.



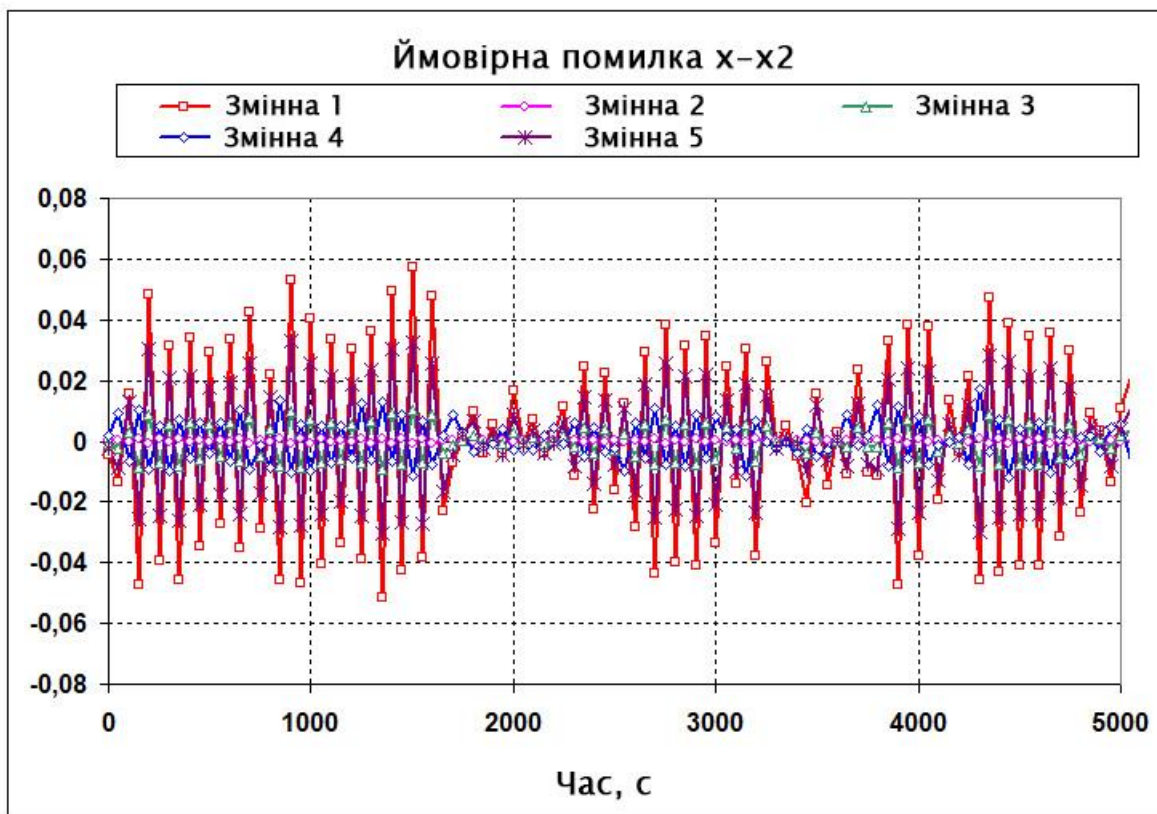


Рис. 6. Ймовірна помилка  $x-x_2$

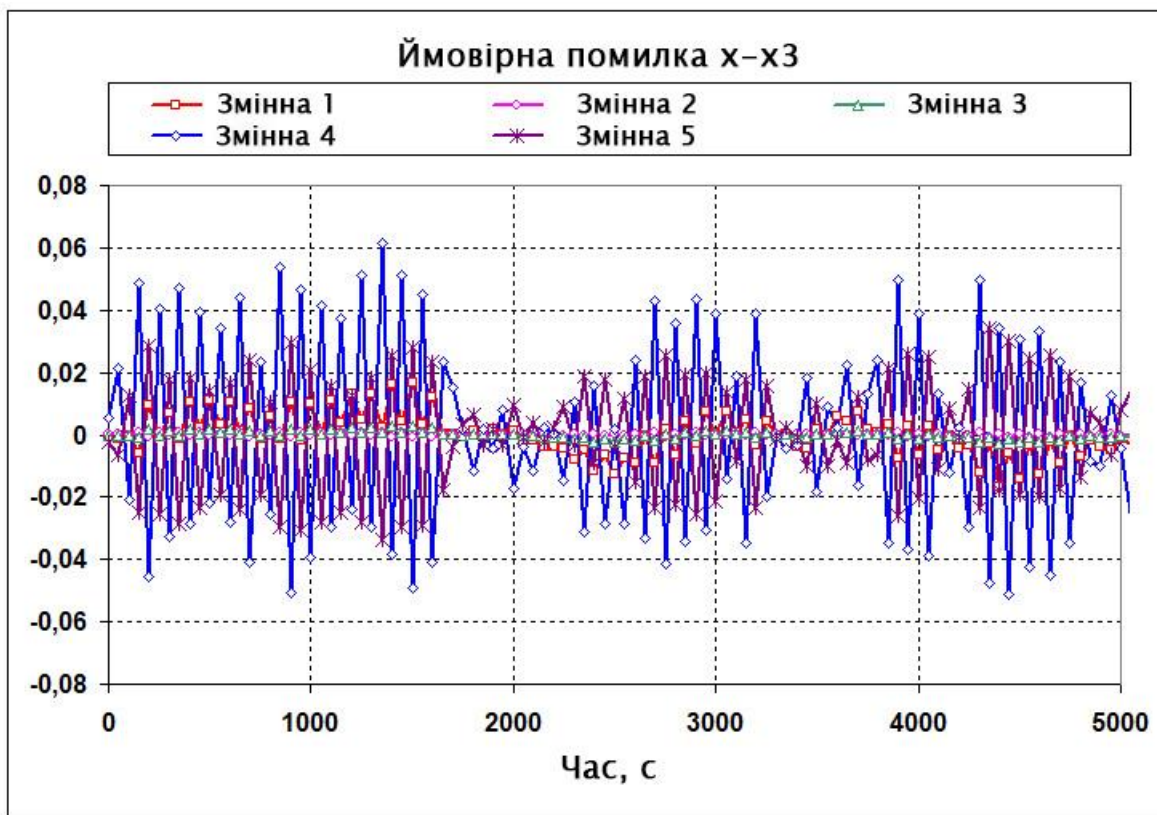


Рис. 7. Ймовірна помилка  $x-x_3$



**Список літератури:**

1. Golnaraghi F., Kuo B.C. Automatic Control Systems (10th Edition). New York: McGraw-Hill Education: 2017. 1160 p.
2. Ogata K. Modern Control Engineering (5th Edition). Boston: Prentice Hall. 2010. 905 p.
3. Dorf R.C. and R.H. Bishop. Modern Control Systems (13th Edition). Boston: Pearson. 2016. 1106 p.
4. Boun V., Bahan T., Herasyenko L. About one approach for choosing performance indices of functioning of human-machine systems. *Актуальные научные исследования в современном мире*. Переяслав. 2019. № 11 (55). С. 50-53.
5. Гантмахер Ф. Р. Теория матриц. 5-е изд. М.: Физматлит. 2004. 560 с.
6. Самойленко А.М., Перестюк М.О., Парасюк І.О. Диференціальні рівняння: Підручник. К.: Либідь. 2003. 600 с.

**Bahan T.H., Boun V.P., Lavrushkin O.V. USE OF STATUS OBSERVERS FOR SYNTHESIS OF ALGORITHMS OF FUNCTIONAL DIAGNOSIS OF EVAPORATOR CONTROL SYSTEM**

*The synthesis of the algorithm of functional diagnostics of the system of automatic control of the multihull evaporator with the use of state observers is investigated in the article. Technological quality assurance of the control system of methods of detection and diagnosis of violations is based on monitoring the technical condition of the system with simultaneous assessment of parameters. When assessing the technical condition of the system, the observed signals are processed, the results of which determine the parameters, and a decision is made on the state of the control system, classification and diagnosis of states, operational display of information on the state of control and management. Based on the measurements of the observed responses in the steady-state or transient mode at known (or unknown) input values, it is possible to estimate the values of the variables characterizing the state of the process and the coefficients of the model. The location of the violation can be determined accurately by correlating the parameters of the model with the physical characteristics of the process and using such theoretical laws as mass and energy balance. As the scope of automation of technological processes expands and the requirements for technological assurance of the quality of operation of facilities increase, the importance of control and diagnostics increases. The objectives of the monitoring are to inform about the current state of the process, to report undesirable or unacceptable deviations during the process and to take appropriate measures to maintain normal regimes, prevent damage or accidents. The purpose of the work is to create a control system and diagnose violations in the control system of the multi-body evaporator, which allows to solve the following tasks: 1) self-detection, which establishes the fact of failure and an alarm; 2) localization or identification of the failure. When solving this problem, the place of failure is determined, that is elements of matrices of parameters changed because of failure; 3) Assessment of the impact of failure on the efficiency of the system. An approach to diagnosing the operation of the control system using observers is proposed. The conditions under which observers of the state of complete order can be synthesized are formulated. The structural scheme of the algorithm of diagnostics of failures of executive mechanisms is developed. The results of research and simulation of the system for diagnosing disorders have shown that the use of this system can improve the reliability and quality of the automatic control system of the multi-body evaporator.*

**Key words:** multihull evaporator, functional diagnostics, status observer, analytical model.

**Баришич Л.М.**

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

**Баклан І.В.**

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

## ВИКОРИСТАННЯ РЕПЛІКАТОРНОЇ ДИНАМІКИ В ІГРАХ ЗІ ЗВОРОТНІМ ЗВ'ЯЗКОМ ЯК МОЖЛИВИЙ РОЗВИТОК КОЕВОЛЮЦІЙНОЇ ТЕОРІЇ ІГОР

*У наданій публікації було проаналізовано існуючі дослідження використання коєволюційної теорії ігор в контексті аналізу проблем біології на прикладі гри «голуб-яструб». В контексті вакцинації, було оглянуто розроблену модель осцилюючої еволюційної гри «трагедії спільноти». Оглянуто вектори використання подібних моделей для аналізу поведінки бактеріологічних культур.*

*Запропонована модель реплікаторної динаміки для ігор зі зворотнім зв'язком розглядає наслідки повторення, коли повторювані дії гри впливають на середовище. У таких повторюваних іграх виникають стратегії, які включають співпрацю, навіть якщо співпраця в іншому випадку є програшною в одноетапній або однокерованій версії гри. В оглянутій системі окремі агенти не грають один проти одного багаторазово або, кажучи по іншому, не “згадують”, як неодноразово грали проти один проти одного. Натомість гра, що розвивається із зворотним зв'язком, змінюється з часом як прямий результат накопичених дій агентів. До цього часу ми припускали, що навколишнє середовище може відновитися з майже виснаженого стану. Швидкість поновлення вважалася пропорційною частці кооператора. У цьому сенсі наша робота також вказує на нові можливості контролю – чи відновлення, чи обмеження ресурсів.*

*У цій публікації буде оглянуто єдиний підхід до аналізу та розуміння ігор, що розвиваються із зворотним зв'язком. Цей підхід називається винахідниками «коєволюційною теорією ігор», що позначає пов'язану еволюцію стратегій та середовища. Ключовою концептуальною інновацією цього підходу є розширення динаміки реплікатора, включаючи динамічні зміни навколишнього середовища. У цьому сенсі розглянутий підхід доповнює нещодавні спроби розглянути еволюцію виплат у фіксованому середовищі. Тут зміни в середовищі модулюють виплати. З таким припущенням, ми можемо аналізувати задачі, в яких індивідуальна поведінка агента є невід'ємним компонентом системи. Для вивчення конкретного випадку ми повертаємося до трагедії, що виникла у прикладі загального користування, і запитуємо: що станеться, якщо надмірне використання ресурсу змінить стимули для майбутніх дій гравців? Як було показано дослідниками, накопичений зворотний зв'язок з рішеннями може згодом змінити виплати, що призведуть до нових динамічних явищ та нових викликів для контролю.*

**Ключові слова:** теорія ігор, трагедія обцин, еволюційні ігри, коєволюція, реплікаторна динаміка.

**Постановка проблеми.** Одна з ключових проблем класичної теорії ігор полягає в тому, що гравці максимізують свою нагороду не зважаючи на глобальний максимум, що може бути досягнутий спільними зусиллями. Подібне явище ілюструє Трагедія спільного – ситуація з надмірним використанням суспільного блага що призводить до повного вичерпання ресурсів.

У цій публікації буде адресована та проаналізована проблема передбачення стану системи при припущенні раціональної поведінки агентів та зміни поведінки агентів при наблизенні до “спустошення” та “наповнення” системи.

З точки зору практичного використання, моделювання систем на основі циклічного реплікатора дозволяє зручніше виражати і досліджувати задачі де середа може впливати на зміну стратегій агентів.

Поєднання еволюційного да кооперативного підходу до теорії ігор дозволяє моделювати складні волатильні висококонкурентні системи (фінансові ринки чи епідеміологія, наприклад).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Коопераційні та коєволюційні ігри зростають у популярності у роботах стосовно еволюційної біології та економіки.

Ключове дослідження для цієї публікації – “An oscillating tragedy of the commons in replicator dynamics with game-environment feedback”, було опубліковано в листопаді 2016 року [1].

Це дослідження буде виділяє та характеризує новий клас коеволюційних ігор – осцилюючу трагедію спільноти та пропонує нові напрямки вивчення ігор де дії агентів мають вплив на середовище.

Також розвиток теорії ігор активно рухається у напрямку поєднання еволюційного та коаліційного підходів [2]. Коаліційно-еволюційна гра моделює ситуацію, де при еволюційній грі споглядається суперадитивність нагород.

При цьому розглядається дві гри, де коаліція розглядається як агент в еволюційній грі, а гравець – як агент в коаліційній [2].

**Формулювання цілей статті.** Мета публікації полягає в аналізі існуючої літератури і останніх досліджень та виділення основних векторів розвитку коеволюційної теорії ігор в контексті аналізу проблем розподілу дивідентів, трагедії спільноти та вакцинації.

У цій роботі буде розглянута реплікаторна динаміка для коеволюційної гри зі зворотнім зв'язком. Будуть досліджені коливання точки рівноваги агентів, що кооперуються.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Один із шляхів аналізу та подолання Трагедії спільного полягає у застосуванні еволюційної теорії ігор та модифікації реплікаторної динаміки до стану осциляції між станами “наповнення” та “спустошення”.

Теорія ігор ґрунтується на принципі, згідно з яким агенти обирають дії раціонально в контексті певних стимулів. На практиці стимули представлені у вигляді виплат, що залежать від обраної агентом стратегії. Еволюційна теорія ігор поширює теоретичні принципи гри на моделювання систем з динамічною зміною стратегій. Реплікаторна динаміка є однією з найчастіше використовуваних методологій побудови таких моделей [1]. При використанні рівняння реплікаторної динаміки частота зміни стратегій змінюються як функція соціального складу спільноти. Наприклад, у грі зі сніговими заметами (також відома як гра «яструб-голуб»), люди вибувають, коли кооперація між гравцями поширена, але вимушені співпрацювати, коли кооперація відсутня або рідкісна. Як наслідок, передбачається, що співпраця збережеться між часткою громади. Тоді як у дилемі ув'язненого окремі особи стимулюються до утримання від активних дій незалежно від поширен-

ності кооперації. Це призводить до панування «утримання».

Тут нас цікавить інший вид еволюційної гри, в якій індивідуальна дія змінює як соціальний склад, так і контекст середовища для подальших дій. Зворотній зв'язок, що залежить від стратегії, існує у всіх масштабах – від мікробів до людей у суспільних іграх та у дилемах ресурсів загального користування [3]. Серед мікробів зворотний зв'язок може виникнути через фіксацію неорганічних поживних речовин з огляду на виснаження запасів органічних поживних речовин, виробництво позаклітинних ферментів, що поглинають поживні речовини, таких як сидерофори, або ферментів, таких як інвертаза, що гідролізують дифузійні продукти, та вивільнення позаклітинних сполук антибіотиків [4]. Для суспільного блага виробництво змінюється, оскільки виробництво впливає на стан навколишнього середовища. Такий спільний вплив відбувається в людських системах, наприклад, коли люди вирішують робити вакцинацію чи ні [5]. Рішення не робити вакцинацію останнім часом пов'язують із спалахами дитячих інфекційних захворювань, які можна запобігти, у Північній Каліфорнії. Ці спалахи змінюють подальші стимули до вакцинації. Такі сполучені відгуки також виникають у дилемах щодо суспільних благ, що стосуються використання води чи інших ресурсів. У період поповнення ресурсів менше стимулів для стриманості. Однак надмірне використання в період повної доступності ресурсів може призвести до виснаження ресурсу та зміни стимулів [5].

**Модель еволюційної гри з реплікаторною динамікою зі зворотнім зв'язком.**

Ми розглядаємо модифіковану версію стандартної реплікаторної динаміки, де:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x(1-x)[r_1(x, A(n)) - r_2(x, A(n))], \\ \dot{n} &= n(1-n)f(x) \end{aligned} \quad (1)$$

У формулі  $f(x)$  позначає зворотний зв'язок гравців з навколишнім середовищем і додаток  $n(1-n)$  гарантує, що стан навколишнього середовища обмежений областю  $[0,1]$ . Значення  $\epsilon$  є властивістю агентів і позначає відносну швидкість, за допомогою якої окремі дії змінюють стан навколишнього середовища. Модель відрізняється тим, що матриця виплат  $A(n)$  залежить від навколишнього середовища, а стратегія та динаміка навколишнього середовища пов'язані між собою (див. Рисунок 1). Стан навколишнього середовища характеризується скалярним значен-

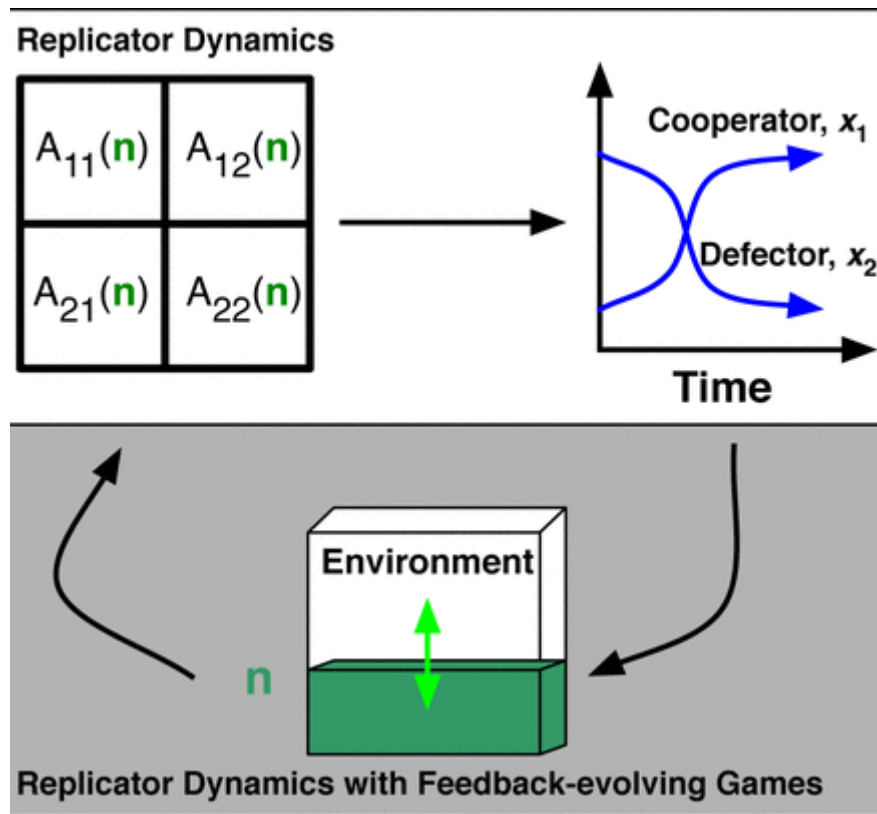


Рис. 1. Схематичне зображення реплікатора у середовищі зі стороннім зв'язком. Зліва зверху матриця виплат  $A$ , що задає залежні від частоти зміни в стратегіях. Справа – зміна стратегій за реплікатором. Знизу – динаміка середовище-реплікатор-стратегія

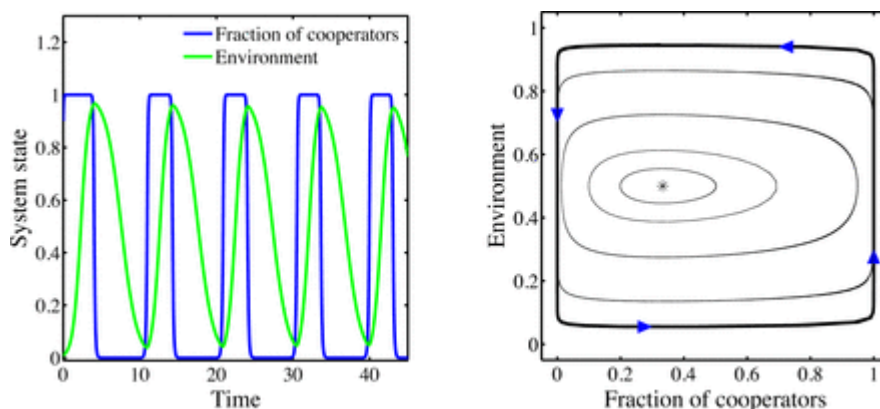
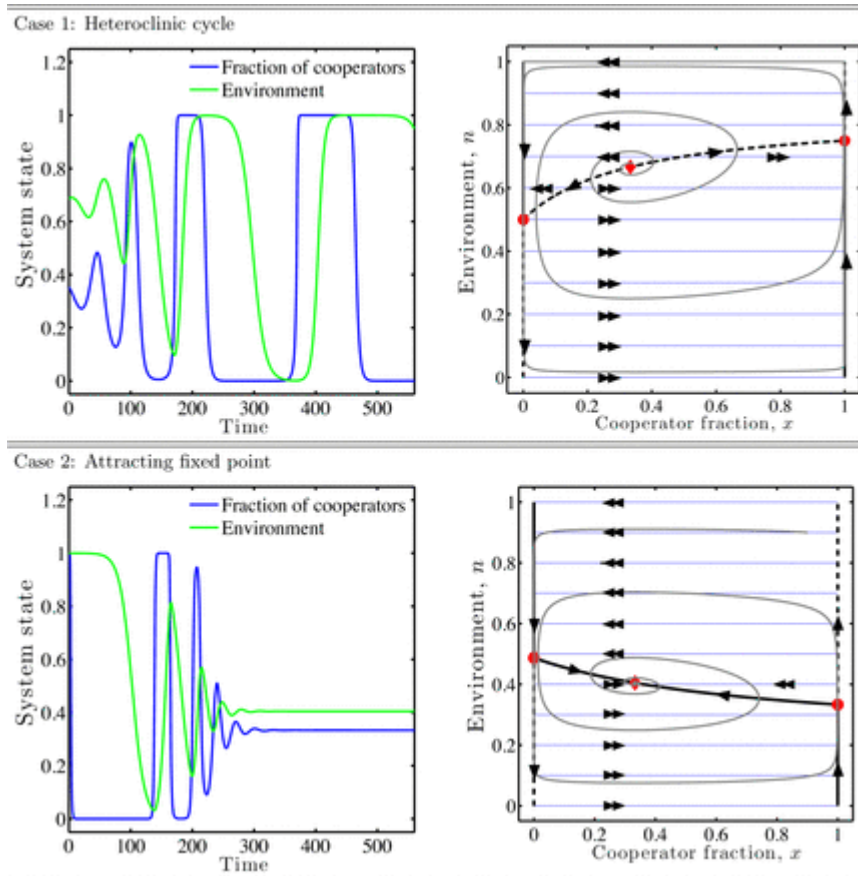


Рис. 2. Постійні коливання стратегій та середовища. Ліворуч – часовий ряд частки кооператорів  $x$  (синій) та стан середовища  $n$  (зелений) відповідають динаміці, що впливає з формули (3) з  $\varepsilon = 0,1$ ,  $\theta = 2$  та виплатами  $R = 3$ ,  $S = 0$ ,  $T = 5$  та  $P = 1$ . Праворуч – динаміка фазової площини системи  $x - n$ . Стрілки позначають напрямки динаміки з часом. Окремі криві відповідають початковим умовам  $(0,9,0,01)$ ,  $(0,8,0,15)$ ,  $(0,7,0,3)$ ,  $(0,5,0,4)$ ,  $(0,4,0,45)$ .

ням,  $n$ . Стан навколишнього середовища змінюється в результаті дій стратегів, так що знак  $f(x)$  позначає, чи збільшиться чи зменшиться  $n$ , що відповідає погіршенню чи покращенню навколишнього середовища, якщо  $f < 0$  або  $f > 0$  відповідно. Нарешті, швидкість екологічної динаміки

частково визначається безрозмірною кількістю  $\varepsilon$ , так що коли  $0 < \varepsilon \ll 1$ , то зміна навколишнього середовища є відносно повільною у порівнянні зі зміною стратегій.

При цьому матриця виплат має наступний вигляд:



**Рис. 3.** Швидка-повільна динаміка гри зі зворотнім зв'язком, де  $x$  та  $n$  це повільні та швидкі змінні відповідно – включаючи критичні розгортки та набуті динаміки. На обох діаграмах чорні лінії позначають критичні розгортки атракторів суцільними лініями а штриховкою – “відлякуючі” атрактори. Сині лінії та подвійні стрілки позначають очікувану швидку динаміку в межі  $\varepsilon \rightarrow 0$ . Червоні кола позначають точки біфуркації швидкої підсистеми, параметризовані  $n$ . Поодинокі стрілки позначають очікувану повільну динаміку. Сіра крива позначає набуту орбіту. В обох верхніх діаграма  $\varepsilon = 0.1$  and  $\theta = 2$ . Затухаючі коливання, що збігаються до гетероклінічного циклу виникають через седлоподібну біфуркацію швидкої підсистеми за параметром  $n$  з “відлякуючим” атрактором. Матриця виplat  $A$  задається формулою 21. Знизу – затухаючі коливання, що збігаються до гетероклінічного циклу виникають через седлоподібну біфуркацію швидкої підсистеми за параметром  $n$  з “притягуючим” атрактором. Матриця виplat  $A$  задається формулою 23

$$A(n) = (1-n) \begin{bmatrix} T & P \\ R & S \end{bmatrix} + n \begin{bmatrix} R & S \\ T & P \end{bmatrix} \quad (2)$$

При цьому ми вважаємо що  $R < S$  і  $T > P$ .

Тоді осцилююча модель буде мати такий вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= x(1-x) [\delta_{PS} + (\delta_{TR} - \delta_{PS})x] (1-2(n)), \\ \dot{n} &= n(1-n) [-1 + (1+\theta)x] \end{aligned} \quad (3)$$

При таких умовах існують п'ять фіксованих точок. Чотири з них представляють «граничні» нерухомі точки:

- 1)  $(x^* = 0, n^* = 0)$  – «уникаючі» стратегії в спустошеному середовищі;
- 2)  $(x^* = 0, n^* = 1)$  – «уникаючі» стратегії в наповненому середовищі;

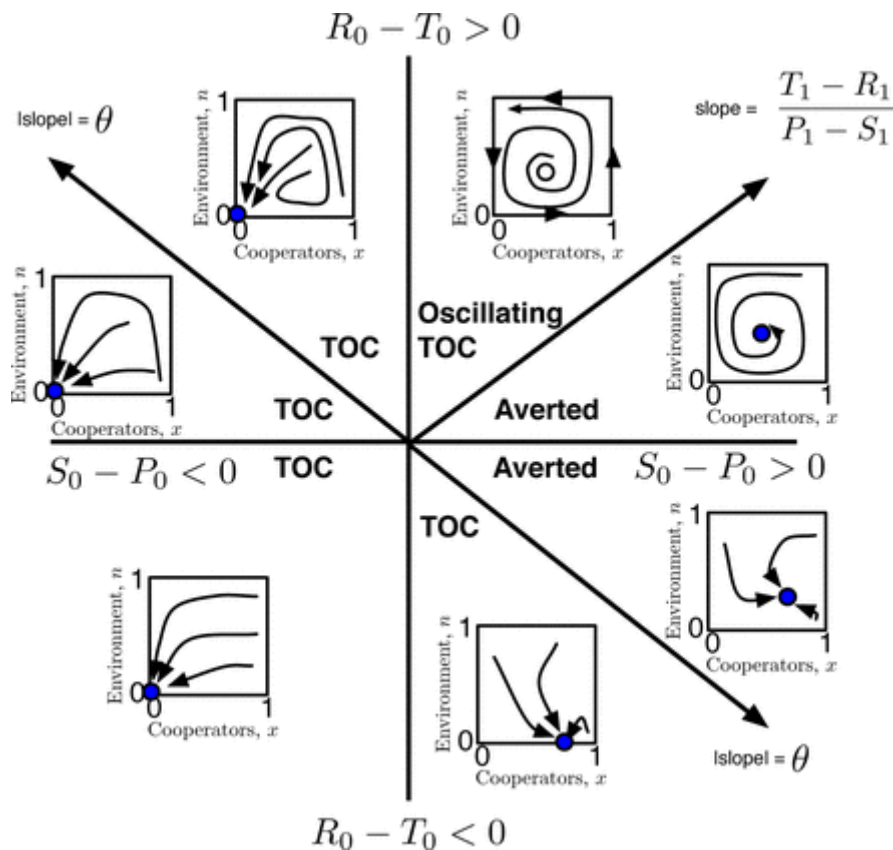
3)  $(x^* = 1, n^* = 0)$  – кооперативні стратегії в спустошеному середовищі

4)  $(x^* = 1, n^* = 1)$  – кооперативні стратегії в наповненому середовищі.

### Висновки

У наданій публікації було проаналізовано існуючі дослідження використання коеволюційної теорії ігор в контексті аналізу проблем біології на прикладі гри «голуб-яструб» в контексті вакцинації, було оглянуто розроблену модель осцилюючої еволюційної гри трагедії спільноти. Оглянуто вектори використання подібних моделей для аналізу поведінки бактеріологічних культур.

Поширення поточної моделі на мікробні та людські соціальні системи може поглибити розуміння короткострокових та довгострокових наслідків окремих дій у мінливому та мінливому середовищі



**Рис. 4.** Інваріантність динаміки системи з огляду на зміну відносної швидкості стратегії та динаміки навколишнього середовища. Параметр  $\varepsilon$  змінюється від 0,1 до 10 у тих випадках, коли очікується, що динаміка призведе до гетероклінічного циклу (зліва) та до внутрішньої нерухомої точки (праворуч). Хоча перехідна динаміка відрізняється, якісна динаміка залишається інваріантною щодо змін  $\varepsilon$

#### Список літератури:

1. Weitz J. S. An oscillating tragedy of the commons in replicator dynamics with game-environment feedback // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2016. URL: <https://www.biorxiv.org/content/10.1101/043299v2.full>.
2. Bissonette A. Coalitions in theory and reality: A review of pertinent variables and processes. URL: [https://escholarship.org/content/qt6zf593zz/qt6zf593zz\\_noSplash\\_8f4042abae1ade9ba432beec18e0f937.pdf?t=obxr66](https://escholarship.org/content/qt6zf593zz/qt6zf593zz_noSplash_8f4042abae1ade9ba432beec18e0f937.pdf?t=obxr66).
3. Frank, S. Foundations of Social Evolution // Princeton University Press, Princeton. 1998.
4. West, S. A., Griffin, A. S., Gardner, A. & Diggle, S. P. Social evolution theory for microorganisms. // Nat Rev Microbiol 4, 597–607 – 2006.
5. Bauch, C. T. & Earn, D. J. D. Vaccination and the theory of games. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. National Academy of Sciences of the United States of America 101, 13391–13394. 2004.
6. Stewart, A. J. & Plotkin, J. B. Collapse of cooperation in evolving games. // Proceedings of the National Academy of Sciences 111, 17558–17563. 2014.
7. Fazli M. A. Coalitional Game Theory URL: <http://ce.sharif.edu/courses/95-96/1/ce835-1/resources/root/Slides-Notes/5-CoalitionalGameTheory.pdf>.
8. Evolutionary Game Theory. Berlin: Springer, 2017.
9. Skibski O. The Stochastic Shapley Value for coalitional games with externalities // Games and Economic Behavior. 2018. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0899825617300726>.

**Baryshych L.M., Baklan I.V. REPLICATOR DYNAMICS WITH FEEDBACK-EVOLVING GAMES: TOWARDS A CO-EVOLUTIONARY GAME THEORY**

*The publication analyzes existing research on the use of coevolutionary game theory in the context of analyzing the problems of biology on the example of the game "pigeon-hawk" in the context of vaccination, reviewed the developed model of oscillating evolutionary game of community tragedy. Vectors of use of similar models for the analysis of behavior of bacteriological cultures are considered.*

*The proposed model of replicator dynamics for feedback games considers the effects of repetition when repetitive actions of the game affect the environment. Here, individual agents do not play against each other repeatedly or, in other words, do not "remember" how they have repeatedly played against each other. Instead, the game that develops with feedback changes over time as a direct result of the accumulated actions of agents. Until now, we have assumed that the environment can recover from an almost depleted state. The rate of recovery was considered proportional to the share of the cooperator. In this sense, our work also points to new opportunities for control – whether recovery or resource constraints.*

*This publication will look at a unified approach to analyzing and understanding games that develop with feedback. This approach is called by the inventors "coevolutionary game theory", which refers to the related evolution of strategies and environment. A key conceptual innovation of this approach is the expansion of the replicator dynamics, including dynamic changes in the environment. In this sense, this approach complements recent attempts to consider the evolution of benefits in a fixed environment [5]. Here, changes in the environment modulate payments. With this assumption, we can analyze problems in which the individual behavior of the agent is an integral part of the system. To study a specific case, we return to the tragedy that arose in the example of public use, and ask: what will happen if the overuse of the resource changes the incentives for future actions of players? As researchers have shown, the accumulated feedback from decisions can subsequently change payments, leading to new dynamic phenomena and new challenges for control.*

**Key words:** *game theory, community tragedy, evolutionary games, coevolution, replicator dynamics.*

**Гайдукевич С.В.**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
“Бережанський агротехнічний інститут”

**Семенова Н.П.**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
“Бережанський агротехнічний інститут”

**Леськів Я.А.**

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України  
“Бережанський агротехнічний інститут”

## КОНЦЕПЦІЇ «SMART ТЕХНОЛОГІЙ» ТА ЇХ ЗАСТОСУВАННЯ В ПРИМІЩЕННЯХ ЗАКРИТОГО ҐРУНТУ

*На керування технологічними процесами приміщень закритого ґрунту безпосередньо впливає нестационарна поведінка зовнішніх і внутрішніх факторів, тому теплиці для належного функціонування вимагають створення мікроклімату із певними заданими параметрами необхідними для створення сприятливих умов для росту рослин не залежно від умов зовнішнього середовища.*

*Підтримання оптимального мікроклімату потребує постійних технологічних, економічних та екологічних змін продиктованих змінами глобального світу.*

*Реалізація ефективних енергозберігаючих механізмів керування мікрокліматом на основі сучасних інтелектуальних технологій могла б задовільнити вирішення таких проблем.*

*На даному етапі розвитку у різноманітних технологічних процесах впроваджуються проекти, що реалізовані на концепціях Smart технологій.*

*За допомогою таких інтелектуальних і інноваційних технологій із доступом до Інтернет мережі поставлено задачу створити автоматичну систему, яка б на основі даних, отриманих із своїх середовищ, могла б контролювати технологічні процеси по створенню оптимального мікроклімату в теплиці.*

*Розроблено та виготовлено універсальну автоматичну систему керування електроустаткуванням, яка реалізує функції систем освітлення, опалення, вентиляції, доосвічування рослин, аудіо-відеоспостереження, водопостачання, керування електроприводом відкриття і закриття фрамуг, обліку витрат електроенергії на базі новітніх «розумних» пристроїв, які функціонально пов'язані між собою та об'єднані у єдину мережу з виходом в Інтернет. Керування процесами здійснюється за допомогою пульту, персонального комп'ютера та смартфона.*

*За результатами досліджень встановлено, що використання Smart технологій та запропонованого алгоритму роботи електричного обладнання дозволяє знизити використання теплової та електричної енергії, налагодити роботу всіх пристроїв так, щоб вони працювали злагоджено та взаємопов'язано між собою, що призводить до розширення меж самодіагностування, мінімізації втрат та надійності.*

**Ключові слова:** теплиця, система керування, Smart технології, мікрокліматичні параметри.

**Постановка проблеми.** У зимово-весняний період кожний з нас не проти поласуватися свіжими овочами і зеленню, потішитися різнобарв'ям квітів. Тому перед агропромисловим комплексом стоїть найважливіша задача – круглорічне задоволення потреб населення в продуктах рослинництва. Немаловажну роль у рішенні цієї проблеми відіграють споруди захищеного ґрунту, в яких можна створити сприятливі умови для росту рослин не залежно від стану зовнішнього середовища [1].

Але наскільки всім відомо, що для підтримання оптимального мікроклімату необхідно витратити великі кошти. І потреба в технологічних, економічних та екологічних змінах викликає інтерес [2, с. 18] до нових сучасних інтелектуальних технологій, що реалізують ефективні енергозберігаючі механізми керування, які одночасно містять системи діагностування, обробки інформації і контролю, що удосконалюють технологічний процес вирощування рослин та дозволяють зменшити витрати електроенергії. Вдосконалення



матеріальної бази має потребу на певному етапі в проривних технологічних інноваціях [3, с. 207], що спрямовують у напрямку надання інноваційної продукції та способам управління інтелектуальних властивостей, що виявляються в процесі їх використання [4, с. 470]. Але основна проблема упровадження концепцій Smart технологій в приміщеннях закритого ґрунту – це нестача коштів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Створення оптимального мікроклімату в спорудах закритого ґрунту є найважливішою та найскладнішою задачею в агропромисловому комплексі. Це питання активно розглядається як вітчизняними, так і зарубіжними науковцями. З цього приводу розроблено дуже багато методик.

Враховуючи розрахунки режимів роботи та коефіцієнти забезпеченості параметрів мікроклімату мета полягає в розробці науково обґрунтованого методу та автоматизованої системи по створенню, підтриманню та керуванню в приміщеннях закритого ґрунту температурно-вологісного і повітряного режимів в залежності від технологій вирощування та з мінімальною витратою енергоресурсів. Таким чином, стоїть питання у розробці, подальшому розвитку та створенню, на відміну існуючих, зовсім нової більш екологічно чистої та економічно-енергоощадної системи для забезпечення теплиць оптимальними мікрокліматичними параметрами, що дасть можливість забезпечувати суспільство високоякісною сільськогосподарською продукцією, як з найменшими витратами.

**Мета дослідження** – розробка та виготовлення універсальної автоматизованої системи для підтримання оптимального мікроклімату в спорудах закритого ґрунту на базі концепцій Smart технологій.

**Виклад основного матеріалу.** На сьогоднішній день дуже великих обертів набирає розвиток Smart технологій, зокрема, проекти Smart Cities, що означає «розумні міста», Smart Homes – розумні будинки, Smart Grid – розумні мережі та ін. Проблемами створення «розумних» міст, будинків, офісів, мереж зацікавилися не лише в Україні, але й за кордоном. Тому дуже активно реалізуються проекти щодо підготовки фахівців, які можуть бути творцями «розумних» [5] розробок. В агропромисловому комплексі теж можна було б використовувати такі розробки у виробничих процесах, а саме впровадження концепцій Smart технологій в приміщеннях закритого ґрунту. Всім відомо, що в часи розвинутого прогресу за допомогою інноваційних технологій показники

якості, надійності та швидкодії можна наблизити до світових показників. Крім того це призведе до зменшення витрат палива, електроенергії, забруднення навколишнього середовища та відкриє нові перспективи розвитку тепличних господарств та задовольнить сьгоднішні потреби людей. Тому основною проблемою теплиць при забезпеченні їх стабільного розвитку є об'єднання та узгодження таких складових, як енергозабезпечення, енергодоступність та енергозбереження.

Інтелектуальні інноваційні технології завдають нові підходи та принципи виконання технологічних процесів як в побуті, так в сільськогосподарських і промислових виробництвах. Сучасне «розумне» електрообладнання, телекомунікаційні, інформаційні та обчислювальні технології вдосконалюють процеси та їхні системи керування, які наділяються новими можливостями, а тим самим роблять їх ефективними, надійними, безпечними та саме головне спроможними економити електроенергію, що на сьогоднішній день так не маловажно. А це призводить до нагальної необхідності розробки нових стереотипів керування та залучення сучасних програм. Тобто в рамках концепції Smart технологій система автоматизації технологічних процесів в приміщеннях закритого ґрунту повинна розглядатися як єдина інформаційно-керуюча система, яка набирає статусу «розумної» та здатна забезпечити:

- гнучкість;
- багатофункціональність;
- мінімізацію витрат;
- зміну параметрів в режимі реального часу;
- надання широких меж керування;
- розширення спектру самодіагностування;
- самовідновлення в рамках дотримання надійності;
- забезпеченість повномасштабною інформацією.

За допомогою розумних приладів із доступом до Інтернету, що використовують вбудовані системи [6, с. 219] можна створювати безліч автоматичних систем, які на основі даних, що одержують із своїх середовищ будуть контролювати всіма технологічними процесами. Тобто всі електричні прилади, установки можна об'єднувати в єдину мережу, де вони будуть взаємодіяти між собою, та налаштовувати їх так, щоб вони працювали автоматично за заданою програмою, або відповідно змінам показів датчиків, з умовою, що комп'ютер повинен мати постійний вихід до Інтернет мережі. Протоколи підключення, мережеві зв'язки та комунікації, що використовуються

розумними пристроями, значною мірою залежать від певних використаних програм. Таким чином можна збирати, обробляти та надсилати дані до інших об'єктів, додатків чи серверів. Протоколи програми дозволяють цим об'єктам спілкуватися та обмінюватися даними [6, с. 222].

Враховуючи всі ці фактори було розроблено та виготовлено універсальну автоматичну систему керування електроустаткуванням (Рис. 1), на прикладі житлового будинку, яка реалізує задані функції на базі новітніх «розумних» пристроїв і складається з:

- системи освітлення;
- системи опалення;
- системи вентиляції;
- системи створення затишку;
- система аудіо-відеоспостереження;
- системи водопостачання;
- системи керування електроприводом;
- системи обліку витрати електроенергії.

Всі ці системи можна використати в приміщеннях закритого ґрунту.

За рахунок концепції Smart технологій всі перелічені вище системи функціонально пов'язані між собою та об'єднані у єдину мережу з виходом в Інтернет. Керування процесами передбачено за допомогою пульта, персонального комп'ютера та смартфона. Досліджено, що в такій системі всі пристрої працюють злагоджено, взаємопов'язано тому виникає можливість:

- ефективно економити енергоресурси;
- контролювати стан електропристроїв;

- підтримувати мікрокліматичні параметри в приміщенні;
- за заданою програмою або в реальному часі керувати роботою електропристроїв;
- забезпечити надійну охорону від ненормальних режимів роботи;
- задавати режими роботи електроустановок з будь-якого місця знаходження;
- регулювати потужність пристроїв, тобто створювати економний режим;
- одночасно виконувати керування роботою всіма електропристроями.

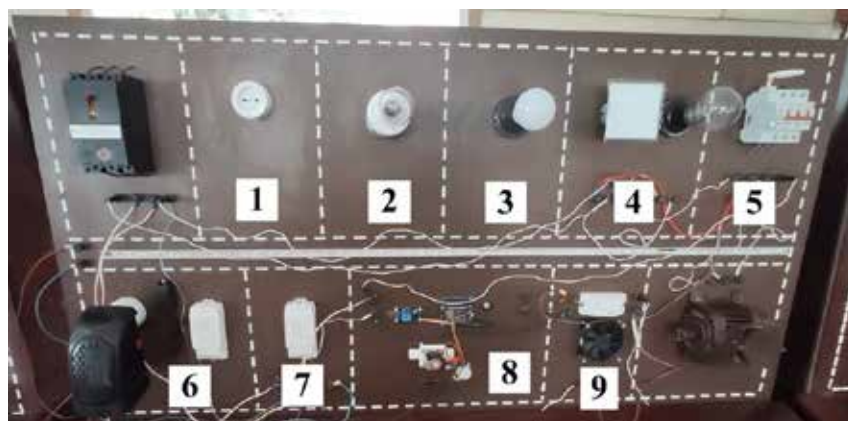
Ця система легко переналаштовується на любой режим роботи. Може працювати за рахунок датчиків, може робити в режимі реального часу, або підчинятися прописаному сценарію.

Підлаштовуючи цю систему під теплицю можна перевести її в статус розумної, що дозволить ефективніше використати ресурси, покращити енергетичні показники, підвищити якість продукції. Тобто створити теплицю нового типу, теплицю майбутнього де посилюється роль інформаційно насичених капітальних ресурсів, товарів, технологій, висококваліфікованих людських ресурсів, які не просто володіють великими обсягами сучасних знань [7, с. 89], але вміють їх реалізовувати та породжувати нові знання, які базуються на інформаційно-комунікаційних технологіях.

Порівняно з іншими галузями промисловості робота теплиць відрізняється специфікою виконання технологічних процесів і характеризується



а)

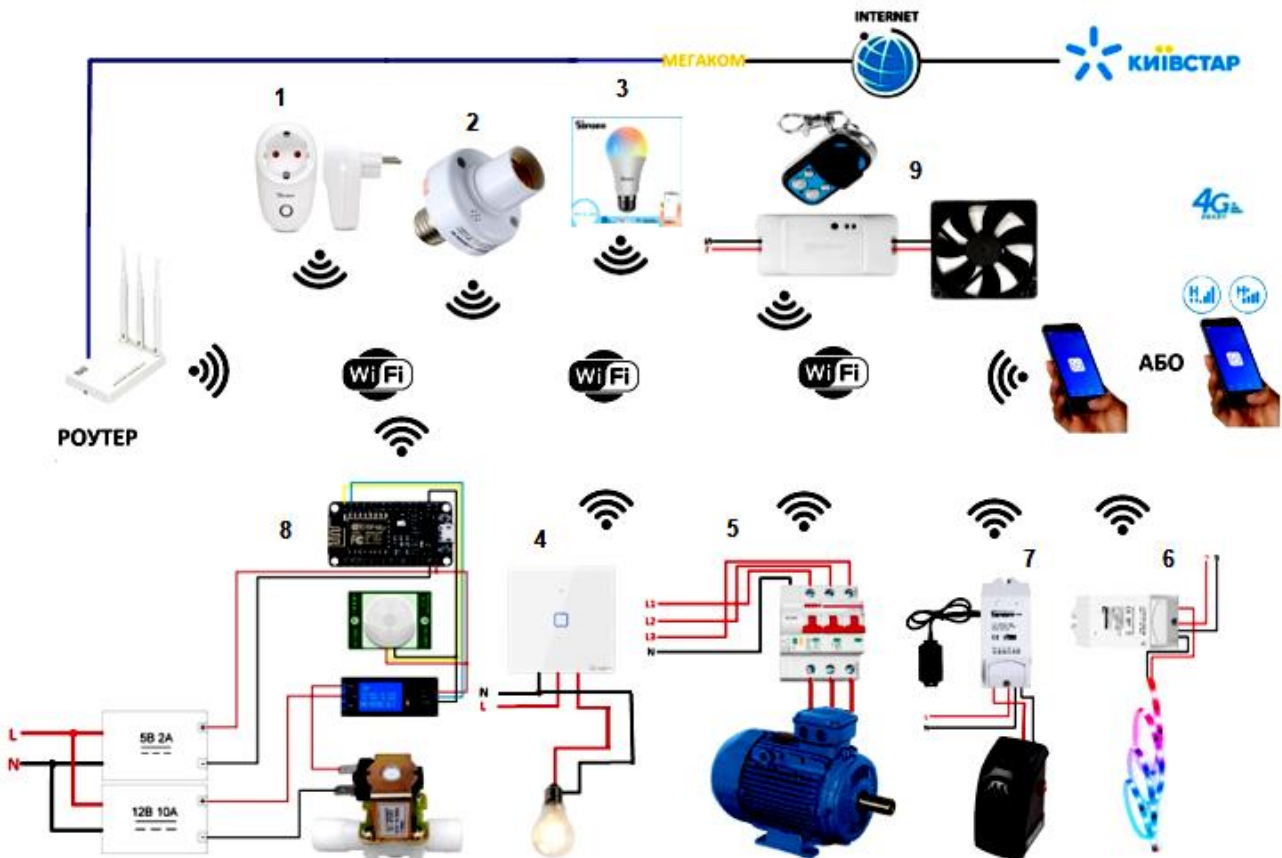


б)

**Рис. 1. Загальний вигляд автоматизованої системи керування**

а) 1 – Монітор сервера, ПК; 2 – Кнопка увімкнення/вимкнення живлення сервера, ПК, роутера; 3 – Кнопка увімкнення сервера, ПК; 4 – RFID сканер, для розблокування кнопки увімкнення сервера, ПК;

б) 1 – Sonoff S26; 2 – Sonoff Slampher; 3 – Sonoff Lamp; 4 – Sonoff TX 0EUIC; 5 – автоматичний вимикач HOCH ZJSB9-80Z; 6 – Sonoff TH10; 7 – Sonoff POW R2; 8 – ESP NodeMcu; 9 – Sonoff RF



**Рис. 2 – Підключення інтелектуальних пристроїв**

1 – смарт-розетка Sonoff S26, керує живленням камери; 2 – смарт-патрон Sonoff Slampher, має ті ж самі функції що й смарт-розетка Sonoff S26, але використовується для звичайної лампочки; 3 – смарт-лампа Sonoff Lamp, вкручується в звичайний патрон; 4 – смарт-вимикач Sonoff TX 0EU1C, керує лампою розжарення; 5 – смарт автоматичний вимикач HOCH ZJSB9-80Z, керує 3-х фазним електродвигуном; 6 – смарт реле Sonoff TH10 з датчиком температури і вологості повітря, керує обігрівною установкою; 7 – смарт реле Sonoff POW з вимірюванням в реальному часі напруги, струму, споживання електроенергії в "Вт", керує світлодіодною стрічкою, хоча можна його підключати до любого електропристрою; 8 – розроблений смарт-пристрій/реле на базі мікросхеми NodeMcu з PIR датчиком (датчик руху), керує електромагнітним клапаном подачі води; 9 – смарт реле Sonoff RF з радіо-пультом (крім смартфона і фізичної кнопки на самому пристрої ще також можна керувати живленням підключеного приладу/пристрою за допомогою радіо-пульту), керує вентиляційною установкою.

багатоопераційністю, трудомісткістю і швидкозмінністю, так як постійно залежить від впливу зовнішніх і внутрішніх факторів, що пов'язують між собою метеорологічні показники. Від правильного керування технологічними процесами теплиці залежить стабільність врожаїв, висока якість продукції. Так як статичні і динамічні характеристики деяких пристроїв і технологічних вузлів ускладнюють процес якісного керування, тому впровадження нових технологій при автоматизації процесів залежить від програмного забезпечення, що здатне приймати самостійні рішення та з заданою точністю підтримувати температурно-вологісний режим і економне споживання теплової та електричної енергії, а також залежить від протоколу, який служить для створення взаємозв'язку із сервером системи.

Розглянемо основні принципи, ознаки та технології які реалізовані в даній системі. Сутність створення системи полягає в тому, що перш за все прагнули забезпечити максимальну ефективність системи, створення зворотного зв'язку за рахунок інформаційно-комунікаційних технологій та можливість адаптації в любому середовищі, досягнути значної гнучкості в керуванні, по-друге намагались покращити якість керування технологічними процесами в наслідок інтеграції та реалізації концепцій Smart технологій, досягнення можливості дистанційного керування завдяки Інтернет мережі, надання адміністративних послуг на базі електронно-цифрових технологій, використання всебічної модернізації енергетичного обладнання шляхом впровадження інтелектуальних пристроїв, покращення стану обслуговуючого пер-

соналу за допомогою впровадження технічних новинок, що дозволяють функціонувати Інтернет ресурсам. Діло в тому, щоб бути актуальним у сучасному світі потрібно вміло використовувати новинки технічного, технологічного і інформаційного прогресу [8, с. 58].

Автоматизовану систему, яка сформована на концепціях Smart технологій, можна спрямувати на виконання конкретних дій. Тобто, розроблений і виготовлений системі керування електропристроями надано багато можливостей, порівняно з іншими автоматичними системами. Система одночасно збирає інформацію про стан оточуючого середовища, моніторить про якість показників, обробляє надану інформацію, удосконалює систему керування, розпізнає конкретні ситуації та реагує на них, здійснює керування згідно розробленим алгоритмам.

Використання розробленої системи надає можливість з заданою точністю регулювати мікрокліматичні параметри сучасної теплиці, не дивлячись на те, що параметри теплиці нестабільні, незадовільна динаміка із-за дії різноманітних факторів, тому від системи вимагається гнучкість керування, та ставляться підвищені вимоги.

Керування мікрокліматичними параметрами створюється за рахунок додатків eWelink, що дає можливість керувати всіма інтелектуальними пристроями, крім розробленого смарт-пристрою-реле на базі мікросхеми NodeMcu з PIR датчиком, тобто дані передаються у хмарну платформу через WiFi маршрутизатор і Home Assistant, який керує всіма пристроями і зосереджений на конфіденційності та локальному контролі. Home Assistant підтримує понад 1000 сервісів та апаратних засобів. Програма працює як концентратор для пристроїв і дозволяє контролювати все, чим можна керувати з одного місця. При цьому можна запрограмувати логічні послідовності виконання конкретних задач.

За допомогою мобільного додатку для користування месенджером Telegram, було розроблено Telegram БОТ і записано на веб-сервісі GitHub для керування системою, переналаштування програми, перегляду історії параметрів і подій за різні проміжки часу (день, тиждень, місяць), програмування необхідних сценаріїв, збір та обробка інформації, що подається від аналогових і дискретних датчиків, зберігання інформації, задання керуючих параметрів, візуалізація всіх технологічних процесів, обираючи найкращий алгоритмів керування та моніторинг параметрів мікроклімату в режимі реального часу.

Існує дуже багато схожих додатків для керування автоматизованих систем, але так як не існує стандартного методу керування та єдиного ідеального рішення, намагаючись вирішити поставлені задачі при розробці автоматичної системи керування, було використано платформу Home Assistant, яка відповідає наступним критеріям:

- доступність платформи;
- простота як в налаштуванні, так і в експлуатації;
- можливість підтримки необмеженої кількості пристроїв;
- можливість взаємодіяти з іншими платформами;
- надійність;
- гнучкість керування.

#### **Висновки.**

Впровадження енергоощадних новітніх технологій в приміщеннях закритого ґрунту дадуть можливість чіткого керування та контролю параметрів для створення оптимального мікроклімату. Розроблена і виготовлена універсальна система керування може об'єднувати всі системи теплиці в єдине ціле, тобто виконувати всі функції злагоджено і максимально ефективно, що дає можливість підвищити ефективність енергоспоживання, зменшити витрати, а тим самим зекономити кошти.

#### **Список літератури:**

1. Шишко В.О. Автореферат дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр» на тему: «Розробка системи мікроклімату в тепличних господарствах за умови використання сонячної енергії». Тернопіль: ТНТУ ім. Івана Пулюя, 2019. 11 с.
2. Кунанець Н., Пасічник В., Химич Г. Досвід реалізації проектів класу «розумне місто» на основі інформаційних і телекомунікаційних технологій. Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності, 2016. № 14. С. 17–37.
3. Воронжак П.В. Активізаційно-компенсаторний смарт-підхід щодо удосконалення організаційно-економічного інструментарію стратегії інноваційного розвитку промислового підприємства та його концептуальна модель [Електронний ресурс] / П.В. Воронжак // Економіка: реалії часу. – 2015. № 6, (22). С. 206-212. Режим доступу <https://economics.net.ua/files/archive/2015/No6/206.pdf> – доступно на 05.12.2015.
4. Putkina L.V. The concept of process approach to management. В мире научных открытий, 2014. № 9 (57). С. 469-476.

5. Чичкало-Кондрацька І. Б., Буряк А. А., Кондрацька Д. С. Особливості створення та перспективи розвитку smart cities у країнах світу. *Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка»*, 2020. № 8. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=8096>. DOI: 10.32702/2307-2105-2020.8.9

6. Базилевич В. М., Мальцева М. В., Петренко Т. А., Черниш Л. Г. Захищена система розумного будинку з використанням Internet of Things. *Технічні науки та технології*, 2020. № 2 (20). С. 218-228.

7. Унінець І.М. Smart-технології у глобальній екосистемі. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*, 2020. Вип. 33. Ч. 2. С. 89-93.

8. Олійник Л.В., Бережок Р.О. Економічна ефективність технологій «Smart City». *Економіка і організація управління*, 2020. № 2 9(38). С. 55-67.

#### **Haidukevych S.V., Semenova N.P., Leskiv Ya.A. CONCEPTS OF "SMART TECHNOLOGIES" AND THEIR APPLICATION IN APARTMENTS OF THE CLOSED SOIL**

*The control of technological processes apartments of the closed soil is directly influenced by unsteady behavior of external and internal factors, so greenhouses for proper functioning require a microclimate with certain parameters necessary to create favorable conditions for plant growth regardless of environmental conditions.*

*Maintaining an optimal microclimate requires constant technological, economic and environmental changes dictated by changes in the global world.*

*Implementation of effective energy-saving microclimate management mechanisms based on modern intelligent technologies could satisfy the solution of such problems.*

*At this stage of development in various technological processes are implemented projects implemented on the concepts of Smart technologies.*

*With the help of such intelligent and innovative technologies with access to the Internet, the task is to create an automatic system that could, based on data obtained from their environments, could control the technological processes to create an optimal microclimate in the greenhouse.*

*Developed and manufactured a universal automatic control system of electrical equipment, which implements the functions of lighting, heating, ventilation, plant lighting, audio-video surveillance, water supply, control of electric drive opening and closing transoms, electricity consumption based on the latest "smart" devices. interconnected and integrated into a single network with Internet access. Process control is performed using a remote control, personal computer and smartphone.*

*According to research, the use of Smart technologies and the proposed algorithm of electrical equipment can reduce the use of heat and electricity, adjust the operation of all devices so that they work in harmony and interconnected, which expands the limits of self-diagnosis, minimize losses and reliability.*

**Key words:** *greenhouse, control system, Smart technologies, microclimatic parameters.*

**Говорущенко Т.О.**

Хмельницький національний університет

**Лопатко І.Ю.**

Хмельницький національний університет

**Капустян М.В.**

Хмельницький національний університет

## МУЛЬТИАГЕНТНА СИСТЕМА ВРАХУВАННЯ ІНФОРМАЦІЇ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ НА ВСІХ ЕТАПАХ РОЗРОБЛЕННЯ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

*Невід'ємною частиною процесу розробки програмного забезпечення (ПЗ) є забезпечення його якості. Для підвищення якості програмного забезпечення необхідним є максимально можливе врахування інформації предметної галузі на всіх етапах його розроблення.*

*Інформацію предметної галузі слід враховувати на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, щоб підвищити його якість, функціональну безпеку, надійність, гарантоздатність та живучість. Перевірка врахованості інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення ПЗ є наразі актуальною задачею. Для розв'язання такої задачі слід розробити мультиагентну систему врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, яка складається з двох агентів.*

*Перший інтелектуальний агент на основі онтологій виконує семантичний парсинг реальних документів на предмет пошуку елементів інформації предметної галузі, які повинні міститись в тому чи іншому документі. Всі знайдені агентом інформаційні елементи заносяться у відповідну реальну онтологію та буде проводитись підрахунок кількості наявних інформаційних елементів. Другий інтелектуальний агент на основі онтологій виконує, власне, порівняння онтологій для кожного документу, формування множини відсутніх елементів інформації предметної галузі в кожному документі та оцінювання величини втрат інформації предметної галузі для кожного документу.*

*У статті запропоновано структуру мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, яка: виконує семантичний парсинг реальних документів на предмет пошуку необхідних елементів інформації предметної галузі; формує відповідні реальні онтології для кожного документу; підраховує кількості наявних інформаційних елементів в кожному документі; виконує порівняння ідеальних та реальних онтологій; формує множини відсутніх у відповідних документах інформаційних елементів; оцінює величини втрат інформації предметної галузі для кожного документу.*

**Ключові слова:** *якість програмного забезпечення (ПЗ), інформація предметної галузі, мультиагентна система, інтелектуальний агент на базі онтологій.*

**Постановка проблеми.** Програмне забезпечення (ПЗ) проникає у всі аспекти нашого життя в епоху інформації: приватні особи та компанії покладаються на операційні системи та програми для виконання щоденних завдань. Саме тому витрати на корпоративне програмне забезпечення мають найвищі темпи зростання в технічній галузі. Ринок програмного забезпечення для підприємств є найбільш швидкозростаючим сектором в ІТ-галузі. Згідно із інформацією компанії Statista, наразі витрати на корпоративне програмне забезпечення становлять 491 мільярдів доларів США, розмір ринку видавництва програмного

забезпечення в США становить 285 мільярдів доларів США [1].

Як двигун цифрової трансформації, програмне забезпечення буде відігравати дедалі більшу роль у наступні роки після економічного спаду, спричиненого пандемією COVID-19, коли витрати на корпоративне програмне забезпечення будуть наближатись до 500 мільярдів доларів США.

При цьому велика кількість програмних проєктів не відповідають початковим цілям та бізнес-намірам і не виконуються в рамках бюджету у встановлені часові рамки [2]. Організації втрачають в середньому 97 мільйонів доларів на



кожен вкладений 1 мільярд доларів через низьку ефективність програмних проєктів [3].

Отже, невід'ємною частиною процесу розробки програмного забезпечення є забезпечення його якості. Якість ПЗ – це ступінь, з яким програмний продукт відповідає встановленим вимогам при його застосуванні у визначених умовах [4]. Враховуючи вищевикладене, *актуальною задачею* наразі є підвищення якості програмного забезпечення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відповідно до звіту Consortium for Information & Software Quality (CISQ) [5], світова індустрія інформаційних технологій наблизилася до досягнення обсягу в 5 трлн. дол. США в 2020 році, з яких 32% від загальної суми припадає на США. Це приблизно 1,6 трлн. дол. США в 2020 році. 25% від останньої суми грошей було витрачено на проєкти розвитку, що становить 400 млрд. дол. США, і 65% з них були витрачені на невдалі і проблемні проєкти. Отже, певною мірою ціна низької якості самого програмного забезпечення та процесів його розробки (Cost of Poor Software Quality, CPSQ) через невдалі проєкти в США у 2020 році склала 260 млрд. дол. США (у порівнянні з 177,5 млрд. дол. США у 2018 році).

Недостатня якість ПЗ є причиною багатьох катастроф, аварій, фінансових втрат і витоків інформації [6, 7], а дефекти, наприклад, у вимогах до ПЗ [8, 9], програмному кодї [10-12] або інтерфейсах користувача [13-15] впливають на якість ПЗ в цілому.

Відповідно до опублікованого звіту [16], який підготувала компанія УНДО (Undo) – розробник платформи для відтворення збоїв ПЗ спільно з Кембриджською бізнес-школою (Cambridge Business School) в 2020 році (рис. 3), компанії-розробники ПЗ 26% (620 млн годин на рік) від усього часу, що виділяється на розробку ПЗ, витрачають на знаходження і виправлення дефектів ПЗ, що обходиться приблизно в 61 млрд. дол. США. Це еквівалентно обсягу акцій компаній на суму 1,2 трлн. дол. США.

Причини недостатньої якості ПЗ можуть бути досить різноманітними. До них можна віднести, наприклад, дефекти розробки вимог, проєктування, програмування, тестування тощо. Складність, а, відповідно, і вартість перебування і виправлення дефектів ПЗ залежить від етапу розробки ПЗ. Чим пізніше виявлений дефект, тим складніше і дорожче його виправити [17].

Однією з причин низької якості ПЗ може бути недостатність уваги до інформації предметної

галузі на різних етапах життєвого циклу. Розробники ПЗ можуть прискіпливо аналізувати та ретельно враховувати деяку інформацію предметної галузі, а от іншу інформацію взагалі залишати поза своєю увагою, причому навіть інформація з високою ймовірністю може залишатись поза увагою розробників.

**Постановка завдання.** Інформацію предметної галузі слід враховувати на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, щоб підвищити його якість, функціональну безпеку, надійність, гарантоздатність та живучість. Відтак, перевірка врахованості інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення ПЗ є наразі актуальною задачею. Для розв'язання такої задачі слід розробити інтелектуальну мультиагентну систему для підвищення якості програмного забезпечення шляхом врахування інформації предметної галузі на всіх етапах його розроблення, яка якраз і буде виконувати перевірку врахованості інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення ПЗ. Метою представленої дослідження є розроблення структури мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Інтелектуальна мультиагентна система на основі онтології для оцінки специфікацій вимог до програмного забезпечення була розроблена авторами у [18]. Вона передбачає порівняння ідеальної онтології (містить всю необхідну інформацію якості у специфікації вимог) та реальної онтології (містить всю наявну інформацію якості у реальній специфікації вимог), що уможливорює ідентифікацію втрат інформації у специфікації вимог до ПЗ.

Запропонований у [18] підхід використаємо тепер для розроблення мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення.

Кожний етап розроблення ПЗ виконується на основі певного документу (план, специфікація вимог до ПЗ, дизайн ПЗ, сирцевий код, продукт, тощо), в якому повинна відобразитись певна інформація предметної галузі, яка може і повинна бути врахована у відповідному документі (як правило, її стандарти визначають). На основі стандартних форм таких документів будуються ідеальні онтології для кожного з документів, які відображають необхідні елементи інформації предметної галузі, які згідно із стандартами та іншою нормативною документацією повинні бути присутні у тому чи іншому документі.

На основі реальних документів, доступних під час розроблення ПЗ, для кожного окремого ПЗ будуть будуватись реальні онтології. Для цього необхідним є перший інтелектуальний агент на основі онтологій, який виконуватиме семантичний парсинг реальних документів на предмет пошуку елементів інформації предметної галузі, які повинні міститись в тому чи іншому документі. Всі знайдені агентом інформаційні елементи будуть заноситись у відповідну реальну онтологію та буде проводитись підрахунок кількості наявних інформаційних елементів.

Розроблені ідеальні та реальні онтології порівнюються, на основі чого формуються множини відсутніх у відповідних документах інформаційних елементів, які, власне, і демонструють втрати інформації предметної галузі (та їх величину) у певному документі.

Для оцінювання величини втрат інформації предметної галузі можна адаптувати запропоновані авторами раніше [18] формули числової оцінки рівня достатності наявної інформації.

Другий інтелектуальний агент на основі онтологій буде виконувати, власне, порівняння онтологій для кожного документу, формування множини відсутніх елементів інформації предметної галузі в кожному документі та оцінювання величини втрат інформації предметної галузі для кожного документу.

Візуалізоване представлення множин відсутніх інформаційних елементів в кожному документі допоможе розробнику зрозуміти прогалини інформації в документі і, таким чином, забезпечить підвищення якості наповнення того чи іншого документу.

На вхід мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення можуть бути подані як всі документи всіх етапів розроблення ПЗ одночасно, так і будь-який один (готовий на даний момент часу) документ, тобто система застосовна і ефективна на будь-якому етапі розроблення ПЗ (в тому числі і на найбільш ранніх етапах, коли доступний лише план або специфікація).

Тоді структура мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення представлена на рис. 1.

В контексті вищевикладеної концепції та структури інтелектуальної мультиагентної системи для підвищення якості програмного забезпечення шляхом врахування інформації предметної галузі на всіх етапах його розроблення, перспективною

задачею наразі є наповнення ідеальних онтологій для всіх документів на всіх етапах розроблення програмного забезпечення. Для цього потрібно проаналізувати відповідні стандарти, нормативні документи, рекомендації, звідки слід вибрати ті елементи інформації предметної галузі, які повинні бути присутні у тому чи іншому документі. Наразі такі онтології реалізовані лише для специфікації вимог до ПЗ [18]. Наповнення і розробка інших ідеальних онтологій будуть метою іншої, перспективної, частини нашого дослідження.

Для прикладу припустимо, що план повинен містити 120 різних елементів інформації предметної галузі згідно із нормативною документацією, дизайн ПЗ повинен містити 150 різних інформаційних елементів, сирцевий код повинен містити 230 різних елементів інформації предметної галузі, продукт повинен містити 250 різних інформаційних елементів. Оскільки для специфікації вимог до ПЗ вже розроблено ідеальну онтологію, то вже відомо, що специфікація вимог до ПЗ повинна містити 138 різних елементів інформації (атрибутів). Наприклад, в плані наявні 80 елементів інформації з необхідних 120 елементів, в специфікації наявні 98 елементів з необхідних 138 елементів, в дизайні наявні 140 елементів з необхідних 150 елементів, в коді наявні 210 елементів з необхідних 230 елементів, в продукті наявні 130 елементів з необхідних 250 елементів, то мають місце наступні втрати інформації предметної галузі у кожному документі (з врахуванням запропонованих авторами у [18] формули числової оцінки рівня достатності наявної інформації): 33% у плані, 29% у специфікації вимог, 7% в дизайні, 9% в коді, 48% в продукті.

Враховуючи вище доведений факт, що для підвищення якості програмного забезпечення необхідним є максимально можливе врахування інформації предметної галузі на всіх етапах його розроблення, слід прагнути до мінімізації інформаційних втрат – найкращим результатом буде досягнення рівня інформаційних втрат 0-10%. Для наведеного прикладу інформаційні втрати у сирцевому коді та у дизайні можна вважати незначними і в цілому припустимими, а от над планом, специфікацією та продуктом розробникам слід працювати з метою мінімізації інформаційних втрат.

**Висновки.** Перевірка врахованості інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення ПЗ є наразі актуальною задачею. Для розв'язання такої задачі слід розробити мультиагентну систему врахування інформації предметної галузі



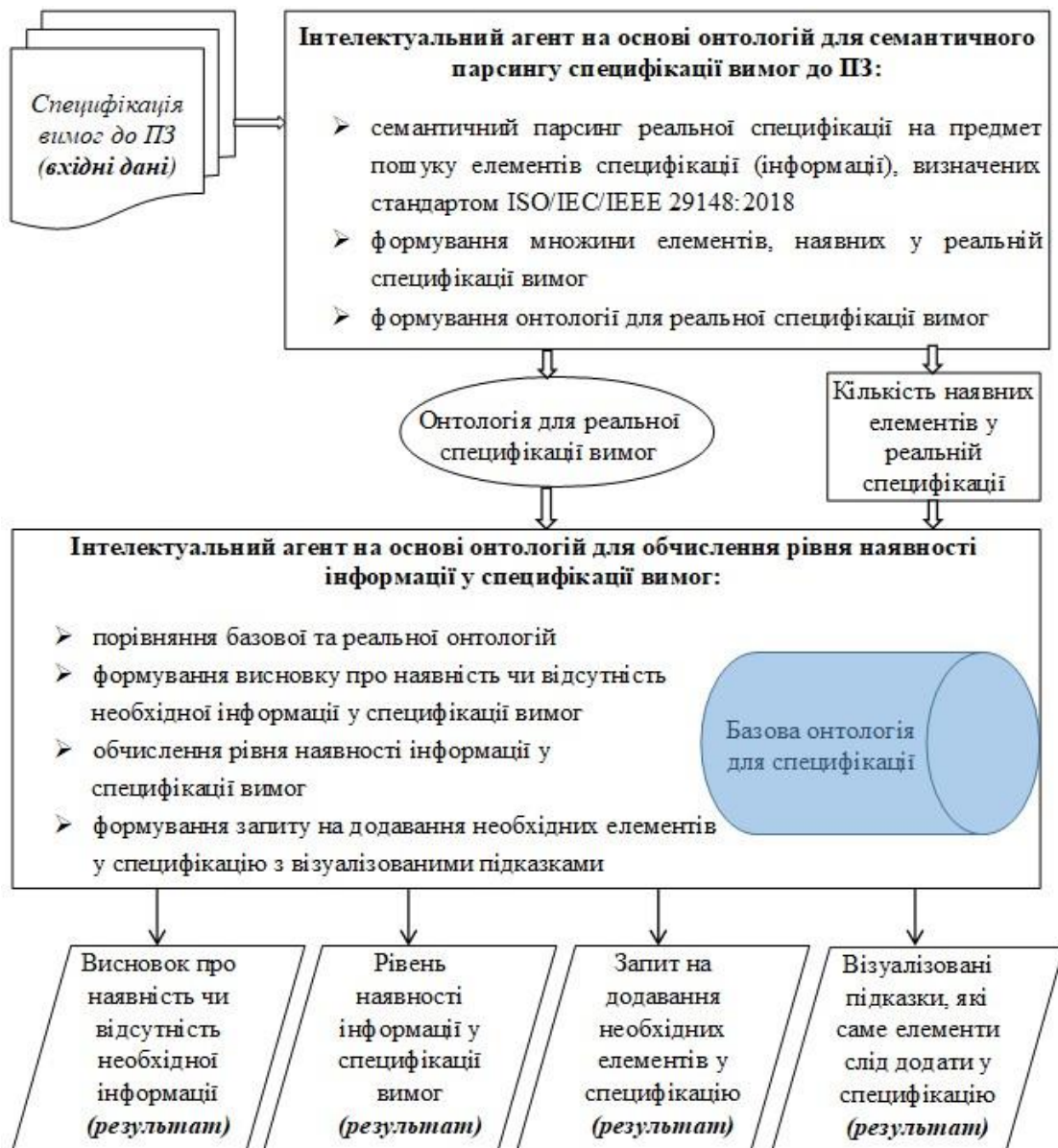


Рис. 1. Структура мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення

на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, яка складається з двох інтелектуальних агентів. Перший інтелектуальний агент на основі онтологій виконує семантичний парсинг реальних документів на предмет пошуку елементів інформації предметної галузі, які повинні міститись в тому чи іншому документі. Всі знайдені агентом інформаційні елементи заносяться у відповідну реальну онтологію та буде проводитись підрахунок кількості наявних інформаційних елементів. Другий інтелектуальний агент на основі онтологій виконує, власне, порівняння онтологій для кожного документу, формування множини відсутніх елементів інформації предметної галузі в кожному документі та оцінювання величини

втрат інформації предметної галузі для кожного документу.

У статті запропоновано структуру мультиагентної системи врахування інформації предметної галузі на всіх етапах розроблення програмного забезпечення, яка: виконує семантичний парсинг реальних документів на предмет пошуку необхідних елементів інформації предметної галузі; формує відповідні реальні онтології для кожного документу; підраховує кількості наявних інформаційних елементів в кожному документі; виконує порівняння ідеальних та реальних онтологій; формує множини відсутніх у відповідних документах інформаційних елементів; оцінює величини втрат інформації предметної галузі для кожного документу.

**Список літератури:**

1. Software. Web-site. URL: <https://www.statista.com/markets/418/topic/484/software/> (Last accessed: February 20, 2022).
2. Farokhad M., Otegi-Olaso J., Pinilla L., Gandarias N., De Lacalle L. Assessing the Success of R&D Projects and Innovation Projects through Project Management Life Cycle. *2019 10th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS): Proceedings* (Metz, France, September 2019). Metz (France), 2019. Pp. 1104-1110.
3. PMI's Pulse of the Profession 9-th Global Project Management Survey. Web-site. URL: <https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2017.pdf> (Last accessed: February 20, 2022).
4. ISO/IEC 25010:2011. Systems and software engineering. Systems and software Quality Requirements and Evaluation (SQuARE). System and software quality models. [Introduced 01.03.2011]. Geneva (Switzerland), 2011. 34 p. (International standard).
5. The Cost of Poor Software Quality in the US: A 2020 Report. Web-site. URL: <https://www.it-cisq.org/pdf/CPSQ-2020-report.pdf> (Last accessed: February 20, 2022).
6. Wong W. E., Debroy V., Surampudi A., Kim H., Siok M. F., Recent Catastrophic Accidents: Investigating How Software was Responsible. *Fourth International Conference on Secure Software Integration and Reliability Improvement: Proceedings* (Singapore, June 9-11, 2010), Singapore, 2010. Pp. 14-22.
7. Wong W., Debroy V., Restrepo A. The Role of Software in Recent Catastrophic Accidents: IEEE Reliability Society 2009 Annual Technology Report. 2009. 8 p.
8. Hu W., Carver J. C., Anu V. K., Walia G. S., Bradshaw G. Detection of Requirement Errors and Faults via a Human Error Taxonomy: A Feasibility Study. *The 10th ACM/IEEE International Symposium on Empirical Software Engineering and Measurement: Proceedings* (Ciudad Real, Spain, September 8-9, 2016), Ciudad Real, 2016. Pp. 1-10.
9. Dinkar S. Requirement Engineering Errors: Errors and Ambiguities of Visualization. *International Journal of Computer Applications*. 2014. Vol. 92. Pp. 19-23.
10. Huckle T., Neckel T. Bits and Bugs: A Scientific and Historical Review of Software Failures in Computational Science. Society for Industrial & Applied Mathematics, 2019. 251 p.
11. Hobbs C. Embedded Software Development for Safety-Critical Systems: Second Edition. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2016. 384 p.
12. Wang S., Lo D. Version history, similar report, and structure: putting them together for improved bug localization. *The 22nd International Conference on Program Comprehension (ICPC 2014): Proceedings* (USA, 2014). USA, 2014. Pp. 53-63.
13. Zhang Yi, Masci P., Jones P., Thimbleby H. User Interface Software Errors in Medical Devices: Study of U.S. Recall Data. *Biomedical Instrumentation & Technology*, 2019. Vol. 53 (3). Pp. 182-194.
14. Natella R., Winter S., Cotroneo D., Suri N. Analyzing the Effects of Bugs on Software Interfaces. *IEEE Transactions on Software Engineering*. 2020. Vol. 46. No. 3. Pp. 280-301.
15. Faily S., Lyle J., Fléchais I., Simpson A. Usability and Security by Design: A Case Study in Research and Development. *NDSS Workshop on Usable Security: Proceedings* (San Diego, CA, USA, February 8-11, 2015). San Diego, 2015. 10 p.
16. What is the actual cost of software failures? Web-site. URL: <https://undo.io/the-cost-of-software-failures> (Last accessed: February 20, 2022).
17. Pomorova O., Hovorushchenko T. The Way to Detection of Software Emergent Properties. *The 8-th IEEE International Conference on IDAACS: Proceedings* (Warsaw (Poland), September 24-26, 2015). Warsaw, 2015. Vol. 2. Pp. 779-784.
18. Hovorushchenko T., Pavlova O. Evaluating the Software Requirements Specifications Using Ontology-Based Intelligent Agent. *IEEE International Scientific and Technical Conference "Computer Science and Information Technologies"*: Proceedings (Lviv (Ukraine), September, 2018). Lviv, 2018. Pp.215-218.

**Lopatto I.Yu., Hovorushchenko T.O., Kapustian M.V. MULTIAGENT SYSTEM OF ACCOUNTING SUBJECT AREA INFORMATION AT ALL STAGES OF SOFTWARE DEVELOPMENT**

*Ensuring software quality is an integral part of the software development process. For improving the quality of software, it is necessary to take into account the information of the subject area at all stages of its development.*

*Subject area information should be considered at all stages of software development to improve its quality, functionality, reliability, dependability, and survivability. Checking the consideration of information in the subject area at all stages of software development is currently an urgent task. To solve this problem, we need*

*to develop a multi-agent system for accounting for information in the subject area at all stages of software development, which consists of two agents.*

*The first ontology-based intelligent agent performs semantic parsing of real documents in order to search for information elements of the subject area that should be contained in a document. All information elements found by the agent are entered into the appropriate real ontology and the number of available information elements will be counted. The second intelligent agent on the basis of ontologies, in fact, compares ontologies for each document, forming a set of missing elements of information of the subject area in each document and estimates the amount of information loss of subject area for each document.*

*The article proposes the structure of a multi-agent system of accounting for subject area information at all stages of software development, which: performs semantic parsing of real documents in order to find the necessary elements of subject area information; forms appropriate real ontologies for each document; counts the amount of available information elements in each document; compares ideal and real ontologies; forms sets of information elements missing in the relevant documents; estimates the amount of information loss of the subject area for each document.*

**Key words:** *software quality, subject area information, multi-agent system, ontology-based intelligent agent.*

**Головіна Н.В.**

Херсонський національний технічний університет

**Ляшенко О.М.**

Херсонський національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ ТА РЕКОНСТРУКЦІЇ ЗОБРАЖЕНЬ

*У статті розглянуто методи відновлення та реконструкції зображення. Це одна з ключових проблем, яка постає при дослідженні та фіксації надзвичайних природних явищ, пожеж. Дана проблема постає особливо гостро, тому що для аналізу та проведення розрахунків використовуються супутникові знімки, яким не завжди вдається зберегти свою якість та чіткість для однозначної класифікації ситуації. Для аналізу якості зображення та точності відображення використовуються різноманітні методи. Саме тому так важливо підібрати оптимальні рішення, які дозволяють зменшити вірогідність помилки та підвищити результативність роботи систем підтримки прийняття рішень.*

*Написана стаття направлена на вивчення та реалізацію тих методів, які використовуються для видалення шумів та інших дефектів із зображення з метою подальшого аналізу та оптимізації. Для цього використовуються методи машинного навчання так комп'ютерного зору. Дані засоби надають можливість однозначно ідентифікувати та попереджувати пожежі та інші негативні фактори природного характеру.*

*Для реалізації поставлених задач та цілей розглянуто методи обробки зображень в просторовій області та частотний метод. Просторовий метод полягає у аналізі та обробці окремих пікселів на зображенні. Для опису просторового методу розглянуто формулу.*

*У статті особливу увагу надано методам обробки супутникових зображень для видалення шуму та інших дефектів. Використані наступні способи: солі і перцю, фільтрації по Гаусу, Спекл. Також у даному дослідженні наведено порівняння описаних способів та ефективність.*

*Проведено аналіз різноманітних методів обробки зображення, видалення шуму та приведення їх до подальшого аналізу. За допомогою віднімання темного кадру, інтерполяції темних та світлих пікселів вдається прибрати можливі дефекти, які заважають нормальному аналізу та фіксуванню пожежі.*

*У статті для проведення дослідження було використано пакет MATLAB, у якому є всі наявні інструменти для проведення розрахунків. За допомогою порівняльної характеристики вдалось порівняти ефективність кожного з методів, що допоможе у подальшій розробці сучасної системи підтримки прийняття рішень з фіксації надзвичайних ситуацій природного характеру, а саме – лісових пожеж.*

**Ключові слова:** система підтримки прийняття рішень, відновлення та реконструкція зображень, методи обробки в просторовій області, частотний метод, метод солі і перцю, метод фільтрації по Гаусу, метод Спекл.

**Постановка проблеми.** Методи відновлення та реконструкції зображення – це одна з основних проблем дослідження зображень надзвичайних природних явищ та пожеж. Це пов'язано з тим, що за допомогою супутників та методів комп'ютерного зору важко досягти необхідної якості зображення та точності відображення для аналізу інтенсивності та інших параметрів розповсюдження вогню на місцевості.

Отже, основною задачею дослідження є вивчення та розробка методів, які допоможуть відновити та обробити вихідне зображення таким чином, щоб отримати якісне відображення для

кінцевого аналізу за допомогою методів машинного навчання та комп'ютерного зору.

**Аналіз існуючих досліджень та публікацій.** Питаннями відновлення та реконструкції зображень різними методами активно займаються учені. У цій роботі [7] проведена спроба дослідження трьох типів шуму: сіль і перець (SPN), імпульсний шум із випадковими змінами (RVIN), Спекл (SPKN). Були видалені різні рівні шуму від 10% до 60% за допомогою п'яти типів фільтрів: середній фільтр (MF), адаптивний фільтр Вінера (AWF), фільтр Гауса (GF), стандартний середній фільтр (SMF) і адаптивний медіанний фільтр

(AMF). Те ж саме стосується зображення дистанційного зондування та їх порівняння одне з одним. Порівняльне дослідження проведено за допомогою середньоквадратичних помилок (MSE) і відношення пікового сигналу до шуму (PSNR).

Дослідження за даною тематикою проводиться у роботі [3]. Шум зображення може знизити якість зображення і втратити деяку детальну інформацію про зображення. Тому для покращення якості зображення необхідний процес зменшення шуму, який називається зменшенням шуму зображення. Однак головна проблема зі зменшенням шуму полягає в тому, як усунути шум, зберігаючи якість зображення. Процес зменшення шуму також має на меті покращити якість сегментації, оскільки зображення, що підлягає обробці, має кращу якість. Це дослідження має на меті створити ефективний метод, щоб процес шумозаглушення зберігав деталі та краї, щоб усунути випадковий шум (гаусівський шум і шум Спекл) і шум фіксованого значення (шум солі та перцю) шляхом виконання двосторонньої фільтрації та нелокальних засобів. Фільтрація за коефіцієнтом апроксимації дискретного перетворення (DWT). Тоді як для коефіцієнта деталізації буде виконано м'яке порогове значення, за яким буде виконуватися процес анізотропної дифузійної фільтрації. Випробування проводяться із зображеннями у відтінках сірого з доданими шумами.

Видалення шумів із фотографій у цій роботі [2] проводиться за допомогою різних методів. Виявлення країв – це техніка обробки зображення для визначення меж об'єктів серед зображень. Фільтри пошуку країв шукають межі між абсолютно різними кольорами, тому знаходять контури об'єктів. Існує багато методів обробки зображень для застосування та усунення проблем із шумом і сигналом у зображенні. Аналіз було проведено за допомогою MATLAB. Робота з аналізу базується на імені фільтра, результатах аналізу та псевдокоді.

**Постановка завдання.** Методи відновлення та реконструкції зображення – це одна з основних проблем дослідження зображень надзвичайних природних явищ та пожеж. Це пов'язано з тим, що за допомогою супутників та методів комп'ютерного зору важливо досягти необхідної якості зображення та точності відображення для аналізу інтенсивності та інших параметрів розповсюдження вогню на місцевості. Існує велика кількість різних методів відновлення та реконструкції зображень, які відрізняються своїми характеристиками та кінцевими властивостями.

Саме тому важливо підібрати найбільш ефективні та працюючі методи, які допоможуть підвищити якість кінцевого зображення.

**Викладення основного матеріалу.** Більша частина методів к покращенню зображення ділиться на дві великі категорії:

- 1) методи обробки в просторовій області;
- 2) частотний метод.

В словах «просторовій області» мається на увазі к площині зображення. Цей метод зав'язаний на обробці пікселем на зображенні [1].

Основною суттю просторового методу є операція на пікселями на зображенні. Основним рівнянням для опису процесу просторової обробки є:

$$g(x, y) = T[f(x, y)], \quad (1)$$

де  $f(x, y)$  – це вихідне зображення,  $g(x, y)$  – оброблене зображення, а  $T$  – оператор для перетворення  $f$ . Оператор використовується для того, щоб виконувати різні операції над вихідним зображенням щоб досягти поставленої мети. Основний підхід в визначенні околиці навколо точки  $(x, y)$  є у використанні квадратної, або прямокутної області – сукупності зображень, центрованого в точці  $(x, y)$ . Оператор  $T$  виконує операції для кожної точки в  $(x, y)$ , і в результаті отримується значення  $g$  для даної точки. Лінійні перетворення оперують одночасно зі значеннями пікселей в краї так із значеннями деякої матриці, маючи такі самі розміри що і краї [6].

**Метод солі і перцю.** Зображення, що містить гіркий шум, матиме темні пікселі в яскравих областях і яскраві пікселі у темних областях. Цей тип шуму може бути викликаний битими пікселями, аналого-цифровими помилками перетворювача, бітовими помилками при передачі тощо. Це можна значною мірою усунути за допомогою віднімання темного кадру та інтерполяцією навколо темних/світлих пікселів. На рис. 1 зображено вихідне зображення [4]. Рис. 2 та рис. 3 демонструють результати виконаної фільтрації.

**Метод фільтрації по Гаусу.** Стандартна модель шуму підсилювача є адитивною для кожного пікселя незалежно від інтенсивності сигналу. У кольорових камерах, де використовується більше посилення каналу синього кольору, ніж у зеленому або червоному каналі, у синьому каналі може бути більше шуму. Шум підсилювача є основною частиною шуму зчитування датчика зображення, тобто постійний рівень шуму наявний темних областях зображення [8].

На рис. 4 відображено зображення, переведене до сірого спектру для проведення аналізу.





Рис. 1. Вихідне зображення



Рис. 2. Використання фільтру



Рис. 3. Відфільтроване зображення за допомогою методу солі та перцю



Рис. 4. Перетворення вихідного зображення до сірого спектру



Рис. 5. Додавання гаусівського шуму до зображення



Рис. 6. Зображення з виділеним шумом

На рис. 5 додано гаусівський шум, а на рис. 6 та рис. 7 приведено результати очищення зображення від шуму.

**Використання методу Спекл.** Шум Спекл – це дрібний шум, який за своєю суттю існує і погіршує якість зображення з активним радаром і раді-

олокатором із синтетичною апертурою (SAR). Шум Спекл у звичайному радарі є результатом випадкових коливань зворотного сигналу від об'єкта, розмір якого не перевищує один елемент обробки зображень. Це підвищує середній рівень сірого в локальній зоні. Шум Спекл у SAR,



Рис. 7. Згладжене зображення



Рис. 8. Вихідне зображення



Рис. 9. Додавання шуму



Рис. 10. Відфільтроване зображення

як правило, більш серйозний, що викликає труднощі при інтерпретації зображень. Він викликаний когерентною обробкою зворотнорозсіяних сигналів від кількох розподілених цілей. В SAR океанографія, наприклад, шум Спекл викликаний сигналами від елементарних розсіюється і проявляється як зображення морських хвиль [9]. На рис. 8 можна побачити вихідне зображення. На рис. 9 та рис. 10 можна побачити процес фільтрації та результат проведеного дослідження.

**Побудова графіків зображень різних методів.**

Для відображення різниці між різними методами фільтрації зображень були використані контурні графіки [5]. З їх допомогою відображені різні рівні та глибина зображення за допомогою обраних точок та векторів, на які були розбиті вихідні дані. На рис. 11 можна побачити щільність шуму з необробленого зображення. Можна побачити, що на вихідному зображенні наявний високий рівень стороннього шуму, що погіршить подальший аналіз та оцінку.

На рис. 12 можна побачити графік обробленого зображення за допомогою гаусівського

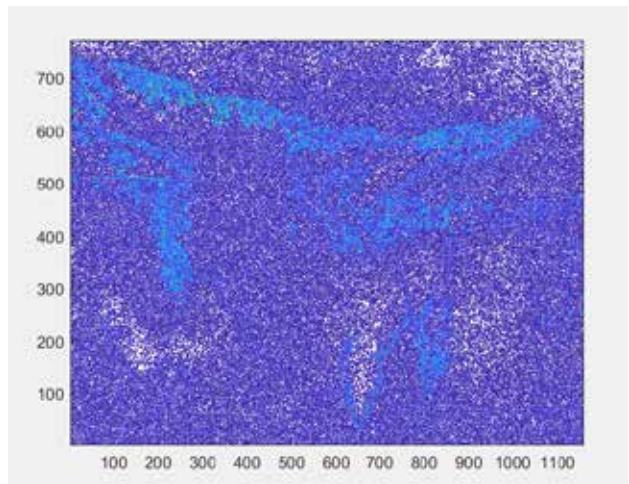


Рис. 11. Шум з необробленого зображення

методу. Можна побачити, що рівень шуму в порівнянні з вихідним зображенням менший, що говорить про ефективність використання даного методу.

На рис. 13 можна побачити графік очищеного від шуму зображення, що говорить про ефектив-



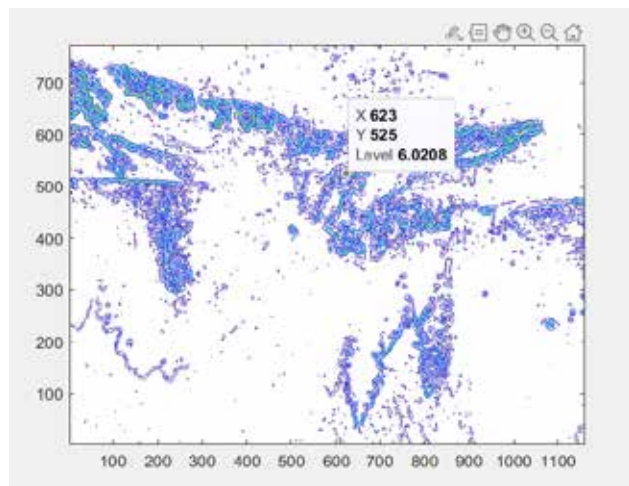


Рис. 12. Шум обробленого зображення за допомогою гаусівського методу

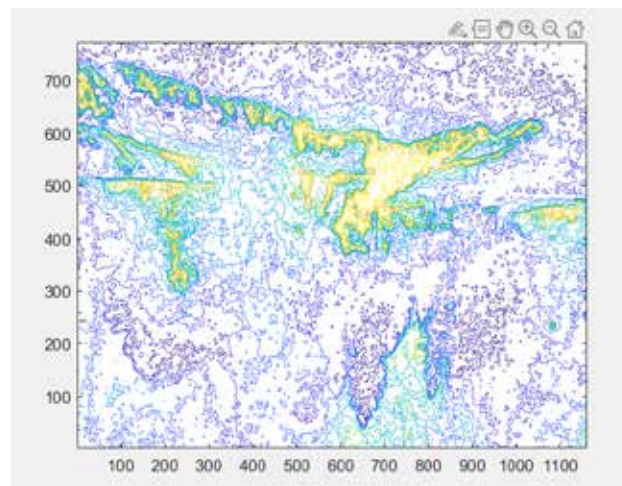


Рис. 13. Шум згладженого зображення

ність даного методу та зменшену кількість шуму на обраній площі.

**Висновки.** У статті проведено аналіз різних методів обробки зображення та видалення шуму. Використано метод солю і перцю за допомогою віднімання темного кадру та інтерполяцією навколо темних/світлих пікселів. Розглянута стандартна модель шуму підсилювача є адитивною для кожного пікселя незалежно від інтенсивності сигналу. Шум Спекл у звичайному радарі є результатом випадкових коливань зворотного сигналу від об'єкта, розмір якого не перевищує один елемент

обробки зображень. Розглянуто особливості кожного з перерахованих методів.

Дослідження проводилось за допомогою інструментів MATLAB. Було проведено порівняльну характеристику методів, досліджено існуючі методології видалення шуму із зображення. Приведено графіки для демонстрації ефективності використаних методів видалення шуму із зображення.

Результати проведеного дослідження будуть використані для подальшого аналізу зображень та розробки системи підтримки прийняття рішень при настанні пожежі.

#### Список літератури:

1. Ali Ranjbaran, Anwar Hasni Abu Hassan, Mahboobe Jafarpour and Bahar Ranjbaran. A Laplacian based image filtering using switching noise detector. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/190991234.pdf> (дата звернення 14.11.2021).
2. Arun Anoop Mandankandy. Image Noise and Edge Filtering – A Survey, Analysis using MATLAB. URL: [https://www.researchgate.net/publication/341286541\\_Image\\_Noise\\_and\\_Edge\\_Filtering\\_-\\_A\\_Survey\\_Analysis\\_using\\_MATLAB](https://www.researchgate.net/publication/341286541_Image_Noise_and_Edge_Filtering_-_A_Survey_Analysis_using_MATLAB) (дата звернення 12.11.2021).
3. Biandina Meidyani, H. Tjandrasa. Hybrid Denoising Development to Improve the Quality of Image Segmentation with Noise. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/Hybrid-Denoising-Development-to-Improve-the-Quality-Meidyani-Tjandrasa/4c57361e2a6a5348a11d51ac6aa97305623f8c9f> (дата звернення 12.11.2021).
4. Dixie Fire becomes largest single wildfire in California history. URL: <https://www.politico.com/states/california/story/2021/08/06/dixie-fire-becomes-largest-single-wildfire-in-california-history-1389651> (дата звернення 13.11.2021).
5. image\_denoise. URL: [https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/m\\_src/image\\_denoise/image\\_denoise.html](https://people.sc.fsu.edu/~jburkardt/m_src/image_denoise/image_denoise.html) (дата звернення 13.11.2021).
6. Jaap de Vries. Image processing and noise reduction techniques for thermographic images from large-scale industrial fires. URL: [https://www.researchgate.net/publication/267026455\\_Image\\_processing\\_and\\_noise\\_reduction\\_techniques\\_for\\_thermographic\\_images\\_from\\_large-scale\\_industrial\\_fires](https://www.researchgate.net/publication/267026455_Image_processing_and_noise_reduction_techniques_for_thermographic_images_from_large-scale_industrial_fires) (дата звернення 14.11.2021).
7. Mr. Salem Saleh Al-amri, Dr. N.V. Kalyankar and Dr. Khamitkar S.D. A Comparative Study of Removal Noise from Remote Sensing Image. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1002/1002.1148.pdf> (дата звернення 12.11.2021).
8. Noise reduction. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Noise\\_reduction](https://en.wikipedia.org/wiki/Noise_reduction) (дата звернення 13.11.2021).
9. NOISE REDUCTION using Fuzzy Filtering. URL: [https://devendrpratapyadav.github.io/Fuzzy\\_Image\\_processing/](https://devendrpratapyadav.github.io/Fuzzy_Image_processing/) (дата звернення 14.11.2021).



**Holovina N.V., Liashenko O.M. RESEARCH OF METHODS OF RESTORATION AND RECONSTRUCTION OF IMAGES**

*The article considers the methods of image restoration and reconstruction. This is one of the key problems that arise in the study and recording of extraordinary natural phenomena, fires. This problem is particularly acute because satellite images are used for analysis and calculations, which are not always able to maintain their quality and clarity for clear classification of the situation. Various methods are used to analyze image quality and display accuracy. That is why it is so important to choose the best solutions that reduce the likelihood of error and increase the effectiveness of decision support systems.*

*The written article is aimed at studying and implementing those methods that are used to remove noise and other defects from the image for further analysis and optimization. This is done using machine learning techniques such as computer vision. These tools make it possible to unambiguously identify and prevent fires and other negative factors of a natural nature.*

*For the realization of the set tasks and the purposes, methods of processing images in the spatial area and a frequency method are considered. The spatial method is to analyze and process individual pixels in the image. The formula is considered to describe the spatial method.*

*The article pays special attention to the methods of processing satellite images to remove noise and other defects. The following methods are used: salt and pepper, Gaussian filtration, Speckle. This study also compares the described methods and their effectiveness.*

*The analysis of various methods of image processing, noise removal and bringing them to further analysis is carried out.*

*The MATLAB package was used in the article for the study, which has all the available tools for calculations. With the help of comparative characteristics, it was possible to compare the effectiveness of each of the methods, which will help in further development of a modern decision support system for fixing emergencies of a natural nature, namely – forest fires.*

**Key words:** *decision support system, image restoration, and reconstruction, spatial processing methods, frequency method, salt and pepper method, Gaussian filtration method, Speckle method.*

**Завгородній В.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Завгородня Г.А.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Демченко І.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Крамаренко К.С.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Шевченко І.О.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Юрченко А.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## МЕТОД СТВОРЕННЯ ШТУЧНИХ ТЕКСТУР ІЗ ЗАДАНИМИ ПАРАМЕТРАМИ

*Робота присвячена вирішенню питання генерації текстур із заданими параметрами. Зображення текстури розглядається як набір випадкових полів. Дана стаття розглядає випадкові поля та способи їх опису. Випадкове поле є функцією, значеннями якої є випадкові величини. Якщо передбачається використання значень цієї функції в якості генератора текстури, то на значення поля накладаються додаткові обмеження: по-перше всі випадкові величини поля мають один і той же розподіл, а по-друге коваріація між значеннями функції залежить тільки від вектора, що з'єднує точки, в яких ця функція розглядається, тобто функція є стаціонарною.*

*У статті висунуто гіпотезу, про те, що сприйняття випадкового поля людиною залежить тільки від значень коваріацій.*

*В роботі наведено розробку методу, за допомогою якого можна отримати текстуру із заданою коваріаційною функцією. Таке завдання виникає, наприклад, при налагодженні програм розпізнавання об'єктів, суттєвою характеристикою яких є випадкова текстура. Стверджується, що випадкові поля мають властивість стаціонарності, тобто коваріація між двома позиціями залежить тільки від вектора, що сполучає позиції цих точок.*

*Генерація штучних структур, що описують області, які мають однорідні властивості, є корисною функцією в системах аналізу зображень. В даній статті запропонована модель для генерації штучних текстур з високим паралелізмом. Запропонована модель заснована на рівновазі сил взаємодії між вузлами мережі, та дозволяє генерувати різні текстури зображення з різноманітними характеристиками, такими як ступінь деталізації, нелінійність, хаотичність. Окрім цього досліджується властивість самоорганізації для генерації текстури. Наведені експерименти, які демонструють, що запропонована модель забезпечує успішну генерацію текстур із заданою коваріаційною функцією.*

**Ключові слова:** текстура, кореляція, генератор, коваріаційна функція, випадкові поля.

**Постановка проблеми.** У комп'ютерній графіці прийнято розуміти під текстурою будь-яке зображення, що застосовується при реалізації сцени. В теорії цифрової обробки зображень текстури – це випадкові поля. Дана стаття розглядає випадкові поля та способи їх опису [1-4]. Випадкове поле є функцією  $Fun(x, y)$ , значеннями якої є випадкові величини. Якщо передбачається вико-

ристання значень цієї функції в якості генератора текстури, то на значення поля накладаються додаткові обмеження [5-6]:

1. Всі випадкові величини  $rand$  поля мають один і той же розподіл.

2. Коваріація між  $Fun(x_0, y_0)$  та  $Fun(x_1, y_1)$  залежить тільки від вектора, що з'єднує точки  $(x_0, y_0)$  та  $(x_1, y_1)$ , тобто є стаціонарною.

Важливість виконання зазначеної властивості випадкового поля впливає із наступної гіпотези: сприйняття випадкового поля людиною залежить тільки від значень коваріацій [7-9].

Математичного (статистичного) доказу справедливості цієї гіпотези не існує, але у практичних дослідженнях вона вважається виконаною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Текстури, що описують області, які мають однорідні властивості, є основною частиною інформації, що міститься в зображенні. Генерація штучної текстури – корисна функція в системах синтезу зображення [10-13]. Не дивлячись на її важливість в обробці зображення, текстури зазвичай описуються без формального визначення і наводяться за допомогою спеціальних моделей (структурної і стохастичної) [14-16], що визначені для спеціалізованих досліджень. Генерація ж являє собою великий інтерес, наприклад для моделювання і аналізу природних текстур, таких як супутникове зображення [17-20] або біомедичне зображення зі стохастичними моделями [21-24], включаючи підходи, що базуються на Марковських випадкових полях [25]. Хоча марковські моделі, як відомо, є корисними в розв'язанні задач текстур зображень [26, 27], виконання їх операцій засновано на моделюванні Монте-Карло і вимагає велику кількість часу, яка може бути надто великою для додатків генерації структур.

**Постановка завдання.** Проблема полягає у розробці методу, за допомогою якого можна отримати текстуру із заданою коваріаційною функцією. Таке завдання виникає, наприклад, при налагодженні програм розпізнавання об'єктів, суттєвою характеристикою яких є випадкова текстура (ліс, поле, водна поверхня). Обмежене застосування ці текстури мають у комп'ютерній графіці.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Генерація стаціонарної текстури.* У цій статті використовуються терміни «кореляція» та «коваріація». Різниця між ними полягає у тому, що при обчисленні коваріації не передбачається нормування дисперсій випадкових величин та їх центрування не є обов'язковим.

Відомий наступний простий спосіб створення випадкових полів. Нехай задана матриця  $M_A$ , елементи  $M_A[x, y] = rand_{x,y}$  якої є некорельованими випадковими величинами з однаковим розподілом і нульовим середнім. Це означає, що математичне очікування визначатиметься:

$EV(M_A[x, y], M_A[x', y']) = 0$ , якщо є відмінності хоча б в одному з індексів,

або

$EV(M_A[x, y], M_A[x, y]) = K$ , якщо індекси однакові, тобто значення  $K$  від індексів не залежить.

Виберемо довільну дійсну матрицю  $M_B$  розміру  $m \times n$ , розмір якої значно менший за розмір матриці  $M_A$  і побудуємо матрицю  $M_F$ :

$$M_F[i, j] = \sum_{x,y} M_A[x+i, y+j] \cdot M_B[x, y] \quad (1)$$

Знайдемо коваріацію двох позицій у матриці  $M_F$ :

$$\begin{aligned} Cov[i, j, i', j'] &= EV(M_F[i, j] \cdot M_F[i', j']) = \\ &= EV(\sum_{x,y} M_A[x+i, y+j] \cdot M_B[x, y] \cdot \sum_{x',y'} M_A[x'+i', y'+j'] \cdot M_B[x', y']) = \\ &= \sum_{x,y,x',y'} M_B[x, y] \cdot M_B[x', y'] \cdot EV(M_A[x+i, y+j] \cdot M_A[x'+i', y'+j']) \end{aligned} \quad (2)$$

В отриманій сумі відмінними від нуля є лише ті доданки, у яких  $x+i = x'+i'$  та  $y+j = y'+j'$ . Це означає, що:

$$\begin{aligned} Cov[i, j, i', j'] &= K \cdot \sum_{x,y} M_B[x, y] \cdot M_B[x+i-i', y+j-j'] = \\ &= D[i-i', j-j'] \end{aligned} \quad (3)$$

З виразу (3) випливає, що отримане поле має властивість стаціонарності – коваріація між двома позиціями залежить тільки від вектора, що сполучає позиції цих точок.

Скрипт для створення текстури згідно з викладеним методом буде мати вигляд:

```
import empty as em
from scipy import signal as sgn
from empty.random import random
from matplotlib import pyplot as plt
```

```
def drawPlot(MAx,MAy,MB):
MA=random((MAx,MAy))-0.5
Cov = sgn.correlate2d(MA,MB,mode='same')
plt.imshow(Cov,cmap='gray')
```

Наведемо приклади текстур, побудованих за допомогою матриць  $M_{B1}$  та  $M_{B2}$ :

```
MB1 = em.float_([[1,2,4],[-1,4,1],[2,0,3]])
MB2 = em.float_([[ -3,2,1],[1,-5,-1],[-3,0,0]])
```

Відповідно до визначення, значення функції  $D(a,b)$  у виразі (3) не залежать від знака аргументу, тому можемо вважати ці аргументи невід'ємними числами. Теоретичні значення цієї функції знаходяться за допомогою наступного скрипту:

```
Koef=1/12
def findD(MB,a,b):
''' Covariation D(a,b)
```

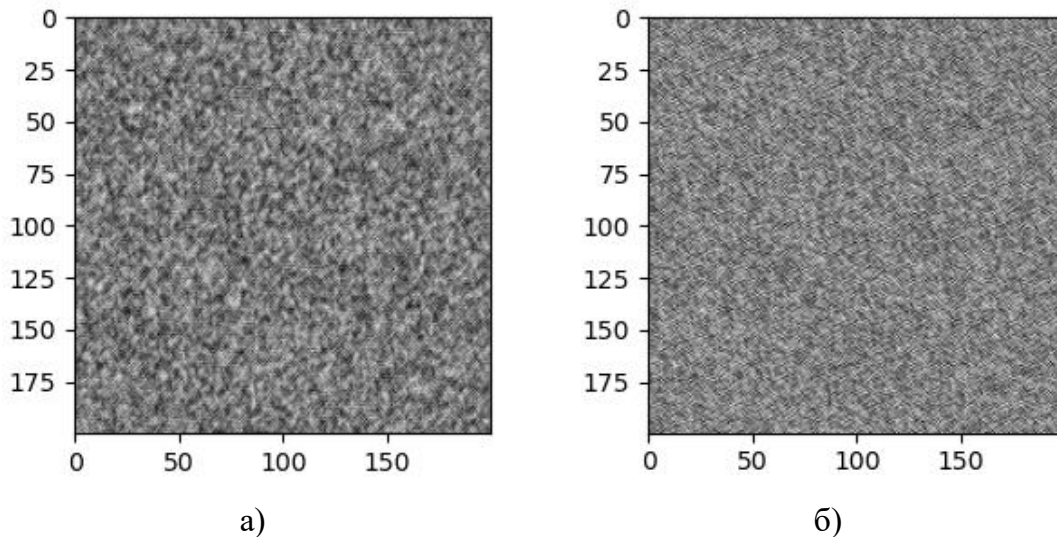


Рис. 1. а) Текстура, побудована за матрицею  $M_{B1}$ ; б) Текстура, побудована за матрицею  $M_{B2}$

```
'''
m,n = MB.shape
if a>=m or b>=n:
return 0
```

```
M1 = em.zeros((m+a,n+b))
M1[:m,:n] = MB
M2 = em.zeros((m+a,n+b))
M2[-m,-n:] = MB
return Koef*em.sum(M1*M2)
```

Тут константа  $Koef$  – це значення  $K$  у виразі (3). Величина  $1/12$  знаходиться як дисперсія випадкової величини з рівномірним розподілом на інтервалі  $[-0.5,0.5]$ . Результати підрахунку коваріацій для зазначених матриць  $M_B$  наведені в таблицях 1 та 2.

Порівнюючи дані таблиць 1 і 2 очевидними є відмінності як текстур, так і матриць коваріацій.

**Часткове вирішення проблеми створення текстури за матрицею коваріацій.** У загальному випадку вирішити рівняння (3) відносно елементів матриці  $M_B$  можна лише наближено і не дуже зрозуміло, як це зробити. Розглянемо окремий випадок, коли матриця  $M_B$  складається з однакових рядків  $R$  довжини  $m - R = r[0], r[1], \dots, r[m - 1]$ .

У цьому випадку елементи різних рядків матриці  $M_C$  не корелюють, тому достатньо розглянути кореляції лише в одному рядку цієї матриці. Рівняння (3) набуває наступного вигляду:

$$D(a) = K \cdot \sum_k r[k]r[k+a] \quad (4)$$

Спосіб відшукування коефіцієнтів  $r[k]$  у виразі (4) був запропонований Фейєром понад 100 років тому. На основі рівняння (3):

$$P(rand) = D(m-1) + D(m-2)rand + \dots + D(0)rand^{m-1} + D(1)rand^m + \dots + D(m-1)rand^{2m-2} \quad (5)$$

Тут множник  $K$  не грає ніякої ролі. Після цього знаходимо всі корені многочлена  $P(rand)$  і залишаємо тільки ті з них, які лежать усередині одиничного кола. Проблеми виникають, якщо існують корені на одиничному колі. По кореням всередині одиничного кола відновлюємо многочлен  $Q(rand)$  з точністю до нормування. Коефіцієнти знайденого многочлена після множення на потрібний множник являють собою розв'язання задачі.

Тепер алгоритм розв'язання задачі про наближене створення текстури за заданими значеннями  $D(a,b)$  має такий вигляд:

1. За значеннями  $D(0,0), D(0,1), \dots, D(0, n-1)$  знаходимо рядок  $R1$ .

Таблиця 1  
Теоретичні значення коваріацій  $D(a,b)$ .  
Матриця  $M_{B1}$

$a/b$	0	1	2
0	4.33	0.83	0.75
1	1	1.5	-0.17
2	1.17	0.5	0.25

Таблиця 2  
Теоретичні значення коваріацій  $D(a,b)$ .  
Матриця  $M_{B2}$

$a/b$	0	1	2
0	4.17	-0.33	-0.33
1	-1.42	1.08	0.25
2	0.75	0	0

2. За значеннями  $D(0,0), D(0,1), \dots, D(0, m-1)$  знаходимо стовпець  $R2$ .

3. Підраховуємо  $m \times n$  матрицю  $M_B = R1 \cdot R2$  та застосовуємо викладений вище спосіб генерації текстури.

Застосуємо цей спосіб до елементів таблиці 1.

Многочлен  $P(rand)$  має коефіцієнти 0.75, 0.84, 4.33, 0.84, 0.75. Знаходимо корені цього многочлену за допомогою функції *empty.roots*, два з них лежать усередині одиничного кола. За допомогою функції *em.poly* знаходимо коефіцієнти многочлена  $Q(rand)$ . Ці коефіцієнти множаться на нормуючий множник для того, щоб добуток старшого та молодшого коефіцієнтів дорівнював 0.75. В результаті отримаємо вектор  $R1 = 2.02, 0.35, 0.37$  (розташування коефіцієнтів за зростанням або зменшенням ступенів значення не має). Аналогічно знайдемо вектор  $R2 = 1.95, 0.39, 0.60$ , використовуючи перший стовпець таблиці 1.

Текстура, породжена цими векторами, представлена на рисунку 2.

Розглянувши текстуру на рисунку 2 можна побачити, що зовні вона не відрізняється від оригіналу, представленого на рисунку 1а.

**Висновки.** Генерація штучних структур, що описують області, які мають однорідні властивості, є корисною функцією в системах аналізу

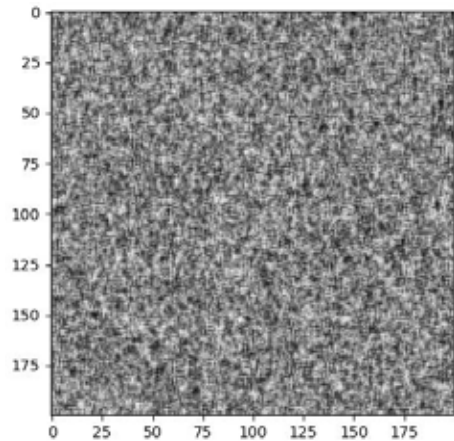


Рис. 2. Текстура, побудована за одновимірними векторами

зображень. В даній статті запропонована модель для генерації штучних текстур з високим паралелізмом. Запропонована модель заснована на рівновазі сил взаємодії між вузлами мережі, та дозволяє генерувати різні текстури зображення з різноманітними характеристиками, такими як ступінь деталізації, нелінійність, хаотичність. Окрім цього досліджується властивість самоорганізації для генерації текстури. Наведені експерименти, які демонструють, що запропонована модель забезпечує успішну генерацію текстур із заданою коваріаційною функцією.

#### Список літератури:

1. P. Arbelaez, J. Pont-Tuset, J. T. Barron, F. Marques, and J. Malik. Multiscale combinatorial grouping. CVPR, 2014.
2. S. Bell, P. Upchurch, N. Snavely, and K. Bala. Opensurfaces: A richly annotated catalog of surface appearance. In Proc. SIGGRAPH, 2013.
3. K. Chatfield, K. Simonyan, A. Vedaldi, and A. Zisserman. Return of the devil in the details: Delving deep into convolutional nets. In Proc. BMVC, 2014.
4. M. Cimpoi, S. Maji, I. Kokkinos, S. Mohamed, and A. Vedaldi. Describing textures in the wild. In Proc. CVPR, 2014.
5. Dodonov, A., Mukhin, V., Zavgorodnii, V., Kornaga, Ya., Zavgorodnya A. (2021). Method of searching for information objects in unified information space. System research and information technologies. No 1(2021). P. 34-46. DOI : <https://doi.org/10.20535/SRIT.2308-8893.2021.1.03>
6. Дранишников Л.В., Загородний В.В. Анализ и оценка риска возникновения техногенных аварий с целью управления их безопасностью на основе информационных технологий. Нові технології». 2008. No4 (22). С. 119-129.
7. R. B. Girshick, J. Donahue, T. Darrell, and J. Malik. Rich feature hierarchies for accurate object detection and semantic segmentation. In Proc. CVPR, 2014.
8. Y. Gong, L. Wang, R. Guo, and S. Lazebnik. Multi-scale orderless pooling of deep convolutional activation features. In Proc. ECCV, 2014.
9. B. Hariharan, P. Arbelaez, R. Girshick, and J. Malik. Simultaneous detection and segmentation. In Computer Vision–ECCV 2014, pages 297-312. Springer, 2014.
10. K. He, X. Zhang, S. Ren, and J. Sun. Spatial pyramid pooling in deep convolutional networks for visual recognition. In Proc. ECCV, 2014.
11. P. Isola, D. Zoran, D. Krishnan, and E. H. Adelson. Crisp boundary detection using pointwise mutual information. In Proc. ECCV, 2014.

12. A. Krizhevsky, I. Sutskever, and G. E. Hinton. Imagenet classification with deep convolutional neural networks. In Proc. NIPS, 2012.
13. Zavgorodnii V., Mukhin V., Komaga Y., Zavgorodnya A., Herasymenko O., Mukhin O. Social Risk Assessment Mechanism Based on the Neural Networks. International Conference on Advanced Trends in Information Theory (ATIT-2019). 18-20 December 2019. P. 179-182. DOI: <https://doi.org/10.1109/ATIT49449.2019.9030519>
14. L. Liu, L. Wang, and X. Liu. In defense of soft-assignment coding. In Computer Vision (ICCV), 2011 IEEE International Conference on, pages 2486–2493. IEEE, 2011.
15. M. Oquab, L. Bottou, I. Laptev, and J. Sivic. Learning and Transferring Mid-Level Image Representations using Convolutional Neural Networks. In Proc. CVPR, 2014.
16. O. M. Parkhi, K. Simonyan, A. Vedaldi, and A. Zisserman. A compact and discriminative face track descriptor. In Proc. CVPR, 2014.
17. X. Qi, R. Xiao, C. G. Li, Y. Qiao, J. Guo, and X. Tang. Pairwise rotation invariant co-occurrence local binary pattern. PAMI, 36(11): 2199-2213, Nov 2014.
18. Завгородній В.В., Завгородня Г.А. Метод подання знань про оцінку ризику виникнення техногенних аварій. Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського, 2018. Випуск № 4 (111). С. 43-48. DOI: <https://doi.org/10.30929/1995-0519.2018.4.43-48>
19. A. S. Razavin, H. Azizpour, J. Sullivan, and S. Carlsson. Cnn features off-the-shelf: An astounding baseline for recognition. In DeepVision workshop, 2014.
20. Завгородній В.В., Отрох С.І., Завгородня Г.А., Грищенко О.О. Аналіз методів подання знань при розпізнаванні надзвичайних ситуацій техногенного характеру. Наукові записки Українського науково-дослідного інституту зв'язку, 2018. № 3. С. 59-69.
21. G. Schwartz and K. Nishino. Visual material traits: Recognizing per-pixel material context. In Proc. CVCP, 2013.
22. L. Sharan, C. Liu, R. Rosenholtz, and E. H. Adelson. Recognizing materials using perceptually inspired features. International Journal of Computer Vision, 103(3): 348-371, 2013.
23. M. Sulc and J. Matas. Fast features invariant to rotation and scale of texture. Technical report, 2014.
24. Y. Wei, W. Xia, J. Huang, B. Ni, J. Dong, Y. Zhao, and S. Yan. Cnn: Single-label to multi-label. 2014.
25. Zavgorodnii V., Zavgorodnya A., Maiko V., Malikov V., Zhuk D. Methods And Models For Assessment Of Reliability Of Structural-Complex Systems. World Science, 2018. № 11 (39). P. 5-14. DOI: [https://doi.org/10.31435/rsglobal\\_ws/30112018/6227](https://doi.org/10.31435/rsglobal_ws/30112018/6227)
26. N. Zhang, J. Donahue, R. Girshick, and T. Darrell. Part-based RCNNs for fine-grained category detection. In Proc. ECCV, 2014.
27. B. Zhou, A. Lapedriza, J. Xiao, A. Torralba, and A. Oliva. Learning deep features for scene recognition using places database. In Proc. NIPS, 2014.

**Zavgorodnii V.V., Zavgorodnya A.A., Demchenko I.V., Kramarenko K.S., Shevchenko I.O., Yurchenko A.V. METHOD OF CREATING ARTIFICIAL TEXTURES WITH SPECIFIED PARAMETERS**

*The work is devoted to solving the problem of generating textures with given parameters. The texture image is considered as a set of random fields. This article discusses random fields and ways to describe them. A random field is a function whose values are random variables. If the values of this function are to be used as a texture generator, additional restrictions are imposed on the field values: first, all random field values have the same distribution, and second, the covariance between the values of the function depends only on the connecting vector: points at which this function is considered, ie the function is stationary.*

*The article hypothesizes that human perception of a random field depends only on the values of covariances.*

*The paper presents the development of a method by which a texture with a given covariance function can be obtained. This problem arises, for example, when setting up object recognition programs, an essential characteristic of which is a random texture. It is argued that random fields have the property of stationarity, ie the covariance between two positions depends only on the vector connecting the positions of these points.*

*Generation of artificial structures describing areas that have homogeneous properties is a useful function in image analysis systems. This paper proposes a model for generating artificial textures with high parallelism. The proposed model is based on the balance of forces of interaction between network nodes, and allows to generate different image textures with different characteristics, such as the degree of detail, nonlinearity, chaos. In addition, the property of self-organization for texture generation is investigated. Experiments are presented that demonstrate that the proposed model provides successful generation of textures with a given covariance function.*

**Key words:** texture, correlation, generator, covariance function, random fields.

**Мацуї А.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Кондратець В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ОПТИМІЗАЦІЯ ВИКОРИСТАННЯ ЕНЕРГІЇ ТА МАТЕРІАЛІВ У КУЛЬОВИХ МЛИНАХ ПРИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОМУ ІНВАРІАНТНОМУ КЕРУВАННІ ПОДРІБНЕННЯМ РУД

Виконано обґрунтування параметрів оцінювання енергоефективності подрібнення руди в кульових млинах. Виокремлено фактори, роль яких в підвищенні продуктивності кульового млина повністю не розкрита. Серед конструктивних факторів – це конструкція кульового млина, його розмір, форма футеровки. Серед технологічних факторів позначено подрібнюваність руди. Експлуатаційні фактори самі багаточисельні. Серед них визначені такі: характеристика крупності подрібнювальних тіл, завантаженість млина рудою, ефективність перемішування матеріалу, розрідження пульпи, ефективність роботи класифікуючого апарату. За ефект дії окремого фактора на кульовий млин прийнято 5% зростання продуктивності або зменшення перевитрат електроенергії, що відповідає 1 балу. Таким підходом об'єднано дію усіх факторів на результат роботи кульового млина в цілому, що дозволяє отримати результуючий ефект, наприклад, розв'язанням статичної оптимальної задачі. Метою оптимізації в даній задачі є отримання результуючої оцінки підвищення енергетичної ефективності кульового млина. Об'єктом оптимізації тут виступає процес підвищення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовим млином. Вхідні параметри оптимізації – витрата матеріалу в млин, споживана електроенергія. Вихідним параметром є енергетична ефективність подрібнення як параметр стану об'єкта. Це еквівалентно збільшенню продуктивності, зменшенню витрати електроенергії. Керуючі параметри – це безпосередньо фактори впливу на кульовий млин. Математичними моделями слугують залежності, які відносяться до теорії кульових млинів. Обмеження встановлені у вигляді рівностей і нерівностей. В якості критерію оптимальності висунута вимога досягнення найбільшого значення умовної оцінки від впливу окремих факторів. Задача розв'язувалася методом динамічного програмування з залученням методу Гауса-Зайделя. Тут виявлено дев'ять стадій оптимізації за числом факторів. Результуючий критерій оптимальності дорівнює сумі критеріїв в окремих стадіях. Критерії оптимальності в кожній стадії встановлювались за даними літературних джерел. Результуючий критерій склав 29. Ефективність роботи кульового млина може покращитись до 2,5 разів. За даними процесу оптимізації запропоновано шляхи покращення енергоефективності кульового млина.

**Ключові слова:** рудопідготовка, кульовий млин, енергоефективність, продуктивність, фактори впливу, оптимізація, шляхи покращення.

**Постановка проблеми.** Україна виробляє значну частку продукції чорної металургії та сировини для неї – залізорудного концентрату, що складає переважну більшість доходів від експорту. Вища собівартість вітчизняної продукції порівняно з зарубіжними аналогами ставить Україну не в однакові умови на світовому ринку. Це переважно викликано тим, що залізорудний концентрат внаслідок значних перевитрат електроенергії, матеріалів у вигляді куль і футеровки, особливо в перших стадіях подрібнення руди, відрізняється більш високою собівартістю. В той же час науковці і практики вказують на можливі шляхи покращення ситуації. Одним із них є удосконалення автоматичного керування рудопідго-

товкою в першій стадії подрібнення руди, оскільки діючі автоматизовані системи багато в чому не відповідають сучасним вимогам. Другим шляхом є врахування конструктивних, технологічних і експлуатаційних факторів з удосконаленням рудопідготовки в спрямуванні їх дії. Тобто, поряд з удосконаленням автоматичного керування рудопідготовкою в першій стадії необхідно удосконалити і керований об'єкт – кульовий млин. Дана робота виконана в межах наукових досліджень за темою “Оптимізація продуктивності кульових млинів по руді і готовому продукту при мінімальних енергетичних і матеріальних перевитратах” (0115U003942), яка входить до плану наукової тематики Центральноукраїнського національного

технічного університету. Враховуючи викладене, тема даної наукової статті є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кульові млини як керовані об'єкти відомі давно. Вони неперервно удосконалюються – збільшуються розміри, змінюються футерівки і молольне середовище, розвивається їх теорія і засоби автоматичного керування. Серед останніх досліджень і публікацій загального характеру стосовно керованого об'єкта можливо відмітити наступні. В роботі [1] розвивається теорія гідромеханіки робочого середовища кульових млинів мокрої подрібнення, а в [2] – технологія примусового подрібнення матеріалів. У монографії [3] викладені основи інтенсифікації процесів рудопідготовки. Нова ресурсозберігаюча RES-технологія дезінтеграції руд в кульових млинах з гумовою футерівкою викладена в [4]. Ці роботи, безумовно, позитивно впливають на удосконалення кульових млинів як керованих об'єктів. Загальні положення автоматичного керування рудопідготовкою розвинуті в роботі [5]. Це адаптивні системи у складі АСК ТП рудопідготовки MineOocad компанії National Steel Pellet Company (США, штат Міннесота). В Україні прикладом реалізації адаптивної системи інтелектуального типу є АСК ТП секцією збагачення руди, впровадженій у ВАТ “Північний ГЗК”, яка створена на базі SCADA-системи TRACE MODE [6]. Ці системи не вирішують усіх задач керування, які висунуті галуззю збагачення корисних копалин. Тому у перспективі на АСК ТП покладають функції підвищення технологічних показників збагачення руд і підвищення якості товарних продуктів [7].

В подальшому інновації стосовно кульового млина як керованого об'єкта здійснюються в напрямках впливу на конструктивні, технологічні та експлуатаційні складові процесу подрібнення. Удосконалення конструкції кульових млинів здійснювалося в основному стосовно створення технологічних агрегатів з низьким рівнем зливу пульпи. Це підтверджується зарубіжними публікаціями [8...10] і публікаціями вітчизняних авторів – Шинкоренко С.Ф., Півняк Г.Г. та ін. У ХХІ столітті зберігаються і отримують подальший розвиток напівсамоподрібнення і стандартне стадіальне дроблення та подрібнення [11]. В такому напрямку технологічних факторів можливо відмітити роботу [12], яка присвячена керуванню операціями подрібнення і класифікації на основі типізації руд. Цей нині прогресивний напрям удосконалення рудопідготовки розпочато в роботі [13].

Найбільша увага в останній час була приділена експлуатаційним факторам. Так, в останні роки опубліковані роботи, присвячені підвищенню ефективності роботи кульових млинів на основі використання комбінованого молольного середовища [14], порівнянню питомої витрати сталевих молольних куль четвертої і п'ятої груп твердості [15]. Формування оптимального кульового молольного середовища з підвищеною енергоефективністю подрібнення руди розглянуто в [16]. Якщо питанням абразивного зносу молольних куль приділяється порівняно велика увага, то корозійні явища вивчені недостатньо. Ці питання досліджувалися в роботі [17]. Встановлено, що частка корозійного зносу складає 25...28% від загальних витрат металевого заліза. Однак підтверджені і інші дані зі значно більшою витратою куль.

Значна увага приділялася і завантаженню куль в процесі їх спрацювання. Одна з проблем це самі дозатори куль, інша – інформаційне забезпечення їх подачі. Складність створення дозаторів зв'язана з великою кількістю куль, що можливо спростити використанням стійких молольних тіл, доступність до яких вже досягнута в Україні [18]. Однак перепоною залишається різномірність куль і частота їх подачі [19]. В основному дослідники розвивають вимірювання активної потужності. До нього у 2006 році повертається М.Д. Даниєл [20], а в 2008 році – К.Я. Улітенко [21]. Потім розробляється підхід з вимірюванням крутного моменту вала приводного двигуна. У сучасних умовах його досліджено в роботі з використанням DEM-моделювання [9]. Однак даний підхід нічого корінного в підвищенні точності вимірювання не вносить і вона залишається невисокою. У праці [10] запропоновано підхід з застосуванням нелінійного спостерігача за обсягом куль і руди в барабані. Однак в [10] відмічається, що для розв'язання цього завдання необхідні ще додаткові життєспроможні та незалежні вимірювання. Оскільки таке завдання не розв'язане, необхідно розробити новий підхід для оцінювання ситуації відносно кульового завантаження.

Завантаженню млинів рудою порівняно з кулями приділялося значно менше уваги. Найбільш широке розповсюдження на вітчизняних і зарубіжних збагачувальних фабриках отримав віброакустичний метод контролю завантаження кульових млинів рудою. У той же час даний метод має недоліки, які впродовж значного часу (з середини шістдесятих років минулого століття) примушують удосконалювати ці пристрої [22]. Незва-



жаючи на значні вдосконалення, віброакустичний метод не забезпечує необхідної точності ідентифікації технологічного параметра. Зрушення в цьому відбулися в останні роки, коли було створено засіб енергоефективного руйнування руди безпосередньо в барабані кульового млина [23].

Розрідженню пульпи в кульових млинах приділялось уваги мало, однак в останні роки виконано серію досліджень в цьому напрямі і опублікована монографія [24], де ця задача розв'язана для технологічних схем подрібнення руди, які застосовують в Україні.

З розглянутого видно, що в дослідженнях, проведених за останні роки, рудопідготовці на збагачувальних фабриках приділялась велика увага. Однак, не дивлячись на це, дослідження здебільшого присвячувалися окремим порівняно вузьким завданням і не отримали завершального оформлення. Це не дозволило узагальнити результати і перевести кульовий млин на функціонування на новому якісно вищому рівні. Тому такі узагальнення необхідно зробити і відкрити шляхи цілеспрямованого підвищення ефективності подрібнення руди кульовими млинами.

**Постановка завдання.** Метою публікації є виокремлення факторів, роль яких в підвищенні ефективності роботи кульового млина першої стадії подрібнення руди повністю не розкрита, оптимізація показника за цими напрямками з наступною розробкою шляхів реалізації покращення рудопідготовки в конкретних умовах виробництва.

**Виклад основного матеріалу.** Самою слабкою ланкою на рудозбагачувальних фабриках є кульовий млин першої стадії подрібнення [25]. Однак до тепер в циклах подрібнення не існує заміни кульовим млинам [26]. Аналіз показав, що даний тип подрібнювального агрегату має досить обмежені можливості зменшення енерговитрат [27]. В той же час в [27] вказується на можливі шляхи покращення характеристик кульового млина. Це також відмічається в роботі [26]. Однак системно ці шляхи підвищення продуктивності і зменшення енергоемності кульових млинів не досліджувалися.

Продуктивність кульового млина визначається рядом факторів як показано на рис. 1. Їх звичайно подають трьома групами. Продуктивність кульового млина при певному завантаженні подрібнювальним середовищем буде тим більшою, чим крупніший подрібнений продукт, чим менший розмір вихідної руди і її густина, краща подрібнюваність і більша споживана технологічним агрегатом корисна потужність. З подрібненістю руди питання залишається відкритим, оскільки вона змінюється в різних типах руди одного родовища, а перероблятися нині може по-різному.

Зараз відсутня чітка визначеність щодо впливу конструктивних факторів на продуктивність кульових млинів. Експериментами підтверджена більша ефективність дії подрібнювального середовища в кульових млинах з низьким рівнем пульпи, тому їх продуктивність на 15% вища

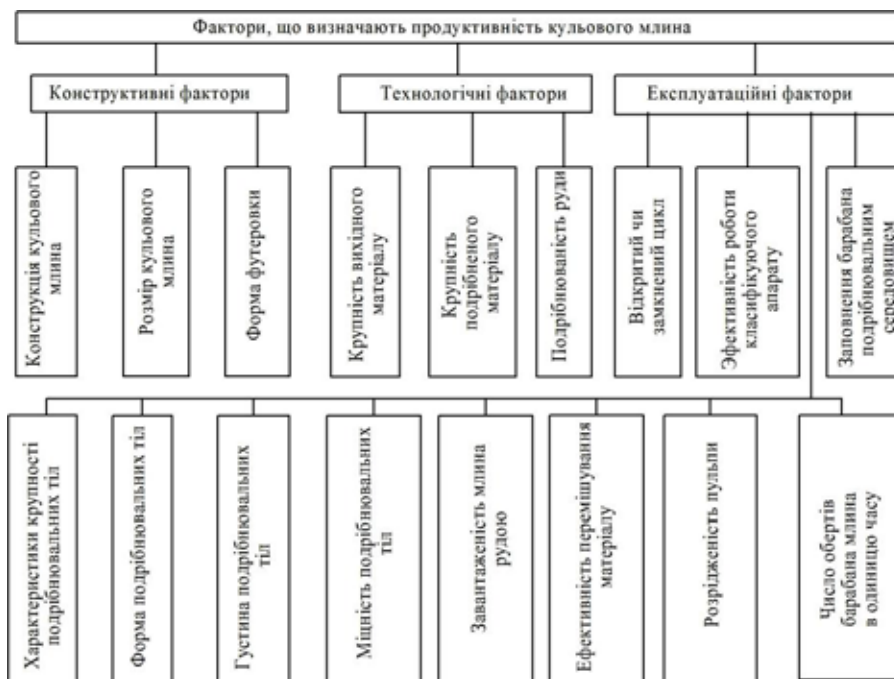


Рис. 1. Фактори, що визначають продуктивність кульового млина

порівняно з технологічними агрегатами з високим рівнем пульпи. Є суперечні дані про вплив розміру кульових млинів на їх продуктивність, відомо, що вона зростає при збільшенні об'єму барабана. Однак відсутні чіткі відповіді на зміну їх енергетичної ефективності подрібнення. Доведено, що продуктивність кульових млинів з гладкою футеровкою нижче порівняно з технологічними агрегатами з ребристою футеровкою.

Важливу роль мають і експлуатаційні фактори. Так, встановлено, що низька ефективність класифікації особливо негативно впливає на роботу кульових млинів при невеликих циркуляційних навантаженнях, серед подрібнювальних тіл найкращим є сталева сфера. Подрібнювальні тіла тим краще працюють, чим вони твердіші і мають більшу густину, міцність, правильну форму. Кульові млини працюють при заповненні кулями на 40...50%, тобто  $\varphi=0,4...0,5$  і з частотою обертання барабана 75...80% від критичної, тобто  $\psi=0,75...0,8$ .

Корисну споживану з електричної мережі потужність кульовим млином, діаметр якого більше 2 м, наближено можливо визначити за залежністю

$$N_{em} = 1,025 N / \eta_{em} = 2,51 \cdot D^{2,5} \cdot L, \text{ кВт}, \quad (1)$$

де  $D$  – діаметр барабана кульового млина;  $L$  – довжина барабана.

Відомо, що суміш куль різного розміру забезпечує більшу продуктивність порівняно з однаковими кулями. Максимальну продуктивність кульового млина забезпечує оптимальна характеристика крупності подрібнювального середовища, однак не існує конкретних рекомендацій щодо її складу.

Кульовий млин ефективно подрібнює матеріал в тому випадку, коли весь простір між кулями заповнено твердим. Якщо таке заповнення не повне, то матеріал і кулі частково не взаємодіють і ефективність подрібнення падає, що зменшує продуктивність, і частково споживання електроенергії. При більшому завантаженні матеріалу кулі розходяться і подрібнення погіршується. Контролює цей процес часто оператор в ручному режимі або з застосуванням автоматичного контролю, однак вважають, що такі технічні засоби ще не достатньо точні.

Розрідження пульпи в млині, з одного боку, визначає ефективність роботи подрібнювальних тіл, з другого, швидкість проходження матеріалу вздовж барабана. Зрозуміло, що оптимальне розрідження пульпи повинно забезпечити максимум ефективності роботи молоткових тіл і відповідну

швидкість видалення матеріалу з млина. Ці питання до теперішнього часу повністю не розв'язані.

Отже, виокремлено дев'ять факторів, які можуть впливати на зменшення енергоємності процесу подрібнення. В роботі [25] як засіб підвищення енергетичної ефективності подрібнення називається раціональний підбір технічних і технологічних параметрів подрібнювальних відділень для кожного конкретного випадку, а також введення попереднього збагачення. В роботі [27] пропонується також адаптація режимів роботи до змінних властивостей подрібнюваного матеріалу і завантаження куль різного діаметра, застосування раціонування завантаження млинів кулями і деякі інші. Як видно з викладеного, всі ці завдання входять в перелік розглянутих факторів, які вказані в [28]. Модернізація кульових млинів, спрямована на зсувне руйнування руди, не отримала розвитку в наслідок низької надійності при контакті виступаючих в середині барабана елементів з кульовим завантаженням [29]. Така ж участь спостигла і пристрої на основі ефекту самозбудження пульсацій завантаження при постійних режимах руху механічної системи млина.

Системно розглянувши фактори, що визначають продуктивність кульового млина, приходимо до висновку, що не повністю розкритою залишилась роль дев'яти достатньо важливих з них, які представлені на рис. 2. Аналізу, зв'язаному з виявленням можливості підвищення продуктивності кульового млина, необхідно піддати всі приведені на рис. 2 фактори. Легко встановити, що вони одночасно прикладені до технологічного агрегату, однак деякі впливають на весь об'єкт, інші лише на його частину. Зважаючи на це при дослідженні впливу конструкції кульового млина, його розміру, завантаженості рудою, ефективності роботи класифікуючого апарату на продуктивність необхідно розглядати весь технологічний агрегат в цілому. В процесі дослідження впливу інших факторів на продуктивність млина доцільно здійснити декомпозицію об'єкта і розглядати їх роль окремо з наступним узагальненням результату. При декомпозиції кульового млина необхідно виділити і дослідити окремі незалежні підсистеми: футеровка, подрібнювальне середовище, подрібнюваність руди, розрідження (в'язкість) пульпи. При цьому в одну незалежну підсистему подрібнювального середовища увійдуть дії факторів – характеристика крупності подрібнювальних тіл, правильність їх форми, густина і твердість.

Аналіз показує, що дію досліджуваних факторів на енергетичну ефективність подрібнення руди



Рис. 2. Фактори, роль яких в підвищенні продуктивності кульового млина повністю не розкрита

в кульовому млині не можливо виразити в таких же одиницях виміру, оскільки відсутні конкретні дані їх впливу на роботу подрібнювального агрегату. Тому, аналізуючи дію конкретного фактора на роботу кульового млина, доводимо його суттєвий позитивний вплив. Якщо він є, наприклад збільшення продуктивності або зменшення енерговитрат, виставляємо умовну оцінку його впливу. При цьому необхідно враховувати і степінь впливу конкретного фактора на створюваний ефект. Ще на початку 60-х років минулого століття встановлено, що автоматичне регулювання процесу подрібнення руди дозволяє збільшити продуктивність млинів на 5...10% [30, с. 78]. Оскільки збільшення продуктивності на 5% складає вагому величину, цей рівень можливо прийняти за одиницю відліку позитивного ефекту конкретного фактора. Якщо, наприклад, збільшення продуктивності складе 10%, то необхідно врахувати дві одиниці і т.д. Як показує аналіз, цим підходом можливо об'єднати дію усіх факторів на результат роботи кульового млина в цілому і отримати результуючий ефект. Цього можливо досягнути розв'язанням оптимальної задачі.

Метою оптимізації в даній задачі є отримання результуючої оцінки підвищення енергетичної ефективності кульового млина при подрібненні руди в першій стадії. Зрозуміло, що дана задача відноситься до статичної оптимізації.

Об'єктом оптимізації тут виступає процес підвищення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовим млином. Об'єкт оптимізації передбачає виокремлення чотирьох груп параметрів – вхідних, керуючих, збудуючих і вихідних. Ці параметри слід розглядати або до кульового млина в цілому, або до окремих незалежних його підсистем. До вхідних параметрів у даному процесі необхідно віднести витрату матеріалу в кульовий млин, підведена електроенергію до

технологічного агрегату. Вихідним параметром тут буде енергетична ефективність подрібнення як параметр стану об'єкта. Оскільки в даних дослідженнях її визначати не вдається, то необхідно в якості вихідних параметрів розглядати збільшення продуктивності, зменшення перевитрати електроенергії. За змістом даної задачі до керуючих параметрів необхідно віднести самі фактори, що впливають на кульовий млин. Математичними моделями даного об'єкта оптимізації слугують залежності, які відносяться до теорії кульових млинів. Однак продуктивність необхідно коригувати, враховуючи час на прості обладнання при планово-попереджувальних ремонтах, на заміну футеровки і кульового завантаження, відмови технологічних агрегатів. Фактичну продуктивність можна визначити відповідно формулі

$$Q_{\phi} = Q \cdot \frac{(n_p - n_N)}{n_p}, \quad (2)$$

де  $Q$  – продуктивність млина;  $n_p$  – кількість робочих днів у році;  $n_N$  – кількість днів простою технологічного обладнання в рік.

Цим буде враховуватись надійність технологічного обладнання, ефективність його ремонту і обслуговування, що впливає на річні показники збагачувальної фабрики.

Тут основними обмеженнями є

$$Q > Q_N \text{ при } N \leq N_N \text{ або } Q = Q_N \text{ при } N < N_N, \quad (3)$$

де  $Q, N$  – відповідно досягнута продуктивність при корисній витраченій потужності;  $Q_N, N_N$  – продуктивність і корисна витрачена потужність нормативного процесу подрібнення (до оптимізації).

Для розв'язання завдання необхідно визначитись з критерієм оптимальності. В якості критерію оптимальності може бути висунута вимога досягнення найбільшого значення умовної оцінки від впливу окремих факторів. При цьому зручно

прийняти “1” за відлік досягнутого вагомого позитивного ефекту при дії конкретного фактора, тобто  $J_i = 1$ .

Виходячи з розглянутого і враховуючи число змінних, види математичних моделей і обмежень, приходимо до висновку, що для розв’язання даної задачі оптимізації підходить метод динамічного програмування, оскільки він є ефективним засобом розв’язання задач оптимізації дискретних багатостадійних процесів, для яких загальний критерій оптимальності описується адитивною функцією критеріїв оптимальності окремих стадій. Тут виокремлюємо дев’ять стадій оптимізації, розуміючи під стадією один з впливових факторів – конструкція кульового млина, розмір кульового млина та ін.

Метод динамічного програмування фактично являє собою алгоритм визначення оптимальної стратегії управління на усіх стадіях процесу. Закон управління на кожній стадії зазвичай знаходять шляхом розв’язання частинних задач оптимізації послідовно для усіх стадій процесу за допомогою інших методів дослідження. В більшості практичних задач кінцевий результат отримують лише в чисельній формі. Скористаємося методом Гаусса-Зайделя. У цьому методі по чергово змінюють всі незалежні змінні так, щоб за кожною з них досягалось найбільше значення критерію оптимальності. Черговість варіювання незалежних змінних при цьому можливо встановлювати довільно. Результуючий критерій оптимальності буде дорівнювати сумі критеріїв оптимальності, отриманих в кожній стадії. У даній задачі вхід першої стадії відповідає нульовому значенню критерію оптимальності  $J=0$ . Оптимізацію тут можливо розпочинати з будь-якого фактора.

З залученням достатньо широкого переліку вітчизняних і зарубіжних літературних джерел шляхом аналізу встановлені критерії оптимальності в кожній стадії оптимізації, які були присвячені окремому фактору.

В результаті проведених досліджень встановлено, що за усіма напрямками можливого покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах отримано позитивний результат. В окремих стадіях оптимізації отримані різні критерії – від 1 до 9. Більшість факторів забезпечують критерій оптимальності на рівні одиниці, проте вибором конструкції або розміру кульового млина його можливо збільшити відразу на 4 одиниці. Молольне середовище при його правильному виборі забезпечує значення критерію оптимальності на рівні 9. Гумова футеровка, коли

вона буде мати стійкі результати в першій стадії подрібнення, може забезпечити значення критерію оптимальності на рівні 7. Графічна інтерпретація результуючого критерію оптимальності оптимізації енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах при повній реалізації впливу усіх факторів приведена на рис. 3. З рис. 3 видно, що перед оптимізацією критерій дорівнює нулю, потім він збільшується від стадії до стадії, досягаючи найбільшого значення 29. Порядок здійснення стадій оптимізації на кінцевий результат не впливає. Кінцевий результат оптимізації вагомий, однак необхідно більш детально розглянути шляхи досягнення покращення ефективності кульового млина.

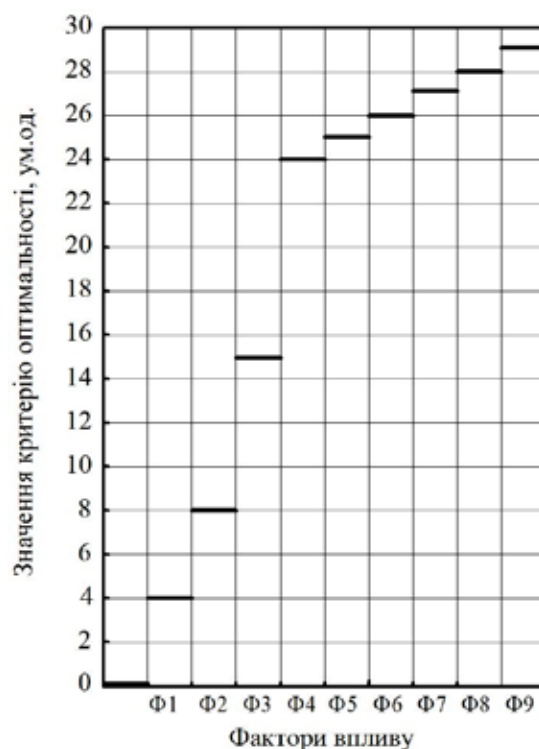


Рис. 3. Вплив факторів на критерій оптимальності при їх повній реалізації

Найбільш імовірні варіанти подані на рис. 4. Тут розглядаються можливі варіанти покращення показників кульового млина в різних умовах підприємства або побажання і можливостей керівного складу. Як видно з рис. 4, відповідно усім представленим варіантам можливо досягти суттєвого покращення роботи кульового млина. Не виключається і реалізація вигоди навіть від впливу одного з факторів. Оскільки спочатку вводилася умова за “1” рахувати покращення результату від впливу фактора на 5%, то за критерієм оптимальності можливо оцінити вплив одного чи кількох факторів на покращення ефективності роботи кульового



Рис. 4. Можливі шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах

млина. Наприклад, варіант, де критерій оптимальності складає  $J=15$ , відносна зміна показника буде  $0,05 \times 15 = 0,75$ . Це означає, що ефективність роботи кульового млина може покращитись в 1,75 рази. Як видно, ефективність роботи кульового млина може суттєво покращитись – до 2,5 разів порівняно з існуючим варіантом. Однак тут розглянуто лише технічний бік питання стосовно технологічного агрегату. Для реалізації цих можливостей необхідно понести і деякі тимчасові і фінансові витрати. По-перше, багато з розглянутого вимагає автоматичного управління. По-друге, у ряді випадків необхідна модернізація або придбання нового обладнання. По-третє, і саме головне, для досягнення поставлених задач необхідно у багатьох випадках змінити психологію відношення до праці, підняти професійність і відповідальність за виконання службових обов'язків. Необхідно ретельно виконувати інструктивні вимоги до технологічного процесу і обладнання, що включає жорсткий контроль якості футеровки, куль, регламенту і якості проведення ремонтних робіт та ін. Така ж увага повинна приділятися і сировині, що надходить на переробку, оскільки вона часто більш вартісна порівняно з обладнанням і матеріалами, які використовуються при переробці. Крім того, сировина не повинна виходити за межі якості, приписані технологічним процесом. Щоб

успішно розв'язати поставлені задачі, необхідно об'єднати зусилля всіх учасників цього достатньо непростого процесу.

При цьому також необхідно мати на увазі, що при зростанні одиничної продуктивності кульових млинів чітко прослідковується погіршення показників енерговіддачі. Зростання енерговіддачі прослідковується для кульових млинів з об'ємом до  $60 \text{ м}^3$ , потім енерговіддача зростає повільно або навіть стабілізується. Межею цього показника є  $8 \dots 10 \text{ кВт/т}$ . Проф. С.Ф. Шинкаренко відмічає, що для кульових млинів при збільшенні діаметра зростають капітальні і приведені витрати. В кожному конкретному випадку існує розмір млина, перевищення якого зменшує ефективність подрібнення.

Деяко пізніше відмічається: “при збільшенні розміру млина більше певних значень ефективність подрібнення в них зменшується; зміна діаметра, довжини і частоти обертання барабана в різній степені впливає на продуктивність і питомі витрати електроенергії”. Далі відмічається, що більш високий приріст продуктивності на кубометр збільшення об'єму млина при менших питомих витратах електроенергії відповідає варіанту зі збільшенням довжини барабана. Отже, покращення є, однак необхідно робити уточнення в кожній конкретній ситуації.



**Висновки.** Таким чином, виконано аналіз вітчизняного і зарубіжного практичного досвіду рудопідготовки, виокремлено фактори, які можуть вплинути на покращення енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами. Методом динамічного програмування здійснена оптимізація енергетичної ефективності подрібнення руди кульовими млинами, де розглядалося дев'ять стадій. В кожній стадії оптимізації шляхом аналізу процесів встановлювався абсолютний рівень критерію оптимальності величиною "1", якщо показник поліпшувався на 5%, тобто кожним 5% приросту показника встановлювалася "1". У всіх стадіях критерій оптимальності склав не менше 1, найбільш високе значення отримано на рівні 9, а результуючий критерій оптимальності, який дорівнює сумі часткових, склав 29. Показано, що ефективність роботи кульового млина може покращитись до 2,5 разів порівняно з існуючим варіантом.

Відповідно до даних процесу оптимізації запропоновано шляхи реалізації покращення енергетичної ефективності подрібнення руди в кульових млинах у вигляді шести гілок, які можуть забезпечити результат, виходячи з побажання й можливостей підприємства. Реалізація оптимальних варіантів удосконалення подрібнення руди потребує тимчасових і фінансових витрат, а також автоматизації низки процесів, яка зводить нанівець вплив людського фактора на кінцевий результат. Аналіз показує, що доцільним є комплексне енергоефективне інваріантне керування повним конкретним циклом рудопідготовки збагачувальної фабрики.

Перспективою подальших досліджень у даному напрямі є реалізація запропонованих гілок організації процесу подрібнення руди в залежності від умов конкретних збагачувальних фабрик та розробка відповідних систем енергоефективного інваріантного керування їх технологіями.

#### Список літератури:

1. Шинкоренко С.Ф. Гидромеханика рабочей среды шаровых мельниц мокрого измельчения. *Горный журнал*. 2002. № 7. С. 19–24.
2. Півняк Г.Г., Кириченко В.І., Кириченко В.В. Млини і технологія примусового подрібнення матеріалів. *Наука і інновації*. 2006. Т.2. № 3. С. 20–27.
3. Маляров П.В. Основы интенсификации процессов рудоподготовки. Ростов-на-Дону: Ростиздат, 2004. 320 с.
4. Дырда В.И., Калашников В.А., Хмель И.В. Новая ресурсо- и энергосберегающая RES-технология дезинтеграции руд в шаровых мельницах с резиновой футеровкой. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 108. С. 54-64.
5. Herbst J.A., Pate W.T., Oblad A.E. Model-based control of mineral processing operations. *Powder Technology*. 1992. Vol.69. P. 21–32.
6. SCADA TRACE MODE в АСУТП обогащения руды Северного ГОКа. URL: <http://www.tracemode.ua> (дата звернення 15.04.2015).
7. Модернизация и развитие систем автоматизированного контроля и управления / Золотков Н.Ф. и др. *Горный журнал*. 2012. № 10. С. 89–92.
8. Selective ensemble modeling load parameters of ball mill based on multi-scale frequency spectral features and sphere criterion / Tang J. et. al. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2016. № 66-67. P. 485–504. doi: 10.1016/j.ymssp.2015.04.028.
9. Frequency domain characterization of torque in tumbling ball mills using DEM modelling: Application to filling level monitoring / Pedrayes F. and other. *Powder Technology*. 2018. Vol. 323. P. 433–444. DOI: 10.1016/j.powtec.2017.10.026.
10. Le Roux J.D., Craig I.K. Requirements for estimating the volume of rocks and balls in a grinding mill. *IFAC-PaperOnLine*. 2017. Vol. 50. Iss.1. P. 1169–1174. DOI: 10.1016/j.ifacol.2017.08.403.
11. Арсентьев В.А., Баранов В.Ф., Вайсберг Л.А. Современное состояние и перспективы развития процессов дробления и измельчения минерального сырья. *Горный журнал*. 2007. № 2. С. 10–14.
12. Улитенко К.Я., Морозов В.В. Управление операциями измельчения и классификации на основе типизации руд. *Горный информационно-аналитический бюллетень*. 2014. № 3. С. 162–167.
13. Бызов В.Ф. Усреднительные системы на горно-обогатительных предприятиях. Москва: Недра, 1988. 220 с.
14. Яценко А. А. О повышении эффективности работы шаровых мельниц на основе использования комбинированной мелющей загрузки. *Обогащение руд*. 2011. № 3. С. 3–5.
15. 2018 Большой старт промышленных испытаний. Испытание № 2. Сравнение удельного расхода стальных мелющих шаров четвертой и пятой групп твердости. URL: <http://www.energosteel.com/2018-bolshoy-start-promyshlennyih-ispytaniy-ispytanie-2-sravnienie-udel'nogo-rashoda-stalnyih-melyuschih-sharov-chetvertoy-i-pyatoy-grupp-tverdosti/> (дата звернення: 19.04.2018).
16. Jayasundara C.T., Yang R.Y., Yu A.B. Effect of the size of media on grinding performance in stirred mills. *Minerals Engineering*. 2012. Vol. 33. P. 66-71.

17. Lui A.W., Hocy G.R. Mechanisms of corrosive wear of steel balls in grinding hematite ore. *Canadian Metallurgist Quarterly*. 1975. Vol.14, No.3. P.281-285.
18. Lam M.M., Serov A.I., Smirnov E.N., Bazarova G.S. Mastering the production of 40- and 60mm diam. grinding balls in hardness classes III and IV at the Donetsk Metal-rolling Plant. *Metallurgist*. 2016. Vol. 60. P. 1–7.
19. Bwalya M.M., Moys M.H., Finnie G.J., Mulenga F.K. Exploring ball size distribution in coal grinding mills. *Powder Technology*. 2014. Vol. 257. P. 68–73. DOI: 10.1016/j.powtec.2014.02.044.
20. Daniel M. J. Measurement of electrical energy consumption in a Bond ball mill. *Proc. Of the XXIII Intern. Mineral Processing Congress*. 2006. P. 92–97.
21. Улитенко К. Я. Оптимизация шаровой загрузки барабанных мельниц по потребляемой мощности. *Обогащение руд*. 2008. № 5. С. 42–44.
22. Улитенко К.Я., Соколов И.В., Маркин Р.П. Применение виброакустического анализа для контроля объемного заполнения мельниц. *Цветные металлы*. 2005. № 10. С. 63–66.
23. Kondratets V., Matsui A., Yatsun V., Lichuk M. Identification of energy efficiency of ore grinding and the liner wear by a three-phase motion of balls in a mill. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2019. № 3/5 (99). P. 21–28.
24. Кондратець В.О., Сербул О.М., Мацуй А.М. Автоматизація процесів керування розрідженням пульпи при подрібненні руди барабанными млинами. Кіровоград: КОД, 2013. 368 с.
25. George A. Parks. Surface and international free energies of quartz. *Journal of Geophysical Research*. 1984. Vol. 89. P. 3997–4008.
26. Малярів П.В. Проблемы снижения энергоемкости и повышения эффективности процессов рудо-подготовки. *Современные процессы комплексной и глубокой переработки труднообогатимого минерального сырья (Плаксинские чтения 2015): материалы межд. совещ. (Иркутск, 21-25 сент. 2015 г.)*. Иркутск, 2015. С. 65–70.
27. Хопунов Э.А. Анализ причин низкой энергоэффективности процессов разрушения минерального сырья. *Современная техника и технология*. 2014. № 10. С. 42–51.
28. Баранов В.Ф., Сентемова В.А., Ядрышников А.О. О модернизации технологии рудоподготовки отечественных железорудных фабрик. *Обогащение руд*. 2005. № 1. С. 5–8.
29. Гончаров С.А. Резерв снижения энергозатрат при добыче и переработке железных руд. *Горный журнал*. 2016. № 6. С. 96.
30. Божко М.П., Маргулис В.С. Машинист мельницы. Москва: Гостехнаучиздат лит. по горному делу, 1962. 100 с.

#### **Matsui A.M., Kondratets V.O. OPTIMISATION OF ENERGY AND MATERIAL USE IN BALL MILLS WITH ENERGY EFFICIENT INVARIANT CONTROL OF ORE GRINDING**

*Justification of parameters for evaluation of energy efficiency of ore grinding in ball mills is performed. Factors, the role of which in improving the performance of ball mill is not fully disclosed, are highlighted. Among the design factors are the design of ball mill, its size, the shape of the liner. Among technological factors, the grindability of ore is mentioned. Operational factors are the most numerous. Among them are characteristic particle size of crushed bodies, mill workload with ore, efficiency of material mixing, pulp dilution and efficiency of classifying device. The effect of a single factor on a ball mill is taken as 5% increase in productivity or decrease in energy consumption, which corresponds to 1 point. This approach combines the effect of all factors on the result of ball mill operation as a whole, thus making it possible to obtain the resulting effect, e.g. by solving a static optimum problem. The purpose of the optimization in this problem is to obtain a resulting estimate of the increase of the energy efficiency of a ball mill. The object of optimization here is the process of increasing the energy efficiency of ore grinding by a ball mill. The input parameters of the optimization are material flow rate to the mill, increased energy consumption. The input parameter is the energy efficiency of grinding as an object state parameter. This is equivalent to increased throughput, reduced energy consumption. The controlling parameters are directly influencing factors on the ball mill. The mathematical models are the dependencies relating to ball mill theory. The constraints are set in the form of equations and inequalities. The requirement of achieving the highest value of the conditional evaluation of the influence of individual factors was put forward as the criterion of optimality. The problem was solved by dynamic programming using the Gauss-Seidel method. It revealed nine stages of optimization according to the number of factors. The resulting optimality criterion is equal to the sum of criteria in separate stages. The optimality criteria in each stage were established according to the literature. The resulting criterion was 29. Ball mill efficiency could improve by 2.5 times. Based on the optimization process, ways to improve the energy efficiency of the ball mill are suggested.*

**Key words:** ore preparation, ball mill, energy efficiency, performance, impact factors, optimization, ways to improve.

**Сарнацький В.В.**

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

**Баклан І.В.**

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

## МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ІНФЕКЦІЙНИХ ЗАХВОРЮВАНЬ

*У даній роботі викладені результати щодо огляду методів та засобів моделювання динаміки розповсюдження інфекційних захворювань.*

*Була відібрана література за темою епідеміологічного моделювання у джерелах PubMed та Google Scholar за тегами 'infection modeling', 'disease modeling', 'epidemiological modeling', 'agent-based model', 'individual-based models', 'compartmental models', 'epidemiology tools', 'agent based modeling tools', 'compartmental modeling tools'. Запропоновані у літературі методи та засоби були класифіковані за типом використаних моделей на дві категорії: компартментні та агентні.*

*Компартментні моделі були класифіковані за типом, серед яких були виокремлені моделі SIR, SIS, SEIR та їх модифікації.*

*Були проаналізовані представлені науковою спільнотою засоби та інструменти реалізації компартментних та агентних моделей з метою оцінки гнучкості та обсягу можливостей, а також з метою виокремлення їх переваг та недоліків. Аналіз показав, наявність значної кількості програмних засобів реалізації агентних моделей, що дозволяють доволі гнучко описувати різні сценарії їх поведінки та інтеракції, проте маючих спільний недолік – необхідність від користувача володіти тією чи іншою мовою програмування. Єдиний інструмент серед знайдених, що не потребує від користувача передових навичок програмування – платформа NetLogo. Натомість вона надає власну предметно-орієнтовану мову програмування, за допомогою якої виконується опис агентів. І хоча моделювання в NetLogo є доступнішим для значно більшої частки дослідників, вона значно програє іншим підходам до моделювання у швидкодії. Цей факт робить її непридатною для використання у разі значної кількості агентів.*

*Щодо програмних інструментів реалізації компартментних моделей, було проаналізоване середовище Kendrick, що включає в себе одноіменну предметно-орієнтовану мову програмування.*

*Виходячи з результатів проведеного аналізу можна зробити наступні висновки: агентні моделі стрімко набирають свою популярність у порівнянні з компартментними через більшу доступність обчислювальних ресурсів та більшу точність; серед представників програмних інструментів реалізації агентних моделей не існують ті, що надають простий інтерфейс користувача/програмний інтерфейс, не зазначаючи при цьому значних проблем з продуктивністю.*

**Ключові слова:** епідеміологія, моделювання, агенти, агентні моделі, компартментні моделі, моделювання епідемії, інфекційні захворювання, засоби моделювання.

**Постановка проблеми.** Моделювання будь-яких явищ є невіддільною частиною як у процесі прогнозування їх перебігу, так і у плануванні стратегії впливу на ці явища. Пандемія COVID-19, спричинена коронавірусом SARS-CoV-2 [1, с. 536] показала невідповідність людства до таких глобальних епідемій. Невдалі та несвоєчасні спроби боротьби з її розповсюдженням у межах міст, країн та всього світу призвели як до погіршення економічного й епідеміологічного стану окремих країн [2, с. 1], та і психологічного стану населення [3, с. 1; 4, с. 1]. Попри значну

кількість спроб моделювання розповсюдження інфекційних захворювань, більша частина з них має схожий висновок – своєчасне впровадження заходів боротьби з розповсюдженням таких захворювань призводить до успішного «згладжування кривої» динаміки захворювань, що має вирішальне значення у разі обмеженості медичних ресурсів. Так як математичне/комп'ютерне моделювання впливу таких заходів є найефективнішим методом пошуку оптимальної стратегії їх впровадження, дослідження у сфері епідеміологічного моделювання є над-



звичайно важливими для боротьби з майбутніми епідеміями.

За останні роки спостерігається значне збільшення інтересу до епідеміологічних моделей агентного типу, що показують більшу точність за класичні моделі. При цьому, їх реалізація є складною через необхідність мати значні навички комп'ютерного програмування, що може бути проблемою для частки дослідників у сфері епідеміології.

**Аналіз існуючих рішень.** У даній роботі представлений огляд сучасних методів та інструментів епідеміологічного моделювання з виокремленням їх переваг та недоліків.

З метою пошуку літератури за означеною предметною областю, була проаналізована онлайн-бібліотека наукових робіт PubMed та Google Scholar. Запити на пошук виконувались за тегами: 'infection modeling', 'disease modeling', 'epidemiological modeling', 'agent-based model', 'individual-based models', 'compartmental models', 'epidemiology tools', 'agent based modeling tools', 'compartmental modeling tools'. Була виконана класифікація знайдених робіт за типом використаної моделі. Роботи на основі моделей компартментного типу були розділені на групи за типом використаної компартментної моделі.

**Постановка завдання.** Основними завданнями даної роботи є аналіз літератури у сфері епідеміологічного моделювання з ціллю пошуку та виокремлення окремих типів використаних епідеміологічних моделей, засобів та інструментів моделювання; їх аналіз із означенням переваг та недоліків; узагальнення глобального стану та вектору розвитку наукових досліджень у даній області на поточний момент часу; винесення пропозиції щодо потенційно корисних напрямків досліджень.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Серед окреслених у знайдених роботах методів моделювання розповсюдження інфекційних захворювань можна виділити дві основні групи: методи на основі компартментних моделей та на основі агентних. Кожна з груп має значну кількість представників, тому вони будуть розглянуті окремо.

**Компартментні моделі.** Компартментні моделі були першими запропоновані для опису розповсюдження інфекційних захворювань [3, с. 1]. Центральною ідеєю цього підходу є розподіл модельованого населення на групи за певною ознакою (найчастіше всього використовується стан протікання хвороби), та опис динаміки

зміни кількості представників кожної групи з часом. Так, класичною є модель SIR [5, с. 149; 6, с. 1; 7, с. 184] що передбачає наявність трьох груп серед представників населення:

Susceptible (S) – група, члени якої не були інфіковані та можуть бути інфікованими у майбутньому;

Infectious (I) – група, члени якої були інфіковані та можуть інфікувати представників групи S;

Recovered/Removed (R) – група, члени якої перенесли модельоване захворювання, не можуть бути інфікованими повторно та не можуть інфікувати інших. Ця група представляє частину населення, що придбала постійний імунітет, або померла.

У рамках моделі SIR, кожна група розглядається як функція кількості представників цієї групи від часу. Так,  $S(t)$ ,  $I(t)$ ,  $R(t)$  – кількості членів груп S, I, R відповідно пов'язані системою диференційних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\beta S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dI(t)}{dt} = \frac{\beta S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (1)$$

де  $\beta$  і  $\gamma$  – темп розповсюдження та відновлення відповідно;  $N$  – загальна кількість представників населення.

Модель SIR була використана дослідниками для моделювання широкого спектра інфекційних захворювань. Так, авторами [8, с. 1] модифікована версія даної моделі була використана для моделювання розповсюдження COVID-19 та аналізу ефективності карантинних заходів щодо його обмеження. Модифікація полягала у розбитті звичних груп населення на підгрупи. Група I була розбита за ознакою способу інфікування та тяжкістю протікання захворювання, а з групи R була виділена окрема підгрупа, представники якою могли інфікувати інших, хоча і не мали симптомів.

Для моделювання інфекцій, імунітет до яких не є довгостроковим (наприклад грип, застуда), використовується модель SIS. З назви моделі можна помітити, що група R замінюється групою S, що означає, що інфіковані у минулому представники модельованої популяції після одужання можуть бути інфіковані знову. Формулювання моделі представлено системою рівнянь 2.

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\beta S(t)I(t)}{N} + \gamma I(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \frac{\beta S(t)I(t)}{N} - \gamma I(t) \end{cases} \quad (2)$$

де параметри  $\gamma$  та  $\beta$  аналогічні моделі SIR.

Автори [9, с. 1] запропонували решіткову модель SIS для дослідження впливу просторової конфігурації регіонів догляду за хворими на динаміку розповсюдження інфекційного захворювання. У роботі [10, с. 1] модель SIS була використана для моделювання розповсюдження інфекційних захворювань авіарейсами.

Хоча моделі SIR та SIS є доволі простими, вони не здатні точно моделювати розповсюдження інфекційних захворювань. Так, з рівняння 1 видно, що темпи розповсюдження та відновлення залишаються незмінними протягом часу. Автори [11, с. 3279] показали, що урахування  $\beta$  та  $\gamma$  як функцій від часу дозволяє більш точно моделювати розповсюдження епідемії COVID-19.

У більшості розглянутих робіт, самі групи населення також зазнають змін. Так значна частина робіт використовує модель SEIR, що відрізняється від розглянутої моделі SIR додатковою категорією населення – Exposed (E). Представники цієї групи відрізняються від представників групи I тим, що не мають симптомів модельованого захворювання хоча і були інфіковані. Класичне формулювання моделі SEIR представлено системою рівнянь 3.

$$\begin{cases} \frac{dS(t)}{dt} = -\frac{\beta S(t)I(t)}{N} \\ \frac{dE(t)}{dt} = \frac{\beta S(t)I(t)}{N} - \sigma E(t) \\ \frac{dI(t)}{dt} = \sigma E(t) - \gamma I(t) \\ \frac{dR(t)}{dt} = \gamma I(t) \end{cases} \quad (3)$$

де  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\sigma$  – темп розповсюдження, відновлення та переходу від стану E до I відповідно;  $N$  – загальна кількість представників населення.

Автори [12, с. 1] використали модифіковану модель SEIR для моделювання розповсюдження COVID-19. Модифікація полягає у розбитті групи I на  $I_A$  – асимптоматичних інфікованих та  $I_S$  – симптоматичних інфікованих та урахуванні динаміки цих груп окремо. За допомогою розробленої моделі було обчислене базове репродукційне число ( $R_0$ ) [13, с. 813], та, отримавши величину рівну 2.3, автори зробили висновок, що без заходів протидії пандемія не зникне. Просторова модель SEIR на основі графів була використана для моделювання розповсюдження коклюшу [14, с. 120] у штаті Небраска авторами [15, с. 388]. Дослідники виконали порівняння точності моделювання розповсюдження цього захворювання класичною моделлю SEIR та модифікованою і помітили значне завищення кількості хворих, притаманне класичній моделі, але відсутнє у разі використання модифікованої.

Модель SEIR була використана для моделювання розповсюдження COVID-19 у багатьох країнах та регіонах світу [16, с. 1160; 17, с. 1; 18, с. 1; 19, с. 1; 20, с. 1].

Для моделювання певних захворювань може бути використана спеціально адаптована під це захворювання модель. Так, автори [21, с. 743] адаптували модель SEIR під механізм розповсюдження вірусу Зіка [22, с. 601]. Розроблена модель окрім груп населення урахувала стани життєвого циклу комах, що є розповсюджувачами вірусу. Розширена модель SEIR була використана для моделювання розповсюдження ВІЛ [23, с. 1764] серед гомосексуальних чоловіків, що є значною групою носіїв цього вірусу серед населення КНР [24, с. 1].

Одними з часто використовуваних модифікацій моделі SEIR, є моделі, що ураховуються процес вакцинації. Так, подібна модель була використана для оцінки впливу вакцинування на розповсюдження COVID-19 авторами [25, с. 1], грипу – авторами [26, с. 1].

*Агентні моделі.* За останні роки серед представників наукової спільноти спостерігається збільшення популярності агентних або індивідуальних моделей розповсюдження інфекційних захворювань. Ці моделі відрізняються від компартментних тим, що замість моделювання динаміки певної групи популяції, розглядають кожного її представника (агента) окремо. Таким чином, для моделей агентного типу характерною є множиною індивідуумів (найчастіше людей, хоча можуть бути модельовані й інші представники біосфери, у разі коли вони беруть участь у процесі розповсюдження захворювання), що мають певний набір параметрів. Агенти можуть контактувати, інфікуючи один одного, призводячи до розповсюдження інфекційного захворювання.

Основним стримуючим фактором розвитку агентних моделей у минулому є значний обсяг обчислювальних ресурсів, необхідних для їх використання. Так, використання моделі з кількістю агентів рівною  $N$  буде вимагати обрахунку контактів на кожній ітерації, що значно ускладнює моделювання великих населених областей реального світу. І хоча ця оцінка може бути зменшена за допомогою певних оптимізацій, реалізація їх буде вимагати від дослідника навичок у сфері програмування та комп'ютерних наук.

Попри те, що агентні моделі значно складніші у реалізації ніж компартментні, вони здатні моделювати складні стохастичні процеси, притаманні сценаріям реального світу, що робить їх

ефективнішими за моделі компартментного типу [27, с. 415, 28, с. 1].

Як і компартментні моделі, моделі агентного типу були використані дослідниками для моделювання широкого спектра сценаріїв розповсюдження інфекційних захворювань, таких як: віспи у разі біотерористичної атаки [29, с. 1428], туберкульозу [30, с. 1538], пташиного грипу (H5N1) [31, с. 209], звичайного грипу [32, с. 61], корі [33, с. 1], малярії [34, с. 1], COVID-19 [35, с. 1352; 36, с. 1; 37, с. 1].

Автори [35, с. 1352] використали агентну модель для моделювання розповсюдження SARS-CoV-2 серед населення Австралії та зробили висновок, що попри деякі спрощення притаманні агентним моделям, їх ефективність дозволяє достатньо точно моделювати розповсюдження інфекційних захворювань. Подібні висновки зробили й автори [36, с. 1], що дослідили розповсюдження COVID-19 у разі перебування агентів у межах спільного приміщення. Автори [37, с. 1] дослідили використання агентних моделей для моделювання COVID-19 серед населення столиці Колумбії – міста Богота, та ефективності карантинних заходів. Для моделювання процесу протікання захворювання, була використана дискретизована модель  $SEI_{A, I, S, C}RMD$ , що являє собою модифіковану модель  $SEIR$ . Аналіз чутливості моделі показав, що закриття 40% публічних установ призведе до значного зменшення темпу розповсюдження захворювання.

Автори [34, с. 1] використали модифіковану агентну модель для опису процесу розповсюдження малярії. Модель була побудована на основі класичного підходу до просторового моделювання розповсюдження інфекційних моделей, проте у процес моделювання були додані такі фактори як температура навколишнього середовища, опади та ландшафт. З представлених результатів був зроблений висновок, що модель має високий ступінь узгодженості з реальними епідеміологічними даними, значну роль у якому грає урахування параметрів навколишнього середовища.

У роботі [38, с. 1] дослідники зазначили, що більшість представлених в науковій спільноті агентних моделей мають спільний недолік – припущення, що розподіл вразливих до захворювання агентів є рівномірним. Автори запропонували метрику для оцінки ступеня групування вразливих агентів у межах приміщення та, використавши модель агентного типу, отримали результати, що свідчать про те, що високий рівень групування призводить до більшого значення

базового репродукційного числа, що має негативний вплив на динаміку пробігання епідемії.

Значною перевагою агентних моделей над компартментними є їх здатність до моделювання у рамках приміщень, де просторова їх конфігурація грає значну роль у динаміці інфікування. Автори [39, с. 1] запропонували просторову агентну модель на основі графів, що може бути використана для моделювання контактів з інфікованими агентами у межах супермаркету. Автори використали цю модель на синтетичному супермаркеті для оцінки тривалості контакту з інфікованими та, відповідно, ймовірності інфікування.

Автором [40, с. 463] агентна модель була використана для моделювання розповсюдження захворювань, що передаються кліщами. Було зазначено, що динаміці розповсюдження таких захворювань характерні складні стохастичні процеси, моделювання яких методом компартментних моделей має певні складності. З отриманих результатів був зроблений висновок, що при використанні у даній предметній області, агентні моделі мають меншу схильність до перебільшення швидкості розповсюдження захворювань.

Висока гнучкість, характерна агентним моделям, має свої недоліки. Автори [41, с. 3071] зазначили, що для високої точності моделювання агентні моделі мають пройти через процес прискіпливого калібрування на реальних даних. Так, з запропонованої авторами моделі, був зроблений висновок що церкви мають значний вплив на швидкість розповсюдження захворювання. І, у разі якщо латентний період хвороби випадає на неділю (коли значна частина населення відвідує церкви), слід очікувати значне збільшення випадків інфікування. Також, авторами були висунута гіпотеза, що перший інфікований агент також має вплив на протікання епідемії.

Попри те, що агентним моделям характерна більша точність при моделюванні розповсюдження інфекційних захворювань, автори [42, с. 1] порушили питання ефективності заходів протидії цьому процесу, що були протестовані на агентних моделях. Адже, досі не було приведено ніяких доказів ефективності таких заходів, що йде всупереч з принципами доказової медицини. Дослідники також зауважили, що автори жодної роботи з агентних моделей в епідеміології не довели відсутність факторів, притаманних реальному світу, що можуть вплинути на ефективність таких моделей.

*Програмні засоби моделювання.* Окрім методів моделювання розповсюдження інфекційних

захворювань, був виконаний пошук програмних засобів їх реалізації. Далі приведений короткий опис знайдених засобів.

Swarm [43, с. 1] являє собою набір бібліотек для мови програмування Java. Як слідує з назви, модель сформульована як множина агентів, що можуть контактувати один з одним, розклад подій та динаміка еволюції агентів. І хоча дана платформа є досить потужною та гнучкою, необхідність володіти мовою Java обмежує її використання серед епідеміологів. Swarm має своє ідеологічне продовження – Ascape [44, с. 212], що має дещо спрощений інтерфейс користувача, та менш жорсткі вимоги до рівня володіння мовою Java.

Repast [45, с. 1] – оснований на мові програмування Java пакет програм для реалізації агентних епідеміологічних моделей надає користувачеві широкий набір засобів аналітики їх роботи. Проте, як і у випадку з Swarm, потребує навичок програмування для опису поведінки агента, що також лімітує його використання.

NetLogo [46, с. 16] являє собою платформу для опису агентних моделей, що складається з двох основних компонентів:

- Предметно-орієнтована мова програмування, за допомогою якої здійснюється опис агентів, еволюції їх внутрішніх станів, поведінки, інтеракції один з одним;
- Бібліотека інструментів аналітики для виконання аналізу даних, отриманих як результат моделювання.

Моделюване середовище має просторову структуру у вигляді квадратної сітки, комірки якої можуть бути зайняті агентами. Агенти здатні переміщуватись між комірками сітки та контактувати з агентами сусідніх комірок відповідно до описаних користувачем правил.

Простий графічний інтерфейс дозволяє користувачеві описувати складні моделі [47, с. 1, 48, с. 1564], не маючи при цьому навичок програмування, а широкий спектр засобів аналітики дозволяє робити глибокий аналіз отриманих результатів.

І хоча NetLogo дозволяє описувати доволі складні агентні моделі, її гнучкість тягне за собою головний її недолік – швидкість роботи. У роботі [49, с. 425] автори показали, що час обчислення однієї ітерації епідеміологічної моделі, реалізованої на NetLogo програє реалізації за допомогою СУРБД Oracle у 5-100 разів (залежить від кількості агентів моделі), що робить NetLogo непридатною для опису великих моделей. Окрім

цього, значним недоліком NetLogo у використанні для епідеміологічного моделювання є труднощі в опису взаємодії агентів, що не розташовані у сусідніх комірках середовища.

Окремої уваги заслуговує мова та платформа для епідеміологічних досліджень Kendrick [50, с. 1]. Будучи предметно-орієнтованою мовою програмування, Kendrick надає можливість користувачеві моделювати процес розповсюдження інфекційних захворювань використовуючи абстракції високого рівня. Такий рівень мовної абстракції дозволяє швидко реалізовувати модель, не звертаючи уваги на тонкості програмної реалізації чисельних методів, характерних програмним реалізаціям компартментних моделей. Лістинг програми на мові Kendrick представляє собою опис наступних сутностей:

- Моделі – опис SIR-подібних моделей досліджуваних захворювань;
- Композиції моделей – комбінація описаних вище моделей;
- Сценарії – опис початкового стану симуляції;
- Симуляція – опис параметрів симуляції;
- Візуалізації – описують набір вихідних даних та метод їх графічного представлення.

Авторами роботи був показаний процес моделювання захворювання вірусом кору [51, с. 420] та умовного захворювання з комахами в якості носіїв та двома видами чутливих до захворювання організмів за допомогою мови Kendrick.

Варто зазначити, що робота [50, с. 1] є єдиною спробою використати предметно – орієнтовану мову моделювання для опису розповсюдження інфекційних захворювань серед опрацьованих робіт. Автори зазначили, що використання подібних мов для даної предметної області є перспективним напрямком дослідження, адже звільняє дослідників від необхідності власноруч програмувати алгоритми чисельних методів, що лежать в основі компартментних моделей, що потребує значних навичок програмування. Також, такий підхід значно зменшує час програмної реалізації моделей та збільшує швидкість ітерування у процесі дослідження.

Автори [50, с. 1] також зазначили, що використання предметно-орієнтованої мови моделювання є перспективним напрямком у дослідженні й агентних моделей розповсюдження інфекційних захворювань.

**Висновки.** Була проаналізована література з метою аналізу методів та засобів моделювання розповсюдження інфекційних захворювань. Була знайдена значна кількість робіт присвячених

як компартментним, так й агентним методам, а також програмним інструментам реалізації цих моделей. Агентні моделі, популярність яких зазнає ріст, показали себе більш ефективними за компартментні, хоча і більш вимогливі до обсягу доступних обчислювальних ресурсів. Програмні засоби реалізації агентних моделей мають спільний недолік – значні вимоги щодо навичок програмування у користувача, що обмежує потенційну аудиторію. Платформа NetLogo, що не зазнає цього недоліку оскільки має простий графічний інтерфейс, містить ряд

значних проблем зі швидкодією. Був знайдений та проаналізований єдиний засіб реалізації компартментних моделей – платформа Kendrick, що використовує спеціально розроблену мову програмування для опису моделей, та має досить низькі вимоги до навичок програмування у користувача, та допустимий рівень швидкодії.

Агентні моделі мають значні переваги у порівнянні з компартментними, проте відсутність доступних програмних засобів їх реалізації показує необхідність у дослідженнях та розробках у цьому напрямку.

### Список літератури:

1. Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses и др. “The species Severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2». В: *Nature microbiology* 5.4 (2020), с. 536. doi: 10.1038/s41564-020-0695-z.
2. Raj Dandekar и George Barbastathis. “Quantifying the effect of quarantine control in Covid-19 infectious spread using machine learning”. В: *medRxiv* (2020).
3. Fatma Altuntas и Mehmet Sahin Gok. “The effect of COVID-19 pandemic on domestic tourism: A DEMATEL method analysis on quarantine decisions”. В: *International Journal of Hospitality Management* 92 (2021), с. 102719.
4. Yunhe Wang и др. “The impact of quarantine on mental health status among general population in China during the COVID-19 pandemic”. В: *Molecular psychiatry* (2021), с. 1–10.
5. David G Kendall. “Deterministic and stochastic epidemics in closed populations”. В: *Contributions to Biology and Problems of Health*. University of California Press, 2020, с. 149–166.
6. Ross Beckley и др. “Modeling epidemics with differential equations”. В: *Tennessee State University Internal Report* (2013).
7. Tiberiu Harko, Francisco SN Lobo и MK Mak. “Exact analytical solutions of the Susceptible-Infected-Recovered (SIR) epidemic model and of the SIR model with equal death and birth rates”. В: *Applied Mathematics and Computation* 236 (2014), с. 184–194.
8. Konstantin S Sharov. “Creating and applying SIR modified compartmental model for calculation of COVID-19 lockdown efficiency”. В: *Chaos, Solitons & Fractals* 141 (2020), с. 110295.
9. Shipeng Nie и Weide Li. “Using lattice SIS epidemiological model with clustered treatment to investigate epidemic control”. В: *Biosystems* 191 (2020), с. 104119.
10. Alberto Ceria и др. “Modeling airport congestion contagion by heterogeneous SIS epidemic spreading on airline networks”. В: *Plos one* 16.1 (2021), e0245043.
11. Yi-Cheng Chen и др. “A time-dependent SIR model for COVID-19 with undetectable infected persons”. В: *IEEE Transactions on Network Science and Engineering* 7.4 (2020), с. 3279–3294.
12. Samuel Mwalili и др. “SEIR model for COVID-19 dynamics incorporating the environment and social distancing”. В: *BMC Research Notes* 13.1 (2020), с. 1–5.
13. George Macdonald. “The analysis of equilibrium in malaria”. В: *Tropical Disease Bulletin* 49.9 (1952), с. 813–829.
14. James D Cherry. “The history of pertussis (whooping cough); 1906–2015: facts, myths, and misconceptions”. В: *Current Epidemiology Reports* 2.2 (2015), с. 120–130.
15. Kimia Ameri и Kathryn D Cooper. “A Network-Based compartmental model for the spread of whooping cough in Nebraska”. В: *AMIA Summits on Translational Science Proceedings 2019* (2019), с. 388.
16. Hee-Young Shin. “A multi-stage SEIR (D) model of the COVID-19 epidemic in Korea”. В: *Annals of Medicine* 53.1 (2021), с. 1160–1170.
17. Suwardi Annas и др. “Stability analysis and numerical simulation of SEIR model for pandemic COVID-19 spread in Indonesia”. В: *Chaos, Solitons & Fractals* 139 (2020), с. 110072.
18. Zubair Ahmad и др. “A report on COVID-19 epidemic in Pakistan using SEIR fractional model”. В: *Scientific Reports* 10.1 (2020), с. 1–14.
19. Wenning Li и др. “An evaluation of COVID-19 transmission control in Wenzhou using a modified SEIR model”. В: *Epidemiology & Infection* 149 (2021).

20. Michael W Levin, Mingfeng Shang и Raphael Stern. “Effects of short-term travel on COVID-19 spread: A novel SEIR model and case study in Minnesota”. В: *Plos one* 16.1 (2021), e0245919.
21. Eva K Lee, Yifan Liu и Ferdinand H Pietz. “A compartmental model for Zika virus with dynamic human and vector populations”. В: *AMIA Annual Symposium Proceedings*. Т. 2016. American Medical Informatics Association. 2016, с. 743.
22. Anthony S Fauci и David M Morens. “Zika virus in the Americas—yet another arbovirus threat”. В: *New England journal of medicine* 374.7 (2016), с. 601–604.
23. Kent A Sepkowitz. “AIDS—the first 20 years”. В: *New England Journal of Medicine* 344.23 (2001), с. 1764–1772.
24. Z Lu и др. “A mathematical model for HIV prevention and control among men who have sex with men in China”. В: *Epidemiology & Infection* 148 (2020).
25. Ernesto P Esteban и Lusmeralis Almodovar-Abreu. “Assessing the impact of vaccination in a COVID-19 compartmental model”. В: *Informatics in Medicine Unlocked* 27 (2021), с. 100795.
26. JOzden O DalgИс и др. “Deriving effective vaccine allocation strategies for pandemic influenza: Comparison of an agent-based simulation and a compartmental model”. В: *PloS one* 12.2 (2017), e0172261.
27. Dirk Eisinger и Hans-Hermann Thulke. “Spatial pattern formation facilitates eradication of infectious diseases”. В: *The Journal of applied ecology* 45.2 (2008), с. 415. doi: 10.1111/j.1365-2664.2007.01439.x.
28. Steven F Railsback и Volker Grimm. *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press, 2019.
29. M Elizabeth Halloran и др. “Containing bioterrorist smallpox”. В: *Science* 298.5597 (2002), с. 1428–1432.
30. Megan Murray. “Determinants of cluster distribution in the molecular epidemiology of tuberculosis”. В: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99.3 (2002), с. 1538–1543.
31. Neil M Ferguson и др. “Strategies for containing an emerging influenza pandemic in Southeast Asia”. В: *Nature* 437.7056 (2005), с. 209–214.
32. Philip Cooley и др. “Protecting health care workers: a pandemic simulation based on Allegheny County”. В: *Influenza and other respiratory viruses* 4.2 (2010), с. 61–72.
33. Wayne TA Enanoria и др. “The effect of contact investigations and public health interventions in the control and prevention of measles transmission: A simulation study”. В: *PloS one* 11.12 (2016), e0167160.
34. Md Zahangir Alam и др. “A spatial agent-based model of Anopheles vagus for malaria epidemiology: examining the impact of vector control interventions”. В: *Malaria journal* 16.1 (2017), с. 1–20.
35. Mariusz Maziarz и Martin Zach. “Agent-based modelling for SARS-CoV-2 epidemic prediction and intervention assessment: A methodological appraisal”. В: *Journal of Evaluation in Clinical Practice* 26.5 (2020), с. 1352–1360.
36. Erik Cuevas. “An agent-based model to evaluate the COVID-19 transmission risks in facilities”. В: *Computers in biology and medicine* 121 (2020), с. 103827.
37. Jonatan Gomez и др. “INFEKTA—An agent-based model for transmission of infectious diseases: The COVID-19 case in BogotДа, Colombia”. В: *PloS one* 16.2 (2021), e0245787.
38. Elise Kuylen и др. “Clustering of susceptible individuals within households can drive measles outbreaks: an individual-based model exploration”. В: *Scientific reports* 10.1 (2020), с. 1–12.
39. Fabian Ying и Neave O’Clery. “Modelling COVID-19 transmission in supermarkets using an agent-based model”. В: *Plos one* 16.4 (2021), e0249821.
40. Holly Gaff. “Preliminary analysis of an agent-based model for a tick-borne disease”. В: *Mathematical Biosciences and Engineering* 8.2 (2011).
41. Lisa Sattenspiel, Jessica Dimka и Carolyn Orbann. “Using cultural, historical, and epidemiological data to inform, calibrate, and verify model structures in agent-based simulations”. В: *Mathematical Biosciences and Engineering* 16.4 (2019), с. 3071–3093.
42. Mariusz Maziarz и Martin Zach. “Assessing the quality of evidence from epidemiological agent-based models for the COVID-19 pandemic”. В: *History and Philosophy of the Life Sciences* 43.1 (2021), с. 1–4.
43. *Swarm*. 2021. url: [http://www.swarm.org/wiki/Main\\_Page](http://www.swarm.org/wiki/Main_Page).
44. Padmavathi Patlolla и др. “Agent-based simulation tools in computational epidemiology”. В: *International Workshop on Innovative Internet Community Systems*. Springer. 2004, с. 212–223.
45. *Repast*. 2021. url: <https://repast.github.io/>.
46. Seth Tisue и Uri Wilensky. “Netlogo: A simple environment for modeling complexity”. В: *International conference on complex systems*. Т. 21. Boston, MA. 2004, с. 16–21.

47. Supercomputing Challenge и др. “Epidemiology model of Covid-19”. В: – (2021).
48. Clara Prats и др. “Individual-based modeling of tuberculosis in a user-friendly interface: understanding the epidemiological role of population heterogeneity in a city”. В: *Frontiers in microbiology* 6 (2016), с. 1564.
49. КК Avilov и О Yu Solovey. “Institute of numerical mathematics of Russian Academy of Sciences Moscow Institute of Physics and Technology (State University)”. В: ().
50. Mai Anh BUI T и др. “The Kendrick modelling platform: language abstractions and tools for epidemiology”. В: *BMC bioinformatics* 20.1 (2019), с. 1–13.
51. Fiona M Guerra и др. “The basic reproduction number (R0) of measles: a systematic review”. В: *The Lancet Infectious Diseases* 17.12 (2017), e420–e428.

## **Sarnatskiy V.V., Baklan I.V. METHODS AND TOOLS FOR MODELING THE SPREAD OF INFECTIOUS DISEASES**

*This paper presents the results of a review of methods and tools for modeling the dynamics of the spread of infectious diseases.*

*The literature on epidemiological modeling in PubMed and Google Scholar was selected under the tags 'infection modeling', 'disease modeling', 'epidemiological modeling', 'agent-based model', 'individual-based models', 'compartmental models', 'epidemiology tools', 'agent-based modeling tools', 'compartmental modeling tools'. The methods and tools proposed in the literature were classified according to the type of models used into two categories: compartmental and agent-based.*

*Compartment models were classified by type, among which the SIR, SIS, SEIR models and their modifications were singled out.*

*The tools presented by the scientific community for the implementation of compartmental and agent-based models were analyzed in order to assess the flexibility and scope of possibilities, as well as to highlight their advantages and disadvantages. The analysis showed the presence of a significant number of software tools for implementing agent-based models, which allow to flexibly describe different scenarios of their behavior and interaction, but have one aspect in common – the need for the user to know a programming language. The only tool found that does not require the user to have advanced programming skills is the NetLogo platform. Instead, it provides its own domain-specific programming language, which is used to describe agents. And while modeling in NetLogo is more accessible to a much larger proportion of researchers, it lags far behind other approaches to modeling in performance. This fact makes it unusable in the case of a large number of agents.*

*Regarding the software tools for the implementation of compartmental models, the Kendrick environment was analyzed, which includes the domain-specific programming language of the same name.*

*Based on the results of the analysis, the following conclusions can be drawn: agent models are rapidly gaining in popularity compared to compartment models due to greater availability of computing resources and greater accuracy; Among the representatives of software tools for implementing agent models, there are no ones that provide a simple user interface / software interface, without experiencing significant performance issues.*

**Key words:** *epidemiology, modeling, agents, agent models, compartment models, epidemic modeling, infectious diseases, modeling tools.*

**Ткачук А.Г.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Добржанський О.О.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Богдановський М.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Кравчук А.Р.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ПРОЕКТУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДЛЯ МОНІТОРИНГУ НАЯВНОСТІ ШКІДЛИВИХ ТА ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ГАЗІВ НА БАЗІ РОБОТИЗОВАНОЇ ГУСЕНИЧНОЇ ПЛАТФОРМИ

*Приведено загальну класифікацію існуючих роботів, детальну увагу приділено роботам AMR. Проаналізовано дослідження спрямовані на розробку систем спостереження на базі мобільних платформ (безпілотних літальних апаратів, колісних роботизованих платформ, надводних та підводних дронів тощо). Проаналізовано їх переваги та недоліки. Проаналізовано дослідницькі напрямки у сфері моніторингу рівня забрудненості повітря. У статті розглянуто нову інформаційно-вимірну систему для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. Встановлено, що дана система є необхідною для попередження про можливі загрози вибухів чи отруєння газами, проведення рятувальних робіт тощо. Описано розроблену конструкцію роботизованої гусеничної платформи, зображено класичну схему гусеничних коліс та описано її рухи. Звернено увагу на положення приводу, адже в залежності від орієнтації в просторі приводу, залежить напрямок обертання його вихідного валу, а відповідно і напрямок руху гусеничних траків. Приведено функціональну схему інформаційно-вимірної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. Проаналізовано загальну схему зв'язку між мобільною інформаційно-вимірною системою і наземною станцією, описано процес передачі даних. Для побудови карти газу використовується спеціальна програма (код цієї програми доступний у відкритому репозиторії github). Проведено статичний експеримент розробленої системи, основною ідеєю проведення якого було вивчення залежності відстані джерела газу до вимірної системи та покази концентрації газу. Досліджено датчики газів MQ-5 та MQ-9. Основною ідеєю проведення статичного експерименту є вивчення залежності відстані джерела газу до вимірної системи та покази концентрації газу.*

**Ключові слова:** газоаналізатор, роботизована платформа, регулювання, інформаційно-вимірнувальна система, точність.

**Постановка проблеми.** Робототехніка є сьогодні однією з пріоритетних галузей науки і техніки. Якщо розглядати, для прикладу, військову галузь, то серед існуючого озброєння можна зустріти інтелектуальних роботів з «очима», «вухами» і іншими сенсорами. Аналогічно родам військ сучасні розвідувальні роботи діляться на три групи: наземні, літаючі і плаваючі. Розвідувальна система має встановити: склад і угруповання противника, наявність резервів, накреслення переднього краю, опорні пункти,

розташування в них вогневих засобів, систему вогню і загороджень, інженерне обладнання місцевості, місця (координати) важливих об'єктів.

Сьогодні приладові розвідувальні системи, в основному, встановлюються на БПЛА (не проводиться розвідка всередині будівель) та мають обмежений функціонал. Тому використання багатфункціональних приладових інформаційно-вимірних систем на базі саме мобільних роботизованих гусеничних платформ є актуальним та доцільним.



**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні існує багато досліджень спрямованих на розробку систем спостереження на базі мобільних платформ (БПЛА, колісних тощо). Проте відсутні роботи про системи-аналоги, яку запропоновано реалізувати у даному проєкті. Існує декілька дослідницьких напрямків у сфері моніторингу рівня забрудненості повітря, візуального контролю та побудови мобільних роботизованих платформ.

У роботі [1, с. 2] описано стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих машини.

У статті [2, с. 231] та [3, с. 4] вказано недоліки систем, запропонованих в [1], а саме те, що вони є стаціонарними.

У роботах [4, с. 149; 5, с. 3] відображено результати досліджень локалізації небезпечних газів на відкритому повітрі. Представлено систему, що здатна виконувати пошук газів по різних сценаріях забруднення. Дану систему було вдосконалено враховуючи непередбачуваний характер розсіювання газу, що описано в [6, с. 36].

У роботах [7, с. 60; 8, с. 6] запропоновано в якості чутливого елемента системи стабілізації використовувати коріолісовий вібраційний гіроскоп. Проаналізовано склад і принцип роботи відомої системи ударо- і віброзахисту навігаційного комплексу. Однак, відсутні пропозиції по покращенню технічних характеристик системи, аналіз математичної моделі та похибок чутливих елементів системи.

**Постановка завдання.** Мобільний робот – це робот здатний до самостійного переміщення.

Мобільні роботи загалом поділяють на (рис. 1):

- AMR (Autonomous Mobile Robots);
- AGV (Automatic Guided Vehicle).

AMR – даний тип роботів має змогу навігації з неконтрольованого середовища або без необхідної участі пристроїв електромеханічного та фізичного управління, або за допомогою пристрою управління, що дозволяє переміщення за вже визначеним маршрутом у певному просторі.

AGV – даний тип роботів, зазвичай, відносять до промислових. Вони складаються з багатозв'язного маніпулятора та схвату, що зафіксовані на нерухомій поверхні.

Використання AMR є актуальним та навіть необхідним для інформаційно-вимірювальних систем для проведення розвідувальних операцій. Для переміщення AMR використовує дані з камер, вбудованих датчиків і лазерних сканерів, а також складне програмне забезпечення. Такий



Рис. 1. Класифікація роботів за типом механічної частини

робот працює повністю автономно і якщо перед ним виникають різні перешкоди, AMR буде безпечно маневрувати навколо них, використовуючи кращий альтернативний маршрут. Це значно оптимізує продуктивність роботи і робить даний тип роботів набагато гнучкішими в порівнянні з AGV [9].

Класифікація за типом навігаційних схем:

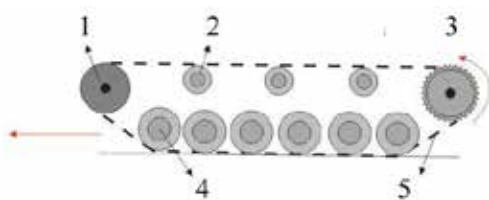
- Глобальна – визначення абсолютних координат для довгих маршрутів;
- Локальна – визначення координат до певної або початкової точки;
- Персональна – позиціонування роботом частин тіла та взаємодія з навколишніми об'єктами. Зазвичай дану схему використовують для маніпуляторів;
- Спостереження за траєкторією.

Класифікація мобільних роботів за середовищем в якому вони переміщуються: повітряні; морські; сухопутні.

*Мета* – розробити інформаційно-вимірну систему для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Роботи, призначені для переміщення кам'янистими, нерівними та грубими поверхнями, розробляються як гусеничні.

Важлива відмінна якість гусеничних мобільних роботів полягає в їх маневреності. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць окремо, мобільний робот може легко змінювати напрямок власного руху.



**Рис. 2. Класична схема гусеничних коліс:**  
 1. Лівинець (напрявне колесо); 2. Підтримуючий коток; 3. Ведуче колесо; 4. Опорний коток; 5. Гусениця

Важлива відмінна гусеничних мобільних роботів від інших полягає в їх маневреності. Володіючи незалежним приводом для кожної з гусениць окремо, мобільний робот може легко міняти напрям свого руху. Завдяки тому, що швидкість кожної з гусениць регулюється окремо, досить легко управляти рухом мобільного робота. Для завдання будь-якого напрямку руху необхідно змінити відносну швидкість приводів.

Важливо звертати увагу на положення приводу, адже в залежності від орієнтації в просторі приводу залежить напрямок обертання його вихідного валу, а відповідно і напрямок руху гусеничних траків. Наприклад, для того щоб робот рухався вперед, необхідно, щоб його лівий привід обертався «проти годинникової стрілки», а правий – «за годинниковою стрілкою» (рис. 3).



**Рис. 3. Схема руху вперед гусеничного шасі**

1. Для того щоб рухатися прямо, необхідно, щоб правий і лівий приводи оберталися з однаковою швидкістю в напрямку «прямо».

2. Для того щоб повернути ліворуч, необхідно, щоб швидкість правого приводу була більше, ніж швидкість лівого. Чим більше буде різниця швидкостей, тим менше буде радіус розвороту при русі.

3. Для того щоб повернути праворуч, необхідно, щоб швидкість правого приводу була менше, ніж швидкість лівого. Чим більше буде різниця швидкостей, тим менше буде радіус розвороту при русі.

4. Для того щоб повернути ліворуч на місці, необхідно, щоб правий привід обертався «прямо», а лівий – «назад» з такою ж швидкістю.

5. Для того щоб повернути праворуч на місці, необхідно щоб лівий привід обертався «прямо», а правий «назад» з такою ж швидкістю.

6. Для того щоб рухатися назад, необхідно, щоб правий і лівий приводи оберталися з однаковою швидкістю в напрямку «назад» [10].

Гусеничні роботи є найбільш ефективними внаслідок більш високих можливостей в плані подолання перешкод та її стійкості. При наявності допоміжних пристроїв, таких як фліппер або додаткові механічні кінцівки, що дозволяють спертися на недоступні для основних гусениць ділянки перешкод. Крім того, велика площа зіткнення з поверхнею дозволяє гусеничним роботам пересуватися під великим нахилом, ніж можуть собі дозволити колісні роботи. При цьому для управління гусеничним роботом потрібно менше двигунів і набагато менше розрахунків в порівнянні з мобільними роботами, які використовують для переміщення кінцівки. У рятувальній

і розвідувальній робототехніці основними типами задач є задачі створення карти навколишньої місцевості, планування маршруту, розпізнавання людей та інших об'єктів.

Принцип дії запропонованої інформаційно-виміральної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи зображено у вигляді функціональної схеми на рис. 4.

Із центру моніторингу та управління задаватиметься маршрут, вид вимірюваних газів та їх допустима концентрація. Персонал, що знаходиться у робочій зоні буде проінформований про небезпеку системою сигналізації, котра також за необхідності інформуватиме про виявлення надзвичайної ситуації. В блоці вимірювань, що розміщується на мобільній системі, проводиться зняття показів детекторів газу, дані обробляються за допомогою плати Arduino та передаються, за допомогою бездротового з'єднання на комп'ютер, де проводиться аналіз інформації про газовий стан у приміщенні.

Загальна схема зв'язку між мобільною системою і наземною станцією описується на рис. 5.

Arduino Yun створює власне TCP-з'єднання на порту 255. Наземний комп'ютер створює точку

доступу Wi-Fi. Arduino Yun і мобільна платформа підключаються до цієї точки доступу Wi-Fi. Для побудови карти газу використовується спеціальна програма (код цієї програми доступний у відкритому репозиторії github).

Було проведено статичні вимірювання в лабораторії ДП «Житомирстандартметрології» з вимірювання сталої концентрації метану. Отримані результати для датчиків MQ-5 (рис. 6) та MQ-9 (рис. 7) зображено на відповідних графіках.

З першого графіка видно, що в першому вимірюванні значення виходить на поточне за 70 с, але пікова концентрація не є рівномірною і коливається між 61 та 63 ppm. Повернення у вихідне значення відбувається за 38 с.

У другому вимірюванні спостерігаємо більш рівномірне пікове значення у 58 ppm. Вихід від номінальної до пікової концентрації відбувається за 60 с, що на 14% швидше за попередній, а повернення у початкове значення за 18 с, що на 53% швидше.

З другого графіка можна побачити, що в першому вимірюванні значення напруги виходить на поточне за 36 с і швидко фіксується на значенні 0,81 В. Але помітним недоліком даної установки є те, що повернення у номінальне значення відбувається досить довго – цілих 152 с.

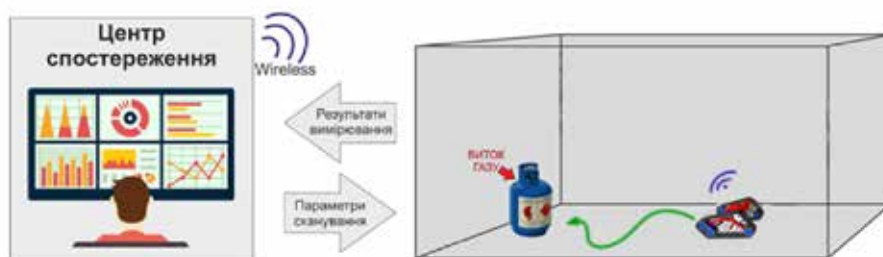


Рис. 4. Функціональна схема інформаційно-виміральної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи



Рис. 5. Схема зв'язку

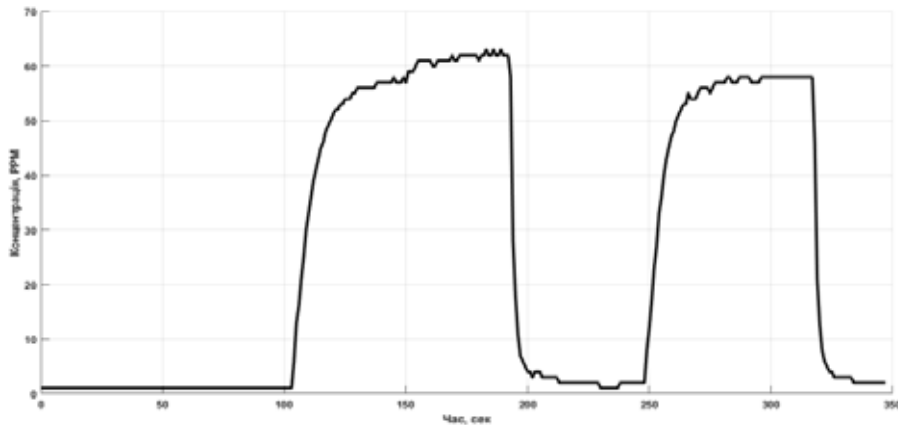


Рис. 6. Графік зміни концентрації метану в часі для датчика MQ-5

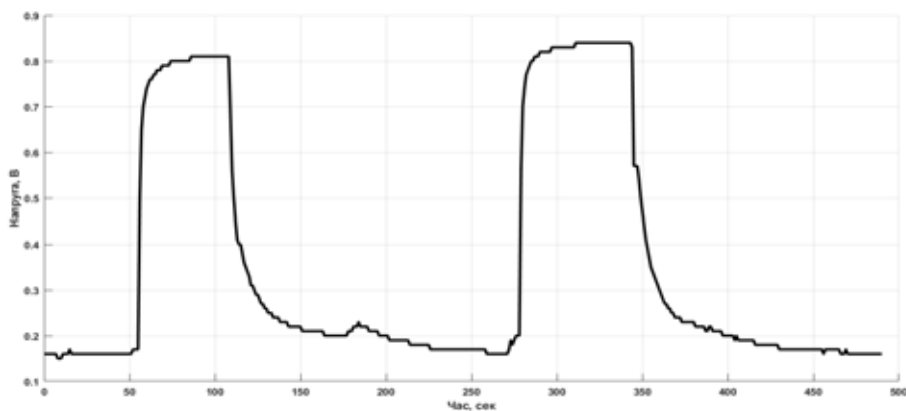


Рис. 7. Графік зміни вихідної напруги в часі для датчика MQ-9

У другому вимірюванні бачимо щось схоже: швидкість стабілізації значення напруги – 41 с, а повернення у номінальне значення за 128 с.

У кожній з установок є свої переваги та недоліки. Нерівномірні пікові значення в першій установці можна пояснити шумами, які створюють надто довгі проводи-конектори, але ця проблема легко усувається мінімізацією їх довжини та екрануванням. Друга установка показала також досить непоганий результат хоча й період одного вимірювання (від номінального до номінального значення) у неї досить великий – 209 секунд проти 128 секунд в першій установці [11].

Отже, враховуючи всі проведені вимірювання і їх аналіз, можна зробити висновок про доцільність використання будь-якої із запропонованих установок так як результати цілком задовольняють необхідній швидкості реакції на зміну газового середовища.

**Висновки.** Розглянуто нову інформаційно-вимірювальну систему для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. Встановлено, що дана система є необхідною для попередження про можливі загрози вибухів чи отруєння газами, проведення рятувальних робіт тощо. Описано розроблену конструкцію роботизованої гусеничної платформи. Приведено функціональну схему інформаційно-вимірювальної системи для моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі роботизованої гусеничної платформи. Проаналізовано загальну схему зв'язку між мобільною інформаційно-вимірювальною системою і наземною станцією. Проведено статичні експерименти з вимірювання сталої концентрації метану датчиками газів MQ-5 та MQ-9. На основі отриманих результатів було зроблено висновок про доцільність використання будь-якого із запропонованих датчиків для спроектованої системи.

Список літератури:

1. Калінін О.М., Костюк В.В., Русіло П.О., Варванець Ю.В. Стан і перспективи розвитку самохідних дистанційно-керованих машини для потреб Збройних Сил України. *Вісник НТУ "ХПІ"*. 2016. № 39.
2. Yu TC, Lin CC, Chen CC, et al. Wireless sensor networks for indoor air quality monitoring. *Medical engineering & physics*, 2013, 35(2):231-235. DOI: 10.1016/j.medengphy.2011.10.011.
3. Li J, Murong Li JX, Lai B, et al. Wireless sensor network for indoor air quality monitoring. 2014, 4:6. DOI: 10.1016/j.medengphy.2011.10.011.
4. Bartholmai M, Neumann P. Micro-drone for gas measurement in hazardous scenarios via remote sensing. 2010, 149:152.
5. Neumann P, Bartholmai M, Schiller JH, et al. Micro-drone for the characterization and self-optimizing search of hazardous gaseous substance sources: A new approach to determine wind speed and direction. In: *Robotic and Sensors Environments (ROSE)*, 2010 IEEE International Workshop on; IEEE; 2010. p. 1-6. DOI: 10.1109/rose.2010.5675265.
6. Neumann P, Asadi S, Schiller JH, et al. An artificial potential field based sampling strategy for a gas-sensitive micro-drone. In: *IROS Workshop on Robotics for Environmental Monitoring (WREM)*; 2011. p. 34-38.
7. Chikovani V.V. Influence of shock on the vibration amplitude stabilization system of Coriolis vibratory gyroscope resonator / V.V. Chikovani // *Електроніка та системи управління*. – № 4(34). – 2012р. – С. 56-63.
8. Remillieux, G.; Delhayе, F. Sagem Coriolis Vibrating Gyros: A vision realized/ Remillieux G.; Delhayе F.// *Inertial Sensors and Systems Symposium (ISS)*, 2014. – С. 1-13.
9. AGV vs. AMR. – Режим доступа: <https://www.mobile-industrial-robots.com/en/insights/get-started-with-amrs/agv-vs-amr-whats-the-difference/>
10. Bennetts, V.H.; Lilienthal, A.J.; Neumann, P.P.; Trincavelli, M. Mobile robots for localizing gas emission sources on landfill sites: Is bio-inspiration the way to go? *Front. Neuroeng.* 2011, 4, 20.
11. Ткачук А.Г., Коваль А.В., Гуменюк А.А., Крижанівська І.В., Левчук В.О. Експериментальні дослідження автоматизованої системи моніторингу наявності шкідливих та вибухонебезпечних газів на базі БпЛА. *Науковий журнал «Технічна інженерія»*. 2021. № 2. С. 55-62.

**Tkachuk A.H., Dobrzhanskyi O.O., Bohdanovskyi M.V., Kravchuk A.R. PROJECTING OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM FOR MONITORING THE PRESENCE OF HARMFUL AND EXPLOSIVE GASES BASED ON A MOBILE CRAWLER ROBOTIC PLATFORM**

*The general classification of existing robots is given, detailed attention is paid to AMR robots. The research is aimed at developing surveillance systems based on mobile platforms (unmanned aerial vehicles, robotic wheeled platforms, surface and underwater drones, etc.). Their advantages and disadvantages are analyzed. Research directions in the field of air pollution monitoring are analyzed. The article considers a new information and measurement system for monitoring the presence of harmful and explosive gases based on a robotic tracked platform. It has been established that this system is necessary to warn of possible threats of explosions or gas poisoning, rescue operations, etc. The developed design of the robotic caterpillar platform is described, the classical scheme of caterpillar wheels is shown and its movements are described. Attention is paid to the position of the drive, because depending on the orientation in the space of the drive, depends on the direction of rotation of its output shaft, and accordingly the direction of movement of tracked tracks. The functional scheme of the information-measuring system for monitoring the presence of harmful and explosive gases on the basis of a robotic caterpillar platform is given. The general scheme of communication between the mobile information-measuring system and the ground station is analyzed, the process of data transmission is described. A special program is used to build the gas map (the code of this program is available in the open github repository). A static experiment of the developed system was carried out, the main idea of which was to study the dependence of the distance of the gas source to the measuring system and to show the gas concentration. Gas sensors MQ-5 and MQ-9 were studied. The main idea of the static experiment is to study the dependence of the distance of the gas source to the measuring system and show the gas concentration.*

**Key words:** gas analyzer, robotic platform, regulation, information and measuring system, accuracy.

**Ушкаренко О.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Малахова Н.Г.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Доманський О.Ю.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## **ВДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ КОЕФІЦІЄНТУ НЕСИМЕТРІЇ В МЕРЕЖІ СУДНОВОЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ**

*У статті представлено результати дослідження, спрямованого на розвиток методів та засобів вимірювання та контролю коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг в мережі суднової електроенергетичної системи. Наявність несиметрії напруги зменшує термін експлуатації електродвигунів через виникнення додаткових магнітних полів, що обертаються зустрічно обертанню ротора, знижується ККД судових синхронних генераторів електроенергії. Також несиметрія напруги призводить до підвищення втрат в нульовому проводі при передачі електроенергії. При цьому можливе порушення безперебійного електропостачання важливих судових систем, порушення роботи комп'ютерів у складі пультів судноводіння, навігаційного, радіокомунікаційного та іншого обладнання. Розвиток і удосконалення способів та систем контролю, аналізу та моніторингу показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг, в мережі суднової електроенергетичної системи, дозволяє прийняти своєчасні заходи з усунення несиметрії напруг та знизити втрати в мережі. При виконанні дослідження використано методи системного аналізу, метод вимірювання коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, об'єктно-орієнтований метод розробки програмного забезпечення, методи цифрової обробки сигналів, метод декомпозиції систем, метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю і керування.*

*Для досягнення поставленої в роботі мети проведено аналіз існуючих методів і засобів контролю показників якості електроенергії, зокрема проблеми вимірювання та контролю коефіцієнту несиметрії та шляхів її вирішення. Обґрунтовано необхідність використання вдосконаленого методу вимірювання параметрів напруг в трифазній мережі з використанням підсистеми цифрової обробки сигналів та розрахунку коефіцієнту несиметрії. Вдосконалений метод контролю коефіцієнту несиметрії реалізовано в розробленому програмно-алгоритмічному забезпеченні для мікропроцесорної системи та програмному забезпеченні з графічним інтерфейсом користувача для комп'ютера.*

**Ключові слова:** коефіцієнт несиметрії, суднова електроенергетична система, цифровий фільтр, графоаналітична модель.

**Постановка проблеми.** Забезпечення високої якості електроенергії є одним з найважливіших завдань при експлуатації суден, адже від неї в значній мірі залежить енергоефективність суднової електроенергетичної системи (СЕЕС) на надійність її роботи. Низька якість електроенергії може мати наслідком неможливість роботи судового навігаційного обладнання, систем радіо- та супутникового зв'язку, багатьох судових машин та механізмів спеціального призначення. Наявність несиметрії напруг в мережі також призводить до скорочення терміну експлуатації обладнання, зокрема асинхронних двигу-

нів, що буде мати наслідком необхідність більш частішої заміни обладнання та значно збільшить витрати на експлуатацію та технічне обслуговування судна. Крім того, несиметрія напруги може призвести до збільшення струму нульового проводу, спрацюванню захисної апаратури і знеструмлення всієї СЕЕС, що є аварійним режимом. Причиною появи несиметрії напруг та струмів в мережі СЕЕС можуть бути наявність однофазного навантаження, несиметричне трифазне обладнання, несправності та погані з'єднання в електричних роз'ємах, та багато інших факторів. Тому актуальним завданням є своєчасне

виявлення факту несиметрії трифазної системи напруг в мережі СЕЕС для прийняття своєчасних заходів з її усунення.

Сучасна електроніка характеризується тісним взаємозв'язком з інформаційними технологіями. Ця обставина дозволяє використовувати програмні засоби та методи інформаційних технологій для вирішення завдань проектування та аналізу електронних систем та окремих підсистем збору та обробки сигналів на якісно новому рівні. Крім того, реалізація в програмних засобах графічного інтерфейсу користувача дозволяє надати оператору інформацію про стан системи в зручному для використання вигляді (в даному випадку у вигляді осцилограм напруг мережі, векторної діаграми та числових значень виміряних та розрахованих параметрів).

Контроль коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг нерозривно пов'язаний з питаннями якості електроенергії, електромагнітної сумісності та енергоефективності в цілому. З огляду на зазначене можна стверджувати, що дослідження, спрямовані на вдосконалення методів та технічних засобів контролю якості електроенергії в судовій мережі, підвищення точності вимірювань та створення відповідного апаратно-програмного інструментарію для вирішення вказаних завдань є достатньо актуальними.

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

В даний час в судових електроенергетичних системах велика увага приділяється контролю якості електроенергії. Якість електроенергії характеризується такими параметрами, як коефіцієнт гармонійних спотворень, наявність реактивної потужності, несиметрія навантаження [1, с. 5; 7, с. 350]. Судові електроенергетичні системи є ізольованими та автономними. Через наявність ненульового імпедансу джерела електроенергії та різного навантаження в трифазній системі може виникнути несиметрія напруги. Якість електроенергії за коефіцієнтом несиметрії вважається такою, що відповідає нормам, якщо сумарна тривалість часу виходу значення коефіцієнту несиметрії за допустимі значення (2 %) становить не більше 1 год. 12 хв. за добу. Крім того, повинні бути відсутніми вимірювання, що виходять за гранично допустимі значення (4 %) [1, с. 13]. Для електродвигунів через виникнення додаткових магнітних полів, що обертаються зустрічно обертанню ротора, знижується термін їх роботи на 10-15 %. Знижується коефіцієнт корисної дії генераторів електроенергії. Також несиметрія напруги призводить до підвищення втрат в нульовому проводі при пере-

дачі електроенергії. При цьому можливе порушення безперебійного електроспоживання, порушення роботи комп'ютерів та іншого обладнання [2, с. 667]. Тому актуальним завданням є удосконалення системи для вимірювання та контролю показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії, мережі судової електроенергетичної системи.

В роботі [3, с. 350] відзначено все більш широке використання електротяги на судах суднах, що призводить до значного віку нелінійних навантажень в системі із-за наявності приводів із змінюваною частотою. Також в [3, с. 358] проведений розрахунок показників якості електроенергії, заснований на результатах моделювання. Разом з тим, не розглянуті варіанти апаратної реалізації системи вимірювання коефіцієнту несиметрії та алгоритми програмної реалізації методів обробки сигналів, доведені до готових технічних рішень. В роботі [4, с. 194] виконано дослідження впливу обриву нейтрального проводу на величину несиметрії напруги та споживачів електроенергії. Відзначена важливість і необхідність наявності засобів контролю коефіцієнту несиметрії. Запропоновані в [4, с. 196] рішення корисні при проектуванні енергосистем. Дослідження, що проводиться в цій роботі, забезпечує контроль і своєчасне виявлення факту несиметрії напруги.

В роботі [5, с. 36] досліджено вплив несиметрії напруги на величину моменту асинхронного двигуна та його режими роботи. Були проведені дослідження для 8 різних типів несиметрії. При цьому використовувався метод симетричних складових. Аналіз результатів дослідження [6, с. 2; 7, с. 43] показав, що для мінімізації апаратних засобів доцільно виконати вимірювання характеристик фазних напруг з наступним розрахунком діючих значень лінійних напруг.

Напруга живлення в мережі СЕЕС повинна мати синусоїдну форму з постійним значенням амплітуди і частоти [8, с. 81]. Однак, як було зазначено вище, через наявність ненульового імпедансу джерела електроенергії, різного навантаження в трифазній системі може виникати несиметрія напруг. Проведений в [9, с. 4] огляд і аналіз якості електроенергії в СЕЕС підтверджує актуальність проблеми контролю якості електроенергії. При цьому також відзначена невирішена проблема впливу коливань частоти напруги на точність вимірювань. Тому важливим завданням також є розробка структури підсистеми цифрової обробки сигналів, яка б мінімізу-



вала вплив коливань вхідної напруги на точність вимірювання. В роботі [10, с. 669] зазначено, що не всі виробники обладнання для вимірювання показників якості електроенергії дотримуються стандартів при розробці своїх пристроїв. Крім того, як зазначено в роботах [11, с. 1421; 12, с. 117], при невідповідності частоти дискретизації сигналу частоті напруги мережі, сигнали оцифровуються некогерентно. Запропоноване в роботі [11, с. 1423] рішення, отримане в аналітичній формі, характеризується високими обчислювальними витратами.

**Постановка завдання.** Проведений аналіз літературних джерел показав, що в даний час методи контролю параметрів електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, мають резерви для вдосконалення шляхом врахування особливостей процесів перетворення даних, що відбуваються в мікропроцесорних вузлах цифрових систем управління. Невирішеним залишається завдання представлення процесів перетворення аргументів, які беруть участь в різних алгоритмах програм, з метою їх оптимізації, зокрема збільшення швидкості виконання арифметичних операцій. Особливо актуальним це є для систем керування реального часу.

Розвиток мікропроцесорної техніки та її широке використання в різноманітних системах керування призводить до необхідності використання аналітичних засобів та сучасних досягнень інформаційних технологій для аналізу та синтезу різноманітних систем керування. Для цього

потрібне представлення процесів перетворення сигналів в системах керування в аналітичному вигляді, і вдосконалення формалізованих методів їх обробки з урахуванням контексту використання та виникаючих при цьому проблем.

**Метою дослідження** є розвиток і вдосконалення методу контролю, аналізу та моніторингу показників якості електроенергії, зокрема коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг, в мережі суднової електроенергетичної системи, що дозволить прийняти своєчасні заходи з усунення несиметрії напруг та знизити втрати в мережі СЕЕС.

При проведенні наукового дослідження використано методи системного аналізу, метод вимірювання коефіцієнту несиметрії трифазної системи напруг, об'єктно-орієнтований метод розробки програмного забезпечення, методи цифрової обробки сигналів, методи теорії цифрових автоматів, метод декомпозиції систем, метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю і керування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** На рис. 1. представлені експериментально отримані осцилограми лінійних напруг суднової мережі (суховантаж Chelsea-6 класу "Волго-Дон макс", дедвейт 6000 т.) при роботі керованого трифазного напівпровідникового випрямляча (схема Ларіонова) у складі електроприводу судових механізмів. Живлення випрямляча відбувалося від одного синхронного генератора потужністю 130 кВт. Потужність наванта-

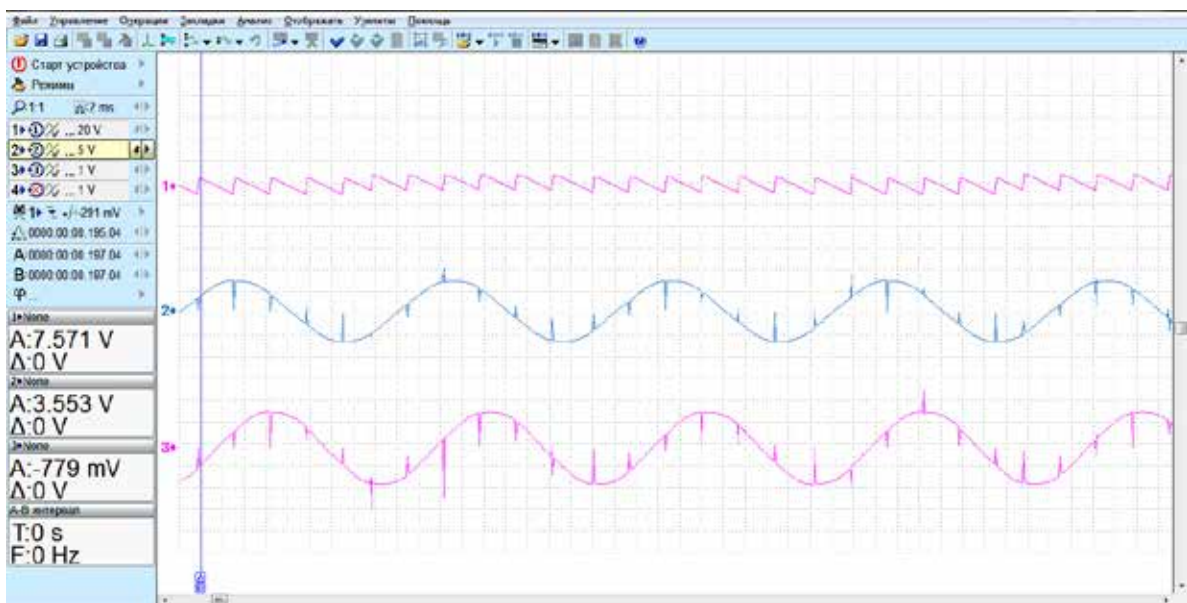


Рис. 1. Осцилограми лінійний напруг  $U_{AB}$  та  $U_{AC}$  в мережі суднової електростанції при роботі напівпровідникового трифазного випрямляча, підключеного до мережі



ження складала 30 кВт. Характер навантаження активно-індуктивний.

Як видно з осцилограм, в мережі суднової електростанції присутні височастотні завади, які впливають на точність вимірювань діючих значень напруг, і, відповідно, точність розрахунку коефіцієнту несиметрії. Для обчислення середнього і середньоквадратичного значень періодичного сигналу при забезпеченні оптимальної швидкодії дискретної системи виконано синтез підсистеми цифрової обробки сигналів.

Арифметичне середнє значення змінного сигналу з періодом  $T$  розраховується за формулою [12, с. 107; 13, с. 318]:

$$u_{avg} = \frac{1}{T} \int_0^T |u(t)| dt. \quad (1)$$

Вираз для розрахунку середнього значення в дискретній формі має вигляд [12, с. 108]:

$$Y(kT_s) = \sum_{n=0}^{N-1} h \cdot X[(k-n)T_s],$$

де

$$Y = u_{avg}, \quad X = |u|, \quad \frac{1}{N} = h, \quad N = \frac{T}{2 \cdot T_s}.$$

Це рівняння описує лінійний фільтр з імпульсною характеристикою кінцевої тривалості порядку  $N$ . Для синтезу структури цифрового фільтру було використано метод опису структур цифрових фільтрів шляхом багаторівневої декомпозиції [15, с. 143], перевагою якого є підвищений інформаційний зміст отриманих графоаналітичних моделей структур цифрових фільтрів, що дозволить в майбутньому спростити їх програмну реалізацію. Формулу (1) можна записати у вигляді графоаналітичного виразу, наведеного на рис. 2.

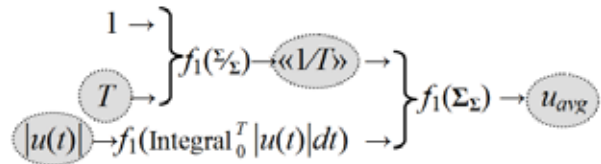


Рис. 2. Графоаналітичний вираз, що описує процес інтегрування сигналу та визначення середнього значення періодичного сигналу

Вираз для розрахунку середнього значення в дискретній формі [12, с. 108]:

$$u_{avg}(t) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} |u(t - nT_s)|. \quad (2)$$

Формулу (2) можна записати у вигляді графоаналітичного виразу, наведеному на рис. 3.

Для отримання кінцевого результуючого аргументу  $Y(kT_s)$  необхідно виконати перетворення вхідних аргументів відповідно до графоаналітичного виразу, наведеного на рис. 4.

Представлений на рис. 5 графоаналітичний вираз описує лінійний фільтр з імпульсною характеристикою кінцевої тривалості.

Для обчислення чергового значення на виході оптимізованого цифрового фільтру необхідно виконати 3 операції додавання і одну операцію множення, замість  $N$  операцій додавання і  $N$  операцій множення. Ввівши додаткові функціональні блоки  $A^2$  і  $\sqrt{A}$ , розглянуту структуру цифрового фільтру для розрахунку діючого значення напруги з рівними ваговими коефіцієнтами можна використовувати для обчислення діючого (середньоквадратичного) значення вхідного сигналу. Встановлено, що ефективність даного оптимізованого цифрового фільтру є нелінійною і залежить від

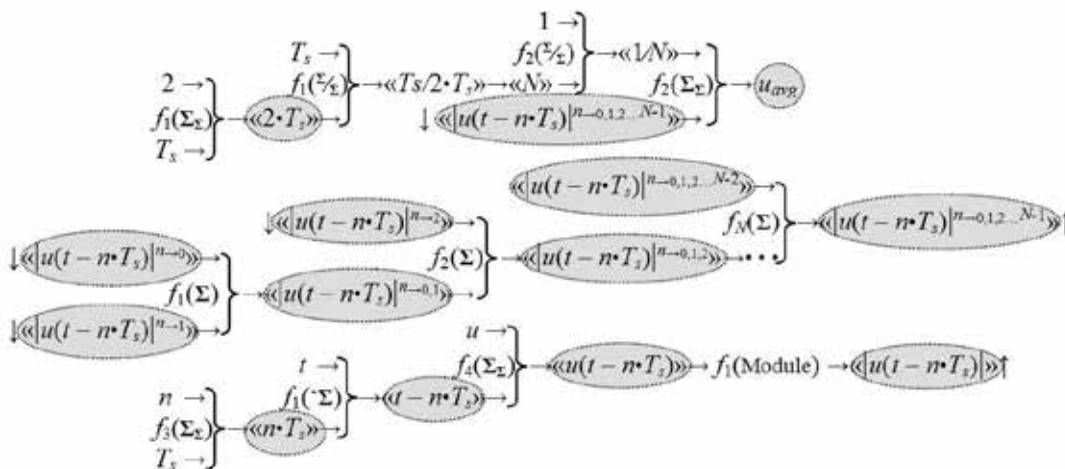


Рис. 3. Графоаналітична модель процесу обчислення середнього значення сигналу, представленого в дискретній формі

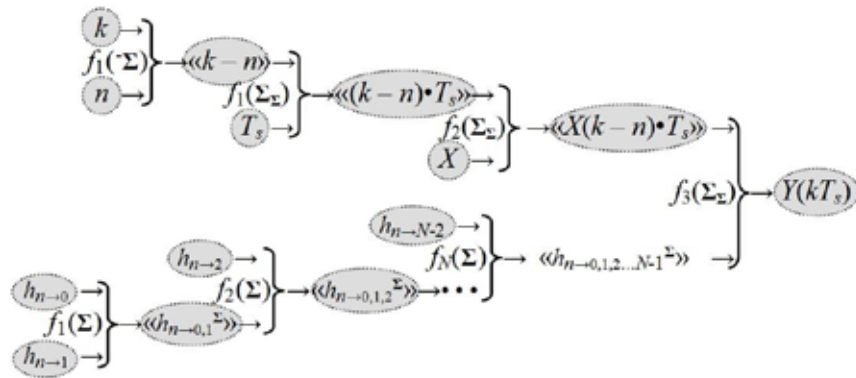


Рис. 4. Графоаналітичний вираз, що описує процедуру перетворення вхідних аргументів

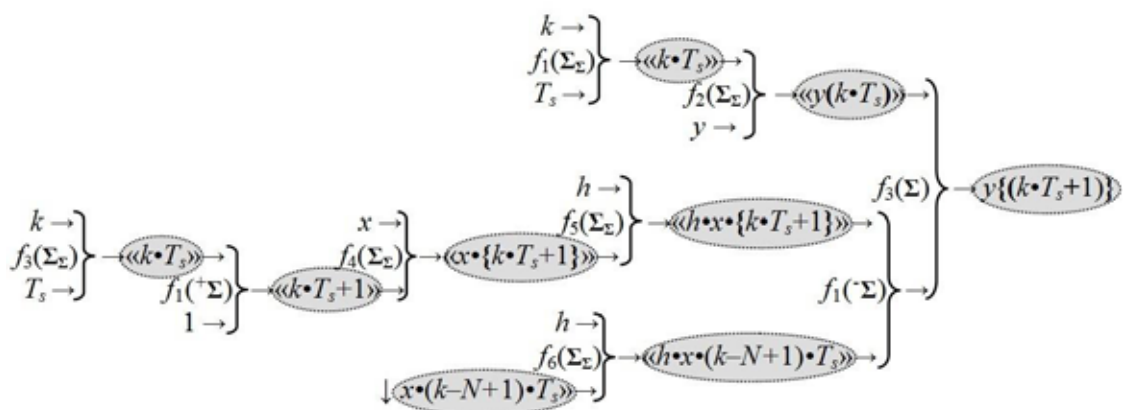


Рис. 5. Графоаналітична модель лінійного цифрового фільтра з кінцевою імпульсною характеристикою

порядку фільтра. Для малих значень порядку цифрових фільтрів їх продуктивність майже однакова, проте зі збільшенням порядку фільтрів ефективність фільтра з оптимізованою структурою різко зростає. Це важливо, оскільки розглянутий алгоритм призначений для реалізації в 8-бітних мікроконтролерах. Збільшення частоти дискретизації в оптимізованій структурі фільтра не призводить до зростання кількості арифметичних операцій додавання і множення, що є перевагою запропонованої структури фільтра в порівнянні з аналогічними.

Одним із завдань системи моніторингу якості електроенергії є розрахунок та передача автоматизованій системі управління по запиті оператора коефіцієнтів несиметрії за нульовою послідовністю [1, с. 19]:

$$K_{0U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{0U(i)}^2}{N}} \quad (3)$$

і зворотною послідовністю [1, с. 18]:

$$K_{2U} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N K_{2U(i)}^2}{N}}, \quad (4)$$

де  $K_{0U(i)}$  і  $K_{2U(i)}$  – відповідні коефіцієнти, отримані на основі даних  $i$ -го спостереження;  $N$  – кількість спостережень на інтервалі усереднення (відповідно до [1, с. 16] інтервал усереднення дорівнює 3 сек. і  $N$  має бути не менше 9). Математичний вираз (3) можна записати в аналітичному вигляді, як наведено на рис. 6.

На рисунку  $f_1(\Sigma), f_2(\Sigma), \dots, f_i(\Sigma)$  – функціональні структури суматорів;  $f_1(\sqrt{\Sigma})$  – функціональна структура подільовача;  $f_i(\sqrt{\Sigma})$  – функціональна структура для обчислення квадратного кореня. Особливістю аналітичного виразу, наведеного на рис. 6 є однозначна послідовність виконуваних дій. Аналогічним чином можна представити математичний вираз (4).

Для розрахунку коефіцієнта несиметрії напруг ефективним з точки зору подальшої практичної реалізації на базі мікроконтролера або програмо-

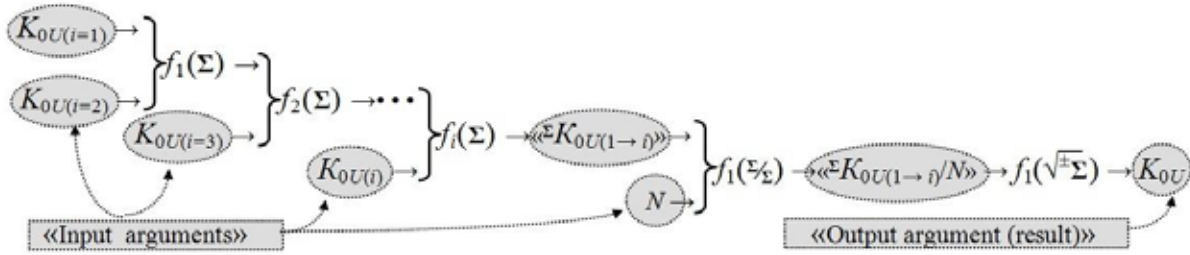


Рис. 6. Аналітичний вираз для розрахунку  $K_{0U}$

ваної логічної інтегральної схеми є використання наступних виразів, наведених в [6, с. 3]:

$$K_U = \sqrt{A^2 + B^2}, \quad (5)$$

$$A = \frac{2U_{AB} - U_{BC} - U_{CA}}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}, \quad (6)$$

$$B = \frac{\sqrt{3}(U_{BC} - U_{CA})}{U_{AB} + U_{BC} + U_{CA}}, \quad (7)$$

де  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  і  $U_{ca}$  – вимірні діючі значення лінійної напруги мережі. Математичний вираз (7) може бути записаний у вигляді аналітичного виразу (рис. 7).

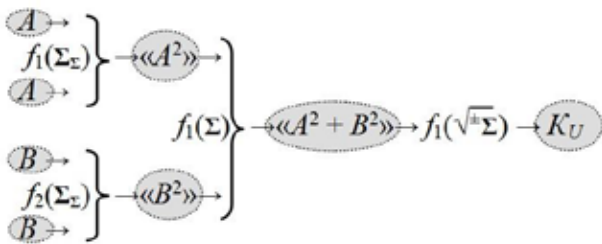


Рис. 7. Аналітичний вираз для розрахунку  $K_U$

На рис. 7 показано, що з використанням функціональних структур помножувачів  $f_1(\Sigma_2)$  і  $f_2(\Sigma_2)$  отримуються проміжні аргументи « $A^2$ » і « $B^2$ » для обчислення за допомогою функціональної структури суматора  $f_1(\Sigma)$  проміжного аргументу « $A^2 + B^2$ », який є входним аргументом функціональної структури обчислення квадратного кореня  $f_1(\sqrt{\Sigma})$  для отримання вихідного (результуючого) аргументу  $K_U$ .

Математичний вираз (6) може бути записано у вигляді, наведеному на рис. 8

За допомогою функціональної структури помножувача  $f_1(\Sigma_2)$  отримується проміжний аргумент « $2 \cdot U_{ab}$ », який спільно з входними аргументами послідовно подається на другі входи функціональних структур віднімання  $f_1(\Sigma)$  і  $f_2(\Sigma)$  для отримання перетвореного аргументу « $2 \cdot U_{ab} - U_{bc} -$

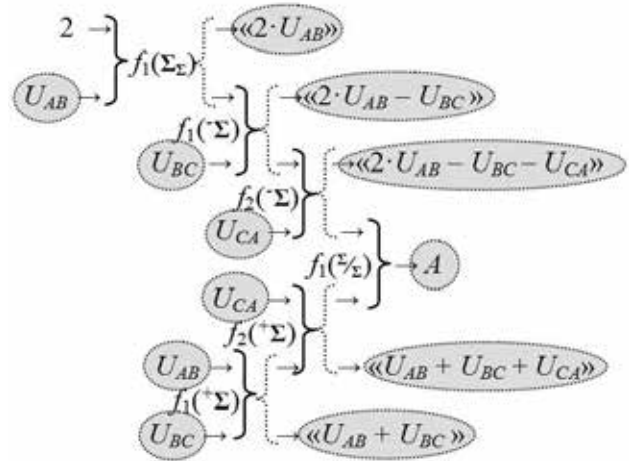


Рис. 8. Аналітичний вираз для розрахунку проміжного аргументу  $A$

$U_{ca}$ » і подачі його на перший вхід функціональної структури подільовача  $f_1(\Sigma/2)$  з метою отримання результуючого аргументу  $A$ . Одночасно з цією процедурою, на другий вхід функціональної структури подільовача  $f_1(\Sigma/2)$  поступає проміжний результат (аргумент) « $U_{ab} + U_{bc} + U_{ca}$ », який отримано за допомогою функціональних структур суматорів  $f_1(+\Sigma)$  і  $f_2(+\Sigma)$  з входніми аргументами  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  і  $U_{ca}$ .

Математичний вираз (7) може бути записаний у вигляді, наведеному на рис. 9.

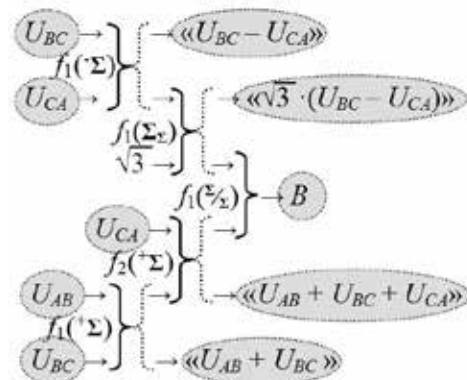


Рис. 9. Аналітичний вираз для розрахунку проміжного аргументу  $B$

$$\begin{aligned}
 & \left\langle \frac{\langle U_{A(i)}^2 - 2 \cdot U_{A(i)} \cdot U_{B(i)} \cdot \cos \varphi_{AB(i)} \rangle}{\Sigma} \right\rangle \rightarrow f_1(\sqrt{\Sigma}) \rightarrow U_{AB(i)} \\
 & \left\langle \frac{\langle U_{B(i)}^2 - 2 \cdot U_{B(i)} \cdot U_{C(i)} \cdot \cos(\varphi_{AB(i)} - \varphi_{AC(i)}) \rangle}{\Sigma} \right\rangle \rightarrow f_1(\sqrt{\Sigma}) \rightarrow U_{BC(i)}
 \end{aligned}$$

(а)

(б)

**Рис. 10. Аналітичні вирази для розрахунку лінійних напруг:**  
**а – напруги  $U_{BC(i)}$ ; б – напруги  $U_{AB(i)}$**

На рис. 9 показано, що за допомогою функціональної структури для віднімання  $f_1(\Sigma)$ , формується перетворений аргумент « $U_{bc}-U_{ca}$ » для подальшого обчислення за допомогою функціональної структури помножувача  $f_1(\Sigma_{\Sigma})$  аргументу « $\sqrt{3} \cdot (U_{bc}-U_{ca})$ ». Це значення використовується для отримання, разом з використанням першого вхідного зв'язку функціональної структури подільвача  $f_1(\frac{\Sigma}{\Sigma})$ , результуючого аргументу  $B$ . При цьому, на другий вхідний зв'язок функціональної структури дільника  $f_1(\frac{\Sigma}{\Sigma})$  поступає проміжний аргумент « $U_{ab}+U_{bc}+U_{ca}$ », який отримано за допомогою функціональних структур суматорів  $f_1(+\Sigma)$  і  $f_2(+\Sigma)$  з вхідними аргументами  $U_{ab}$ ,  $U_{bc}$  і  $U_{ca}$ .

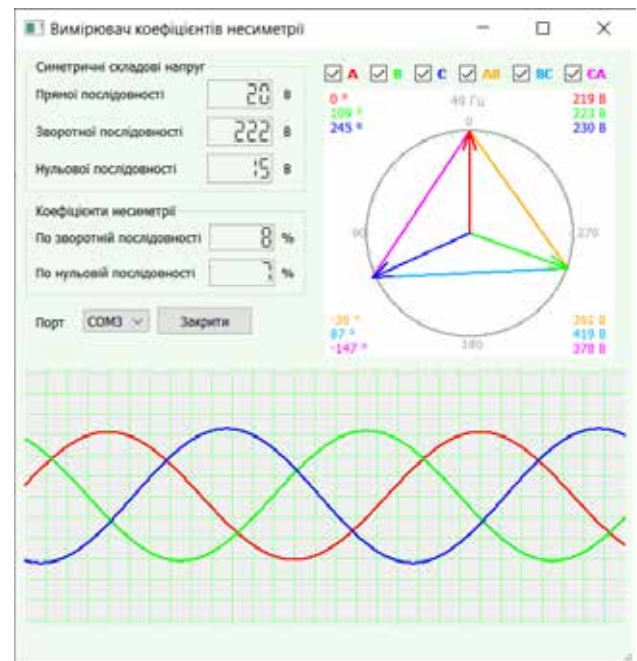
Таким чином, однією з вимог до апаратних засобів системи моніторингу якості електроенергії є можливість вимірювання лінійної напруги мережі. Однак, для забезпечення наочності відображення несиметрії напруг необхідно мати значення як мінімум одного з кутів між векторами фазної напруги. Оскільки між векторами фазних і лінійних напруг присутній однозначний взаємозв'язок, у роботі для мінімізації апаратних засобів запропоновано вимірювання характеристик векторів фазних напруг з подальшим розрахунком значень діючих лінійних напруг.

Результуючий аргумент  $U_{ab(i)}$  може бути записаний у вигляді аналітичного виразу, наведеному на рис. 10, а. Результуючий аргумент  $U_{bc(i)}$  може бути записаний у вигляді аналітичного виразу, наведеному на рис. 10, б.

В процесі виконання дослідження були розроблені програми для мікроконтролера і комп'ютера. Програми виконують вимірювання, розрахунок і відображення параметрів про діючі значення

вимірюваних напруг, кутів зсуву фаз між ними, розраховані значення коефіцієнтів несиметрії по прямій, зворотній та нульовій послідовностям.

На рис. 11 наведений зовнішній вигляд графічного інтерфейсу програми при заданих у моделі фазних напруг  $U_A = 220\text{В}$ ,  $U_B = 223\text{В}$ ,  $U_C = 230\text{В}$ , кутах зсуву фаз  $0^\circ$ ,  $110^\circ$ ,  $245^\circ$  відповідно, частоті напруги мережі 50 Гц.



**Рис. 11. Візуалізація несиметрії напруг та результатів розрахунків в розробленій програмі**

Як було зазначено вище, контроль коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг нерозривно пов'язаний з питаннями якості електроенергії, електромагнітної сумісності та енергоефектив-



ності. Своєчасне виявлення факту несиметрії дозволить прийняти необхідні заходи по зменшенню несиметрії системи трифазних напруг з використанням спеціальних пристроїв, що в поєднанні з іншими методами та технічними засобами, розглянутими в [16, с. 77; 17, с. 14; 18, с. 28; 19, с. 96], позитивно вплине на енергоефективність СЕЕС системи в цілому.

**Висновки.** Отримані графоаналітичні вирази для розрахунку коефіцієнту несиметрії, в яких використовуються діючі значення фазних напруг, дозволили мінімізувати апаратні засоби, необхідні для отримання сигналів. Також це забезпечило більш високу швидкодію розробленої системи, оскільки вона забезпечена трьома нуль-органами, сигнали з яких надходять до мікроконтролера для обробки та визначення фазових зсувів. На практиці реалізовано покращену перешкодозахищеність системи за рахунок незалежності вимірюваних кутів зсуву фаз між лінійними напругами від форми напруги мережі.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що отримав подальший розвиток метод вимірювання коефіцієнту несиметрії системи трифазних напруг шляхом додаткового використання оптимізованої структури підсистеми цифрової обробки сигналів, що було досягнуто завдяки формуванню графоаналітичної форми записи процедури перетворення інформаційних аргументів на функціональних структурах. Це дозволило

покращити перешкодозахищеність системи за рахунок незалежності вимірюваних кутів зсуву фаз між лінійними напругами від форми напруги мережі, та реалізувати цей метод програмно в електронному пристрої на сучасній елементній базі (мікроконтролері).

Практичне значення отриманих результатів полягає в можливості використання розглянутого методу формування математичних моделей графоаналітичних виразів для синтезу оптимізованих структур цифрових фільтрів. З використанням цього методу виконана оптимізація структури системи цифрової обробки сигналів для визначення середнього і середньоквадратичного значень напруги. Розроблено програмно-алгоритмічний комплекс системи вимірювання коефіцієнту несиметрії. Програмне забезпечення реалізовано у вигляді цифрового автомату, який виконує керування процесом вимірювання необхідних параметрів (діючих значень лінійних напруг та кутів зсуву фаз між ними) та розрахунку коефіцієнтів несиметрії. При цьому наявність графічного інтерфейсу користувача дозволяє представити результати у зручному для оператора вигляді (векторної діаграми, осцилограми та числових значень). Використання розробленої системи для визначення коефіцієнту несиметрії дозволяє вжити своєчасні заходи щодо усунення несиметрії напруги та знизити втрати в мережі суднової електроенергетичної системи на 10-15 %.

#### Список літератури:

1. ГОСТ 13109-97. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения : ГОСТ 13109-97. – [Дата введения с 01.01.1999 г.]. Минск : ИПК Издательство стандартов, 1998. 35 с. (Межгосударственный стандарт).
2. Barros J. A review of measurement and analysis of electric power quality on shipboard power system networks / J. Barros, R. I. Diego // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 62. P. 665-672.
3. Rodrigues T.A. Impact of electric propulsion on the electric power quality of vessels / T.A. Rodrigues, G.S. Neves, L.C.S. Gouveia, M.A. Abi-Ramia, M.Z. Fortes, S. Gomes // *Electric Power Systems Research*. 2018. Vol. 155. P. 350-362.
4. Lepadat I. Effect of the neutral interruption on the unbalanced three-phase consumers / I. Lepadat, E. Helerea, S. Abagiu // In Proc. of the Optimization of Electrical and Electronic Equipment (OPTIM) 2014 International Conference. Brasov, Romania, 2014. P. 192-197.
5. Youb L. Effects of Unbalanced Voltage on the Steady State of the Induction Motors. *International Journal of Electrical Energy*. 2014. Vol. 2, Issue 1. P. 34-38.
6. Способ измерения коэффициента несимметрии и устройство для его осуществления: пат. 1308947 СССР. № 4009588; заяв. 21.01.1986; опубл. 07.05.1987, Бюл. № 17. 4 с.
7. Mahmoud M. S. Al-Suod. Development of hardware and software for calculation and monitoring of the unbalance factor in threephase voltage system / Al-Suod Mahmoud M. S. // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 1 (91). P. 39-45.
8. Simić M. Design and evaluation of computer-based electrical power quality signal generator / M. Simić, Z. Kokolanski, D. Denić, V. Dimcevic, D. Živanović, D. Taskovski // *Measurement*. 2017. Vol. 107. P. 77-88.
9. Georgios Vokas. Analysis of power quality field measurements and considerations on the power quality standard / Vokas Georgios, Langouranis Panagiotis, Kontaxis Panagiotis, Topalis Frangiskos // *Journal of Applied Research Review*. 2015. P. 1-13.

10. Zhu Y. A Method of Detecting Measurement Uncertainty of Voltage Unbalance / Y. Zhu, X. Liang Huang, F. Xin // *Advanced Materials Research*. 2013. Vol. 805. P. 667-672.
11. Tarasiuk T. Impact of sampling frequency on accuracy of unbalance factor measurement by DFT / T. Tarasiuk, A. Pilat // in *Proc. of the IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, Pisa, Italy, 2015. P. 1420-1424.
12. Рябенський В.М. Программная реализация алгоритмов цифровой обработки сигналов : монография / В.М. Рябенський, А.О. Ушкаренко // Николаев : НУК, 2016. 244 с.
13. Ian Grout, *Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs*. Oxford : Newnes. 2008. 784 p.
14. Ушкаренко О.О. Вдосконалення методу побудови графоаналітичних моделей компонентів електронних кіл / О.О. Ушкаренко, Н.Д. Малахова // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020» (Одеса, 22-23 жовтня 2020 р.), Одеська нац. акад. харч. технологій. Одеса: ОНАХТ, 2020. С. 43-45.
15. Ushkarenko O. Development of Graphical Analytical Models for Digital Signal Processing System Structures / O. Ushkarenko, Mahmoud M.S. Al-suod [et al.] // *Jordan Journal of Electrical Engineering*, Volume 6, Number 2, 2020. – P. 140-153.
16. Ямненко Ю.С. Вплив якості електроенергії на економічні характеристики ізолюваних MicroGrid / Ю.С. Ямненко, Т.О. Терещенко, І.С. Федін, Л.Є. Клепач // *Технічна електродинаміка*. 2020. № 4. С. 76-79.
17. Павлов Г. В. Резонансные преобразователи в энергоэффективных электротехнических системах / Г.В. Павлов, А.В. Обрубов // *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2014. № 9. Спец. вып. Т.1 : Силовая электроника и энергоэффективность. С. 13-23.
18. Жук О.К. Несинусоїдальність напруги в автономній електроенергетичній системі з керованим фільтрокомпенсуючим пристроєм / О.К. Жук, Д.О. Жук, Д.В. Криворучко // *Технічна електродинаміка*. 2018. № 5. С. 26-30.
19. Шидловський А.К. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями / А.К. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін. Київ : Ін-т електродинаміки. 2013. 378 с.

#### **Ushkarenko O.O., Malakhova N.G., Domanskiy O.Yu. IMPROVEMENT OF THE METHOD OF THE UNBALANCE FACTOR CONTROL IN THE SHIP POWER SYSTEM NETWORK**

*The paper presents the results of a research aimed at developing methods and tools for measuring and controlling the unbalance factor of a three-phase voltage system in the ship's power system. The presence of voltage unbalance reduces the service life of electric motors due to the occurrence of additional magnetic fields that rotate counter-rotating rotor, reduces the efficiency of ship synchronous power generators. Also, voltage unbalance leads to increased losses in the neutral wire during power transmission. At the same time, it is possible to disrupt the uninterrupted power supply of important ship systems, disrupt the operation of computers in the consoles, navigation, radio and other equipment. Development and improvement of methods and systems of control, analysis and monitoring of electricity quality indicators, in particular the unbalance factor of the three-phase voltage system in the ship power system, allows to take timely measures to eliminate voltage asymmetry and reduce network losses. Methods of system analysis, method of measuring the unbalance factor of three-phase voltage system, object-oriented method of software development, methods of digital signal processing, method of the system decomposition, method of synthesis of mathematical models of logical-dynamic control processes were used.*

*To achieve this goal, the analysis of existing methods and means of control of power quality indicators, in particular the problem of measuring and controlling the unbalance factor and ways to solve it, was carried out. The necessity of using an improved method of measuring voltage parameters in a three-phase network using the subsystem of digital signal processing and calculating the asymmetry coefficient is substantiated. An improved method of controlling the unbalance factor is implemented in the developed software and algorithms for the microprocessor system and software with a graphical user interface for the computer.*

**Key words:** unbalance factor, ship power system, digital filter, graphoanalytical model.

УДК 631.365.22+621.317

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/19>

**Федотова М.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Скриннік І.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Дідик О.К.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Березюк І.А.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Зубенко В.О.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Сербул О.М.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

**Трушаков Д.В.**

Центральноукраїнський національний технічний університет

## ТЕХНОЛОГІЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ СИГНАЛІВ ЗЕРНОСУШАРКИ З КИПЛЯЧИМ ШАРОМ ЯК ОБ'ЄКТА АВТОМАТИЗАЦІЇ ТА ЇЇ ПРАКТИЧНА РЕАЛІЗАЦІЯ

Сушіння із застосуванням киплячого шару має величезні переваги в порівнянні з іншими способами. Завдяки тому, що дисперсний матеріал набуває стану «киплячості» – він омивається з усіх сторін, тому сушіння відбувається швидше та з меншими енергетичними витратами. Зерносушарка з киплячим шаром каскадного типу, як показали дослідження, являє собою багатовимірний об'єкт з розподіленими параметрами із запізненням. Автоматизувати таку зерносушарку досить складно не лише через швидкоплинність фізичних процесів, що відбуваються в ній, а й через те, що дана сушарка є новою конструкцією, не досить вивченою. Тож дана робота присвячена розробці алгоритму ідентифікації такого виду об'єкту у розрізі математичного опису сигналів «вхід-вихід» з урахуванням динаміки процесів та особливостей конструкції. Також в даній роботі показана практична реалізація розробленої технології на прикладі сушарки для сушіння дисперсного матеріалу в киплячому шарі. В результаті застосування технології був отриманий набір спектральних і взаємноспектральних щільностей сигналів «вхід-вихід», що описують зв'язки параметрів між собою в реальних експлуатаційних умовах. Отримані дані були зведені до таблиць і проаналізовані, а графіки спектральних щільностей – апроксимовані методом логарифмічних характеристик. Спектральні щільності стануть вихідними даними для наступного етапу ідентифікації – визначення матриці передаточних функцій багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.

**Ключові слова:** киплячий шар, об'єкт автоматизації, каскади, математичне очікування, дисперсія, автокореляційна та взаємно кореляційна функція, спектральна щільність, апроксимація.

**Постановка проблеми.** Застосування сучасних підходів стосовно автоматизації на підприємствах зернопереробної промисловості дозволяє значно підвищити вихід готової продукції та скоротити витрати. Процес сушіння зерна в Україні у більшості випадків здійснюється за допомогою морально та технічно застарілого спеціалізованого

устаткування. Одним з перспективним та енергозберігаючим способом сушіння в АПК є сушіння із застосуванням киплячим шаром. Фізика процесу сушіння полягає у наступному. Дисперсний матеріал, потрапляючи на перфоровані решітки-каскади, знизу продувається теплоносієм (агентом сушіння) з певною швидкістю так, щоб при цьому

зерно набувало стану «кипіння». Завдяки цьому зерно починає рухатись з каскаду на каскад, віддаючи одночасно надлишок вологи теплоносію. Переваги сушіння в такій зерносушарці очевидні: експозиція сушіння в рази менша в порівнянні з іншими способами, нагрівання матеріалу рівномірне по всій площині зернини за рахунок максимально можливого контакту агента сушки з матеріалом, і як результат – зберігаються всі поживні якості при умові дотримання режимів сушіння. Впровадження автоматизації дозволяє забезпечити точність виконання технологічного процесу. З метою синтезу системи автоматизованого керування сушінням в зерносушарці з киплячим шаром нами були проведені ряд дослідів. Ідентифікація експериментально знятих даних сигналів «вхід-вихід» є необхідною для визначення математичної моделі зерносушарки з киплячим шаром, конструкція якої має свої особливості.

Таким чином, наступним етапом після проведення експерименту, є обробка отриманих даних із застосуванням елементів ідентифікації для побудови математичної моделі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Автоматизація контролю і управління процесами обробки, зберігання та подальшої переробки зернової продукції відкриває широкі можливості для якісного тривалого зберігання продукції, що на сьогодні має величезне значення в умовах воєнного стану. Завдяки застосуванню засобів вимірювання та контролю основних чинників досягається майже 100% збереження стратегічного насінневого та продовольчого запасу.

Сушіння у киплячому шарі ще в середині ХХ ст. визнали одним з найпрогресивніших способів сушіння, що застосовується в різних галузях промисловості у т.ч. і для сушіння зернових. Так, при Центральноукраїнському національному технічному університеті (м. Кропивницький) було розроблено принципово нову конструкцію сушарки для сушіння дисперсного матеріалу [1]. Та глибина процесів, що відбуваються в такій сушарці, ще не досить вивчена, тому перед для впровадження автоматизації перш за все необхідно дослідити динаміку сигналів «вхід-вихід» у вигляді математичного опису. Автоматизація нового об'єкту – зерносушальної установки касетного типу з киплячим шаром – перш за все потребує дослідів, в ході яких потрібно виявити зв'язки між вхідними і вихідними величинами, побудову диференціальних рівнянь і визначення математичної моделі об'єкту, тобто його ідентифікацію. З цією метою на кафедрі «Автоматизації вироб-

ничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету було проведено ряд паралельних дослідів [стаття], які стали основою для застосування розробленої методики ідентифікації складного багатовимірного об'єкту з розподіленими параметрами із запізненням.

Значний вклад у розвиток автоматизації сушіння в киплячому шарі зробили такі визначні науковці як Баскаков А.С., Рашковська Н.Б., Романков П.Г., Забродський С.С., Мартиненко І.І., Федоров В.Г. та ін. Їх нароби в якійсь мірі мають як переваги, так і недоліки [2, 3, 5].

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є розробка технології ідентифікації сигналів зерносушарки як об'єкта автоматизації, що являє собою багатовимірну динамічну складну систему із багатьма взаємопов'язаними параметрами та запізненням в основних каналах управління.

Тобто за відомими записами компонентів векторів сигналів керування  $u_k$  та вихідних сигналів  $k$ -того каскаду  $x_k$ , як багатовимірних стаціонарних випадкових процесів [4], необхідно знайти множини матриць їх спектральних  $S_{uu}$ ,  $S_{xkxk}$  та взаємних  $S_{uxk}$ ,  $S_{xku}$  спектральних щільностей.

**Виклад основного матеріалу.** Зерносушарку з киплячим шаром з урахуванням її конструктивних особливостей можна представити узагальненою структурою так, як показано це на рис 1.

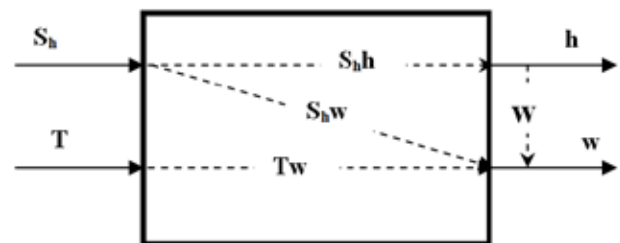


Рис. 1. Схема зв'язків вхідних і вихідних сигналів сушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації

Тоді основними параметрами зерносушарки як об'єкта автоматизації будуть:  $sh$  – зміна положення шиберу, що регулює подачу зерна безпосередньо в камеру сушіння,  $h$  – висота шару матеріалу на каскадах,  $w$  – кінцева вологість зернового матеріалу,  $T$  – температура теплоносія (агента).

В результаті визначення ступеню зв'язку між сигналами виявилось, що значна кореляція спостерігається між параметрами:  $S_b - h$ ,  $sh - w$ ,  $T - w$ ,  $h - w$ . Суть таких зв'язків очевидна і виходить з фізики процесу, адже зміна положення шиберу  $S_b$ , що регулює подачу зерна безпосередньо в камеру сушіння, впливає, перш за все, на висоту шару  $h$  матеріалу на каскадах, а, значить, і на кін-



цеву вологість зерна  $w$ . Щодо температури агента  $T$ , то вплив її спостерігається лише на зміну кінцевої вологості  $i$ , аж ніяк, не на зміну висоти матеріалу на каскадах.

$$u_k = \begin{bmatrix} S_h \\ T_7 \end{bmatrix} \quad (1);$$

$$x_k = \begin{bmatrix} h_k \\ w \end{bmatrix} \quad (2)$$

Враховуючи вирази (1) та (2) можна стверджувати, що розмір множини матриць  $S_{uu}$  дорівнює 1, а розміри множин матриць  $S_{x_k x_k}$ ,  $S_{ux_k}$  та  $S_{x_k u}$  дорівнюють кількості каскадів, а саме 7.

У відповідності з теоремою Вінера-Хінчина транспоновані матриці спектральних та взаємних спектральних щільностей зв'язані зі спектральними та взаємними спектральними щільностями компонентів векторів (1), (2) наступними рівняннями

$$S_{uu}' = \begin{bmatrix} S_{S_h S_h} & S_{TS_h} \\ S_{S_h T} & S_{TT} \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$S_{x_k x_k}' = \begin{bmatrix} S_{h_k h_k} & S_{wh_k} \\ S_{h_k w} & S_{ww} \end{bmatrix}; \quad (4)$$

$$S_{ux_k}' = \begin{bmatrix} S_{S_h h_k} & S_{Th_k} \\ S_{S_h w} & S_{Tw} \end{bmatrix}; \quad (5)$$

$$S_{x_k u}' = S_{ux_k}'^* ; \quad (6)$$

*Позначення у формулах:* верхній індекс ' – позначає транспонування матриці [6];

$S_{S_h S_h}$  – спектральна щільність відхилень (СЦВ) положення шиберу від математичного сподівання;

$S_{TT}$  – СЦВ відхилень температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання;

$S_{TS_h}$  – взаємна спектральна щільність (ВСЩ) між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання;

$S_{S_h T}$  – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від її математичного сподівання;

$S_{h_k h_k}$  – СЦВ висоти киплячого шару біля  $k$ -того каскаду від її математичного сподівання;

$S_{ww}$  – СЦВ вологості насіння від її математичного сподівання;

$S_{h_k w}$  – ВСЩ між відхиленнями висоти киплячого шару над  $k$ -тим каскадом від її математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

сподівання;

$S_{wh_k}$  – ВСЩ між відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над  $k$ -тим каскадом від її математичного сподівання;

$S_{S_h h_k}$  – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над  $k$ -тим каскадом від її математичного сподівання;

$S_{Th_k}$  – ВСЩ між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями висоти киплячого шару над  $k$ -тим каскадом від її математичного сподівання;

$S_{S_h w}$  – ВСЩ між відхиленнями положення шиберу від його математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

$S_{Tw}$  – ВСЩ між відхиленнями температури теплоносія біля сьомого каскаду від математичного сподівання та відхиленнями вологості насіння на виході з ЗКШ від її математичного сподівання;

нижній індекс \* – позначає операцію Ермітового спряження.

Таким чином завдання ідентифікація сигналів «вхід-вихід» зерносушарки зведено до того, щоб за відомими записами зміни сигналів  $S_h$ ,  $T$ ,  $h_k$ , та  $w$  обмеженої довжини, як стаціонарних ергодичних випадкових процесів, знайти оцінки їх спектральних та взаємних спектральних щільностей.

Для розв'язання цієї задачі використано алгоритм Блекмена-Т'юкі, оскільки цей метод в умовах обмеженої довжини реалізації сигналу забезпечує можливість отримати слушну і незміщену оцінку їх спектральних щільностей.

Суть цього алгоритму полягає в наступному.

Якщо випадкова функція  $x(t)$  приймає значення  $x_i$  в кожен момент часу  $i\Delta t$  ( $\Delta t$  – час дискретизації,  $i=0, \dots, n$ ;  $n$  – кількість точок заміру), то оцінка її спектральної щільності  $S_{xx}$  може бути знайдена за формулою:

$$S_{xx}(f_k) = \Delta t \left[ \bar{R}_{xx}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} \bar{R}_{xx}(r\Delta t) \cos\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + \bar{R}_{xx}(m\Delta t) \cos(\pi k) \right], \quad (7)$$

де  $f_k$  – частота, що визначається рівнянням

$$f_k = \frac{k}{2m\Delta t}; \quad \bar{R}_{xx} - \text{згладжена оцінка автокореляційної функції (АКФ) } R_{xx}; \quad R_{xx} - \text{незгладжена оцінка}$$

АКФ;  $k$  – номер частоти;  $r$  – зсув,  $r=0, \dots, m$ ;  $m$  – кількість точок по частоті  $f_k$ .

Якщо скористатись для визначення згладженої оцінки спектральної щільності  $\bar{R}_{xx}$  вікном Хеннінга  $v_m(r\Delta t)$ , то

$$v_m(r\Delta t) = \frac{1}{2} \left(1 + \cos \frac{\pi r \Delta t}{m}\right), \quad (8)$$

$$\bar{R}_{xx}(r\Delta t) = v_m(r\Delta t) R_{xx}(r\Delta t) \quad (9)$$

Незгладжену оцінку автокореляційної функції можна відшукати так:

$$R_{xx}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{p=0}^{n-r-1} \dot{x}_i \dot{x}_{i-r}, \quad (10)$$

тут  $\dot{x}_i, \dot{y}_i$  – значення центрованих випадкових функцій, такі що:  $\dot{x}_i = x_i - m_x$ ,

$m_x$  – математичне очікування випадкової функції  $x(t)$ , що знаходиться згідно наступного виразу:

$$m_x = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n x_i. \quad (11)$$

Незміщена та слухна оцінка дисперсії стаціонарної ергодичної функції:

$$D_x = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - m_x)^2, \quad (12)$$

а її середньоквадратичне відхилення:

$$\sigma_x = \sqrt{D_x}. \quad (13)$$

У разі, коли випадкові процеси  $x(t)$  та  $y(t)$  взаємозалежні, може бути визначена міра їх взаємного впливу у вигляді оцінки взаємної спектральної щільності  $S_{xy}$ :

$$S_{xy}(f_k) = C_{xy}(f_k) + jQ_{xy}(f_k) \quad (14)$$

$$|S_{xy}(f_k)| = \sqrt{(C_{xy}(f_k))^2 + (Q_{xy}(f_k))^2},$$

де  $C_{xy}(f_k)$  – ко-спектр взаємного амплітудного спектру (дійсна частина  $S_{xy}$ );  $Q_{xy}(f_k)$  – квадратурний спектр взаємного амплітудного спектру (уявна частина  $S_{xy}$ ), які визначаються згідно наступних виразів:

$$C_{xy}(f_k) = \frac{\Delta t}{2} \left[ A_{xy}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} A_{xy}(r\Delta t) \cos\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + A_{xy}(m) \cos(\pi k) \right], \quad (15)$$

$$Q_{xy}(f_k) = \frac{\Delta t}{2} \left[ B_{xy}(0) + 2 \sum_{r=1}^{m-1} B_{xy}(r\Delta t) \sin\left(\frac{\pi k r}{m}\right) + B_{xy}(m) \sin(\pi k) \right]$$

де  $A_{xy}(r\Delta t)$  – вектор згладжених оцінок суми кореляційних функцій;

$B_{xy}(r\Delta t)$  – вектор згладжених оцінок різниці кореляційних функцій, що шукаються з рівнянь:

$$A_{xy}(r\Delta t) = \bar{R}_{xy}(r\Delta t) + \bar{R}_{yx}(r\Delta t), \quad (16)$$

$$B_{xy}(r\Delta t) = \bar{R}_{xy}(r\Delta t) - \bar{R}_{yx}(r\Delta t)$$

де  $\bar{R}_{xy}(r\Delta t)$  – згладжена оцінка взаємно кореляційної функції  $R_{xy}(r\Delta t)$ ;

$\bar{R}_{yx}(r\Delta t)$  – згладжена оцінка взаємної кореляційної функції  $R_{yx}(r\Delta t)$ ;

$$R_{xy}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{i=1}^{n-r-1} \dot{x}_i \dot{y}_{i+r} \quad (17)$$

$$R_{yx}(r\Delta t) = \frac{1}{n-r-1} \sum_{i=1}^{n-r-1} \dot{x}_{i+r} \dot{y}_i$$

Після цього потрібно виконати перевірку відповідності отриманих оцінок спектральних щільностей сигналів «вхід-вихід» лінійному фізично реалізованому об'єкту. Така перевірка заснована на використанні наступної нерівності, що охоплює усю множину частот  $f_k$ :

$$S_{xx}(f_k) S_{yy}(f_k) \geq S_{xy}(f_k) S_{yx}(f_k). \quad (18)$$

У разі, якщо невірність (18) не виконується, то оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей для конкретної частоти  $f_k$  відкидаються як промахи.

Отримані таким чином оцінки авто- і взаємно спектральних щільностей (ВСЩ) складають основу визначення аналітичних функцій, які відповідають даним оцінкам. Для їх знаходження необхідно виконати апроксимацію графіків відповідних оцінок на класі дробово-раціональних функцій комплексного аргументу  $s = j\omega$ .

Використовуючи положення теорії ймовірності та математичної статистики у програмі MatLab було отримано наступні результати досліджень:

- записи (масиви) зміни вхідних  $S_h(t) = (S_{h1}, \dots, S_{hn})$ ,  $T(t) = (T_1, \dots, T_n)$  та вихідних  $h_k(t) = (h_{k1}, \dots, h_{kn})$ ,  $w(t) = (w_1, \dots, w_n)$  сигналів по-каскадно, з урахуванням того, що  $S_{hi} = S_h(i\Delta t)$ ,  $T_i = T(i\Delta t)$ ,  $h_i = h(i\Delta t)$ ,  $w_i = w(i\Delta t)$ ,  $k=1, \dots, 7$  (каскади),  $i=0, \dots, n$  такої довжини, щоб найбільша низькочастотна складова мала 5-10 періодів;

- визначені математичні сподівання сигналів  $m_{S_h}$ ,  $m_T$ ,  $m_{h_k}$ ,  $m_w$  «вхід-вихід» як об'єкта моделювання зерносушарки;

- знайдена дисперсія сигналів  $D_{S_h}$ ,  $D_T$ ,  $D_{h_k}$ ,  $D_w$ , а також квадрат значення відповідних дисперсій, що і є середньоквадратичним відхиленням функцій  $\sigma_x$ ;

- визначені кореляційні функції вхідних сигналів  $R_{S_h S_h}$ ,  $R_{TT}$ , вихідних сигналів  $R_{h_k h_k}$ ,  $R_{ww}$  та взаємно кореляційні функції їх комбінацій  $R_{S_h h_k}$ ,  $R_{S_h w}$ ,  $R_{T w}$ ,  $R_{w h_k}$ ;

- визначені оцінки спектральних  $S_{S_h S_h}$ ,  $S_{TT}$ ,  $S_{h_k h_k}$ ,  $S_{ww}$  і взаємно спектральних  $S_{S_h h_k}$ ,  $S_{S_h w}$ ,  $S_{T w}$ ,  $S_{w h_k}$  щільностей експериментально отриманих сигналів.

Процес обробки експериментальних даних виконано у два етапи. На першому етапі в результаті застосування алгоритму Блекмена-Т'юки до реалізації компонентів векторів сигналів керування та вихідних сигналів отримані оцінки відповідних кореляційних функцій та спектральних щільностей для усіх елементів множини об'єктів керування. Дискретне перетворення Фур'є згладжених оцінок кореляційних та взаємних кореляційних функцій дозволило розрахувати оцінки спектральних та взаємних спектральних щільностей відповідних сигналів. Апроксимація оцінок спектральних та взаємних спектральних щільностей методом узагальнених логарифмічних частотних характеристик дозволила визначити математичний опис цих сигналів у вигляді спектральних щільностей, графіки деяких з них показані на рис 2.

В результаті апроксимації методом узагальнених логарифмічних частотних характеристик були отримані вирази (19)-(27):

$$S_{S_h S_h} = k_{S_h} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (19)$$

$$S_{T T} = k_T \left| \frac{(s + a_1)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2, \quad (20)$$

$$S_{h_k h_k} = k_{h_k} \left| \frac{(s + c_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2, \quad (21)$$

$$S_{w w} = k_w \left| \frac{1}{(s + a_9)} \right|^2, \quad (22)$$

$$S_{S_h h_k} = k_{S_h h_k} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_5)}{(s + a_6)}, \quad (23)$$

$$S_{S_h w} = k_{S_h w} \left| \frac{(s + a_1)(s + a_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (24)$$

$$S_{T w} = k_{T w} \left| \frac{(s + a_3)(s + b_2)}{(s + b_3)(s^2 + 2d_1 b_4 s + b_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s + a_7)}{(s + a_8)}, \quad (25)$$

$$S_{w h_k} = k_{w h_k} \left| \frac{(s + u_1)(s + u_2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \right|^2 \cdot \frac{(s^2 + 2d_2 a_4 s + a_4^2)(s^2 + 2d_3 b_5 s + b_5^2)}{(s + u_3)(s + u_4)}, \quad (26)$$

$$S_{h_n h_{n+1}} = k_{h_n h_{n+1}} \frac{(s + p_1)(s + p_2)(s + p_3)(s^2 + 2d_4 p_4 s + p_4^2)}{(s + a_3)(s^2 + 2d_1 a_4 s + a_4^2)} \quad (n=1, 2, \dots, 6) \quad (27)$$

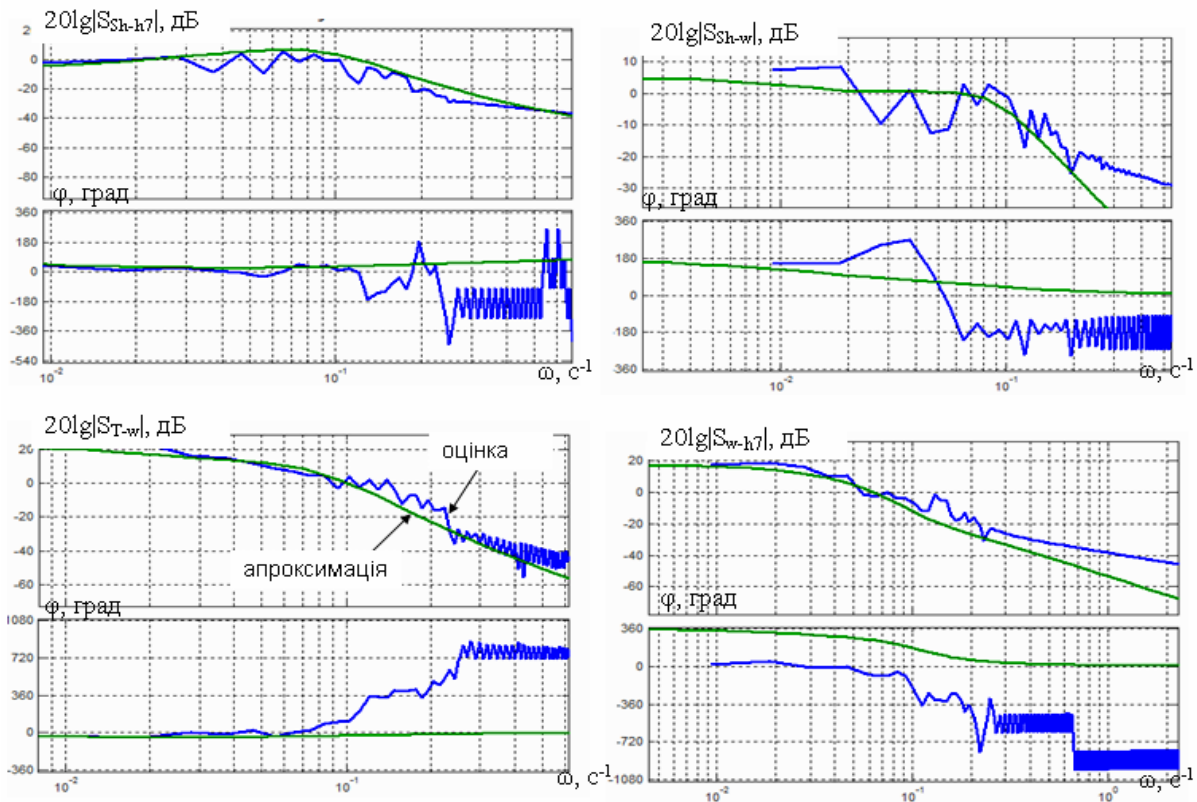


Рис 2. Апроксимація деяких взаємних спектральних щільностей

Таблиця 1

**Зміна параметрів взаємної спектральної щільності висот киплячого шару між каскадами**

Спектр. щільн	$k_{h_n h_{n+1}}$	$p_1, C^{-1}$	$p_2, C^{-1}$	$p_3, C^{-1}$	$p_4, C^{-1}$
$S_{h_1 h_2}$	$-2.57 \cdot 10^{-2}$	-0.08	0.045	-0.4	0.25
$S_{h_2 h_3}$	$-1.44 \cdot 10^{-2}$	-0.1075	0.05952	-0.5	0.2
$S_{h_3 h_4}$	$-1.28 \cdot 10^{-2}$	-0.1075	0.05952	-0.5	0.2
$S_{h_4 h_5}$	$-1.13 \cdot 10^{-2}$	-0.054	0.02976	-0.4	0.3
$S_{h_5 h_6}$	$-0.42 \cdot 10^{-2}$	-0.08064	0.045	-0.6	0.3
$S_{h_6 h_7}$	$-0.42 \cdot 10^{-2}$	-0.054	0.029	-0.5	0.35

Таблиця 2

**Передаючі коефіцієнти спектральних щільностей, що не змінюються, по-каскадно**

Спектр. щільн	$k_{S_h}$	Спектр. щільн	$k_T$	Спектр. щільн	$k_{S_{h_w}}, \% / M$	Спектр. щільн	$k_{T_w}, \% / ^\circ C$	Спектр. щільн	$k_w$
$S_{S_h S_h}$	$-5.8x 10^{-4}$	$S_{TT}$	$-1.9x 10^{-3}$	$S_{S_{h_w}}$	$-3.75x 10^{-4}$	$S_{T_w}$	$-3.5x 10^{-4}$	$S_{w_w}$	$-1.08x 10^{-2}$

Таблиця 3

**Параметри спектральних щільностей, що змінюються по-каскадно**

Спектр. щільн	$k_{S_h h_k} \times 10^{-4}$	$a_5, C^{-1}$	$a_6, C^{-1}$	Спектр. щільн	$k_{h_k} \times 10^{-3}$	$c_1, C^{-1}$	Спектр. щільн	$k_{wh_k}, \times 10^{-3} \% / M$	$u_1, C^{-1}$	$u_2, \times 10^{-4} C^{-1}$	$u_3, \times 10^{-4} C^{-1}$
$S_{S_h h_1}$	-6.04	0.15	0.022	$S_{h_1}$	-1.4	0.2	$S_{wh_1}$	-3.13	0.2	25	90
$S_{S_h h_2}$	-4.9	0.1	0.018	$S_{h_2}$	-0.6	0.207	$S_{wh_2}$	-1.7	0.151	19	90
$S_{S_h h_3}$	-4.17	0.1	0.018	$S_{h_3}$	-0.63	0.2	$S_{wh_3}$	-1.95	0.2	10	15
$S_{S_h h_4}$	-3.6	0.09	0.03	$S_{h_4}$	-2.05	0.07	$S_{wh_4}$	-1.4	0.15	10	12
$S_{S_h h_5}$	-3.2	0.05	0.022	$S_{h_5}$	-6.34	0.1	$S_{wh_5}$	-1.39	0.2	10	19
$S_{S_h h_6}$	-3.1	0.08	0.022	$S_{h_6}$	-8.1	0.02	$S_{wh_6}$	-1.94	0.1	12	15
$S_{S_h h_7}$	-2.98	0.09	0.026	$S_{h_7}$	-8.9	0.09	$S_{wh_7}$	-2.18	0.1	12	15

Числові значення параметрів спектральної щільності (СЩ), що змінюються при зміні відстані  $\Delta$  від шибера завантаження до центру мас каскаду, наведено у табл. 1-3, де  $a_1 = 0.025$ ;  $a_2 = 0.4$ ;  $a_3 = 0.05$ ;  $a_4 = 0.09$ ;  $a_7 = 0.07$ ;  $a_8 = 0.01$ ;  $a_9 = 0.012$ ;  $b_2 = 0.0055$ ;  $b_3 = 0.006$ ;  $b_4 = 0.08$ ;  $b_5 = 0.14$ ;  $d_1 = 0.6$ ;  $d_2 = 0.4$ ;  $d_3 = 0.5$ ;  $d_4 = 0.3$ ;  $u_4 = 0.03$ .

**Висновки:** Отримані описи сигналів «вхід-вихід» у вигляді спектральних та взаємноспектральних щільностей стануть вихідними даними

для виконання наступного етапу ідентифікації динаміки зерносушарки з киплячим шаром як об'єкта автоматизації. В результаті чого планується отримання набору матриць передаючих функцій зерносушарки з киплячим шаром у розрізі кожного каскаду, тобто з урахуванням розподіленості та багато вимірності. Наступний етап передбачатиме також отримання математичного опису збурень, що діють на сушарку з киплячим шаром в реальних експлуатаційних умовах.

**Список літератури:**

1. Федотова М.О. Автоматизація процесу стабілізації висоти киплячого шару насіння у зерносушарці за неповними вимірами: дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук: 05.13.07. Кропивницький, 2017. 276 с.
2. *Sergey Osadchy, Valentina Zubenko, Marianna Fedotova*. Synthesis of an Optimal Stochastic Stabilization System for an Unstable Multivariable Object with Time Delays in Controls. 2018 IEEE 5th International Conference on Methods and Systems of Navigation and Motion Control (MSNMC), October, 16-18, 2018 Kyiv, Ukraine. P. 114-118
3. Trushakov, D., Kozlovskiy, O., Rendzinyak, S., Fedotova, M., Korud, V. Automated System for Measuring the Temperature of the Desiccator Proceedings of 2020 IEEE 21st International Conference on Computational Problems of Electrical Engineering, CPEE 2020, 2020, 9238716 Conference Paper.
4. Федотова М.О., Скриннік І.О., Осадчий С.І., Трушаков Д.В. Ідентифікація сигналів як один з етапів синтезу системи стабілізації висоти киплячого шару в зерносушарці «Системні технології» 4 (135) 2021 «System technologies» [DOI 10.34185/1562-9945-4-135-2021-09]
5. Трушаков Д., Козловський О., Рендзіняк С., Коруд В., Федотова М. Автоматизована система фільтрації завад під час вимірювання температури сушильної шафи. Електроніка та інформаційні технології. 2021. Випуск 15. С. 80–89 Electronics and information technologies. 2021. Issue 15. P. 80–89 [<http://elit.lnu.edu.ua/en/15/8.html>]
6. Азарсков В.Н. Методология конструирования оптимальных систем стохастической стабилизации / В.Н. Азарсков, Л.Н. Блохин, Л.С. Житецкий, монография. К.: НАУ, 2006. 438 с

**Fedotova M.O., Skrynnik I.O., Didyk O.K., Berezyuk I.A., Zubenko V.O., Serbul O.M., Trushakov D.V. TECHNOLOGY OF IDENTIFICATION OF SIGNALS OF A BRAIN DRYER WITH A FLUID LAYER AS AN OBJECT OF AUTOMATION AND ITS PRACTICAL IMPLEMENTATION**

*Fluidized bed drying has great advantages over other methods. Due to the fact that the dispersed material acquires a state of "boiling" – it is washed on all sides, so drying is faster and with less energy. Cascading fluid bed dryers have been shown to be a multidimensional object with delayed distributed parameters. It is difficult to automate such a grain dryer not only because of the rapidity of physical processes occurring in it, but also because this dryer is a new design, not sufficiently studied. Therefore, this work is devoted to the development of an algorithm for the identification of this type of object in terms of mathematical description of the signals "input-output", taking into account the dynamics of processes and design features. This paper also shows the practical implementation of the developed technology on the example of a dryer for drying dispersed material in a fluidized bed. As a result of the application of the technology, a set of spectral and cross-spectral densities of "input-output" signals was obtained, which describe the relationships of the parameters with each other in real operating conditions. The obtained data were summarized in tables and analyzed, and the graphs of spectral densities were approximated by the method of logarithmic characteristics. Spectral densities will be the starting point for the next stage of identification – determining the matrix of transfer functions of a multidimensional object with distributed parameters with a delay.*

**Key words:** Fluidized bed, automation object, cascades, mathematical expectation, variance, autocorrelation and cross-correlation function, spectral density, approximation

**Шувалов Д.Р.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## АВТОМАТИЧНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ПРИВОДУ РОЗКЛАДКИ ПОРТАЛЬНОГО ПРИЙМАЧА ГОТОВОГО КАБЕЛЮ

*Стаття присвячена розробці та впровадженню автоматичної системи керування приводу розкладки портального приймача кабелю. На теперішній час автоматизація є невід'ємною частиною у промислових виробництвах кабелю, оскільки запити на обсяги та швидкість виготовлення продукції постійно зростають. Галузь автоматизації дуже швидко міняється з розвитком технічного і програмного устаткування, тому в статті розглянуті сучасні методи та прилади, які дозволяють реалізувати систему автоматичного керування для програмування центрального процесору, що забезпечує роботу приводу розкладки портального приймача готового кабелю. Це устаткування є важливою ланкою у сфері виробництва та транспортування готового кабелю, який використовується для потреб суспільства.*

*У статті запропоновано методику створення системи автоматичного керування (САК) на базі обладнання "Siemens". Створено алгоритм керування, наведені функціональні та електричні схеми. Розкрито засоби сучасної автоматизації та визначено проблеми при наладці системи. З метою введення в експлуатацію приводу, була створена програма на базі Siemens Tia Portal V15.1. Об'єктами керування у портальному приймачі є сервопривід та асинхронний двигун. Сервопривід контролюється за допомогою приводу Siemens S110 та налаштовується у програмі STARTER v5.4. Асинхронний двигун отримує завдання за допомогою приводу Yaskawa A1000. Живлення обох двигунів надходить від мережі 380/220V. У дослідженні пояснено як використовується процесор Simantic S7-1200 CPU та два додаткових модулі розширення: модуль дискретних входів Digital Input 16x24VDC\_1 SM 1221 DC, модуль аналогових входів SM 1234 AI4/AQ2 для розробки програмного забезпечення автоматизованої системи. Визначені засоби зв'язку та налаштування об'єктів керування. Описано в дослідженні етапи промислового підключення та налаштування портального приймача. Ця програма була використана в лінії комп'ютерно-інтегрованої системи виробництва силового кабелю на Одеському кабельному заводі в лютому 2022 року.*

**Ключові слова:** Система автоматичного керування (САК), автоматизована система, функціональні та електричні схеми, Siemens Tia Portal v15.1, портальний приймач, розкладка портального приймача.

**Постановка проблеми.** Сучасна промисловість потребує велику кількість різноманітних типів силового кабелю. Процес виготовлення кабелю багатоетапний і керується, зазвичай, складною комп'ютерно-інтегрованою системою. Одним із головних етапів при виготовленні кабелів є екструзія. Багато наукових робіт присвячено вивченню роботи КІСУ на стадії екструзії та охолодження при виготовленні силових кабелів [1-3]. Питання функціонування портального приймача автоматичної системи керування виготовлення кабелю залишається поза увагою. Важливість автоматизації останнього етапу роботи САК виготовлення кабелю базується на складній системі оброблення вхідних і вихідних параметрів. Саме вивченню етапів розроблення, на прикладі розкладки готового кабелю, програмного забезпечення портального приймача САК виготовлення кабелю і промислового впро-

вадження в роботу виробництва присвячено це дослідження.

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

Виготовлення сучасного силового кабелю – це наукоємний процес. Технології постійно розвиваються, модернізуються, як сировини для шивки кабелю, так і прилади, і програми, що забезпечують роботу САК виготовлення кабелю [4, 5]. Шляхами удосконалення технологічного процесу виготовлення кабелю є всебічний аналіз параметричних умов виробництва кабелю на етапах екструзії [1] та охолодження [2, 3]. У питаннях побудови сучасних САК виготовлення кабелю важливими стають питання проектування систем [5]. При проектуванні, окремі позиції виділяються етапам: подачі сировини і розробленню портального приймача готового кабелю. Кожний етап має свої особливості і керується сучасним обладнанням з відповідним програмним забезпеченням [6, 7].

**Постановка завдання.** Метою дослідження є представлення етапів розробки і виробничого впровадження системи автоматичного керування на базі Siemens Tia Portal 15.1 для програмування центрального процесору SIMATIC S7-1200 та Sinamics STARTER v 5.4 для налаштування роботи приводу розкладки портального приймача готового кабелю.

Для досягнення мети розв'язано наступні задачі:

1. Обґрунтування відповідності розробленого програмного забезпечення електронній схемі роботи приводу розкладки портального приймача готового кабелю.
2. Огляд застосованих апаратно-програмних засобів управління для практичних та навчальних цілей.
3. Дослідження етапів впровадження розробленого програмного забезпечення у роботу виробничої лінії.

При цьому необхідно вирішувати наступні науково-технічні задачі:

- аналіз принципів побудови уніфікованих систем управління технологічним обладнанням;
- розробка і тестування програмних алгоритмів;
- використання розроблених програм на практиці.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Розглянемо зображення портального приймача готового силового кабелю (рис. 1). Згідно цієї

схеми прилади, що включено до загальної системи це: 1 – барабан; 2 – механізм встановлення барабану з фіксуючими пинолями; 3 – траверси; 4 – контроллер; 5 – кабель; 6 – кінцеві датчики.

САК роботи приводу розкладки портального приймача готового кабелю поділяється на два основних режими роботи: ручний та автоматичний. Умовою запуску автоматичного режиму є виконання дій по фіксації пинолів, що утримують в просторі барабан для скрутки кабелю. Ручний режим дозволяє виконувати дії по прямому та зворотному обертанню барабану з зсувом напрямних кабелю. Релейна логіка, що реалізується у ручному режимі роботи системи виконується з пульта керування. Основним критерієм для переходу з ручного в автоматичний режим роботи є готовність барабану до прийому кабелю, що відповідає визначеному параметру стану роботи фіксуючих пинолів.

Автоматичний режим роботи дозволяє виконувати безперервну намотку кабелю заданої довжини на барабан з визначеною швидкістю і кроком розкладки. Після заповнення барабану відповідною довжиною кабелю, лінія зменшує швидкість і повністю припиняє роботу. Для відновлення процесу виготовлення і намотки кабелю в ручному режимі виконуються дії по заміні барабана.

Розглянемо функціональну схему системи управління портального приймача кабелю (рис. 2).

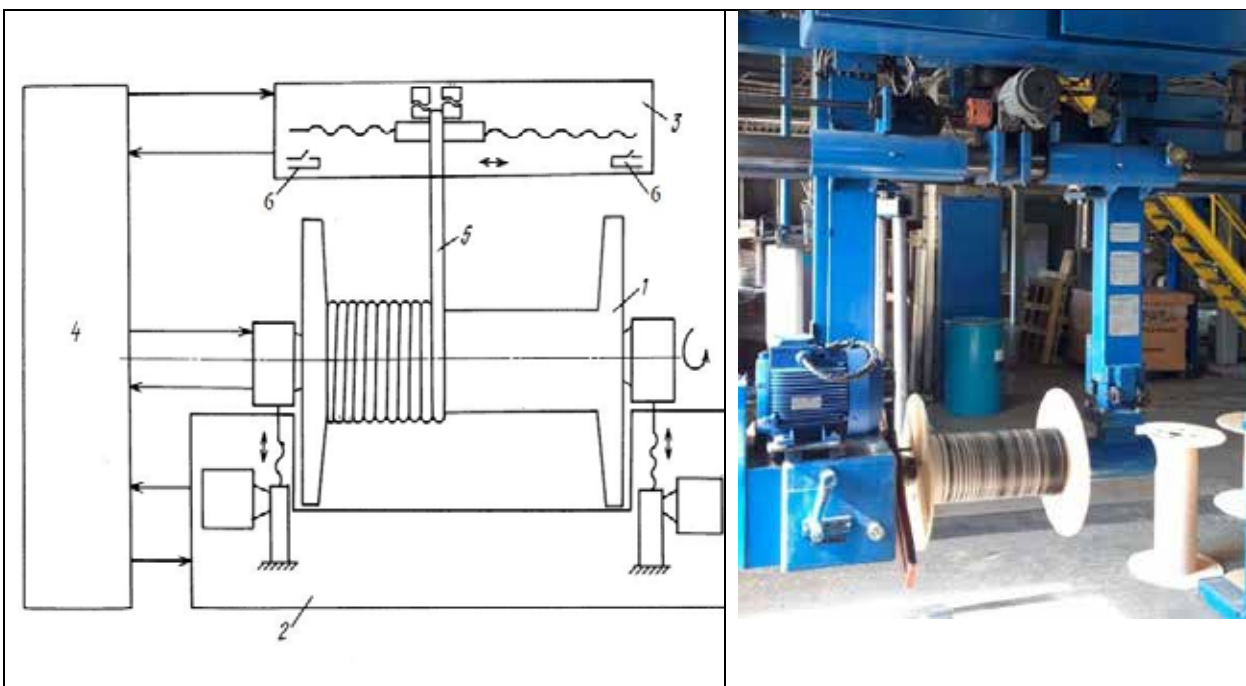


Рис. 1. Основні механізми роботи портального приймача готового кабелю



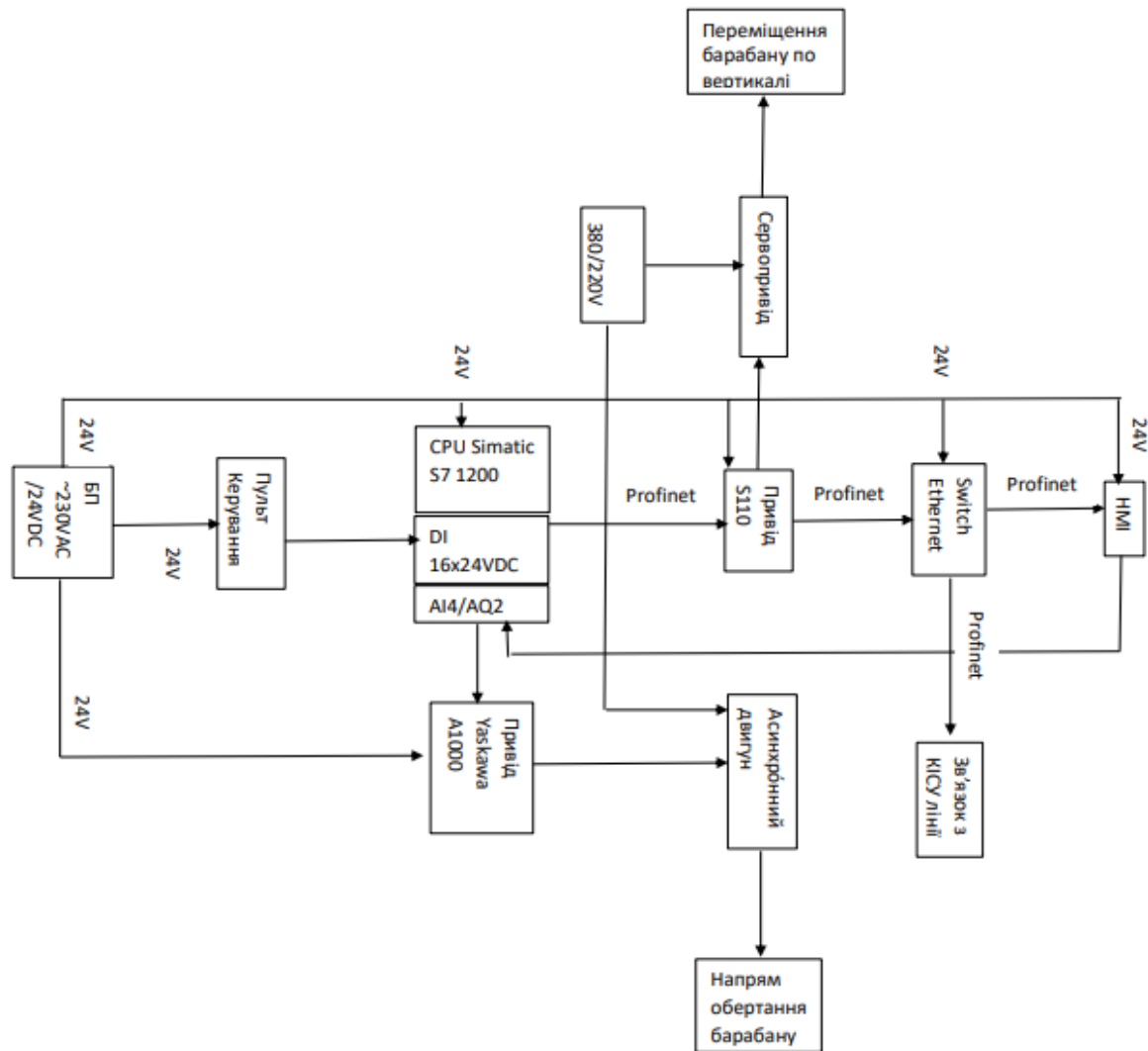


Рис. 2. Функціональна схема системи управління

Згідно зі схемою (рис. 2) контролер зв'язується з приводом розкладки S110 за допомогою протоколу PROFINET. Далі за допомогою кабелю Ethernet та блоку комунікації Switch відбувається передача даних на HMI панель та КІСУ лінії. Сигнали з пульта керування надходять до дискретних входів контролера, так само, як завдання на двигуни приходять до аналогових входів. Об'єктами керування у портальному приймачі є сервопривід та асинхронний двигун. Сервопривід контролюється за допомогою приводу Siemens S110 та налаштовується у програмі STARTER v5.4. Асинхронний двигун отримує завдання за допомогою приводу Yaskawa A1000. Живлення обох двигунів надходить від мережі 380/220V. Всі інші елементи системи підключені до блоку живлення згідно з функціональною схемою (рис. 2).

Для програмування роботи станку для намотки (портальний приймач) у лінії по виго-

товленню кабелю використовується процесор SimanticS7-1200 CPU 1214C DC/DC/DC та два додаткових модулі розширення: модуль дискретних входів 6ES7221-1BH32-0XB0 Digital Input 16x24VDC 1 SM 1221 DC, модуль аналогових входів 6ES7 234-4HE32-0XB0 SM 1234 AI4/AQ2 (рис. 3).

Програмування процесору і додаткових модулів виконувалось у програмному середовищі Siemens Tia Portal 15.1 мовами LAD-FBD. Першою основою для розроблення програмного забезпечення САК портального приймача стала Network View або карта основних зв'язків в системі (рис. 4). Згідно з картою основних зв'язків обмін даними в системі відбувається між CPU, HMI панеллю і приводом розкладки портального приймача Sinamics S110.

Для налаштування зв'язку та правильної роботи приводу розкладки використовувалася програма SINAMICS STARTER v 5.4 (рис. 5).





Рис. 3. 1 - CPU 1214C DC/DC/DC; 2 - SM 1221 DC; 3 - SM 1234 AI/AO

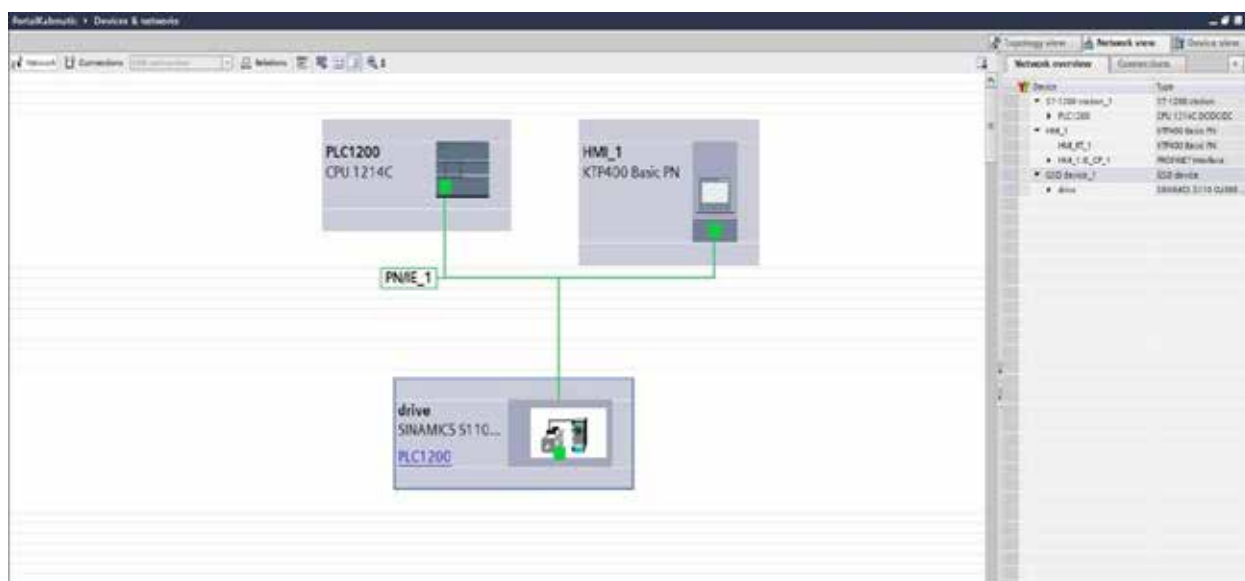


Рис. 4. Карта основних зав'язків в системі

Для реалізації основних зав'язків в системі автоматизованого керування і забезпечення функціонування автоматизованої системи було розроблено комплексну електронну схему. Згідно цієї схеми розроблялось програмне забезпечення. Структура розгорнутої електронної схеми включає наступні елементи системи:

1. Вхідні ланцюги шафи керування лінії.
2. Мережевий Lan-світ та панель керування.
3. Вхідні і аварійні ланцюги шафи керування приймача.
4. Привод намотки.
5. Привод розкладки (рис. 4).
6. PLC S7-1200.
7. Входи, виходи, кодер намотки, реле і контактори.
8. Кнопки управління намоткою і розкладкою.
9. Управління заправкою і кінцеві розкладки.
10. Логіка включення контакторів підйому/спуску жазима.
11. Силова схема двигунів ланцюгу підйому/спуску, зажиму/розжиму.

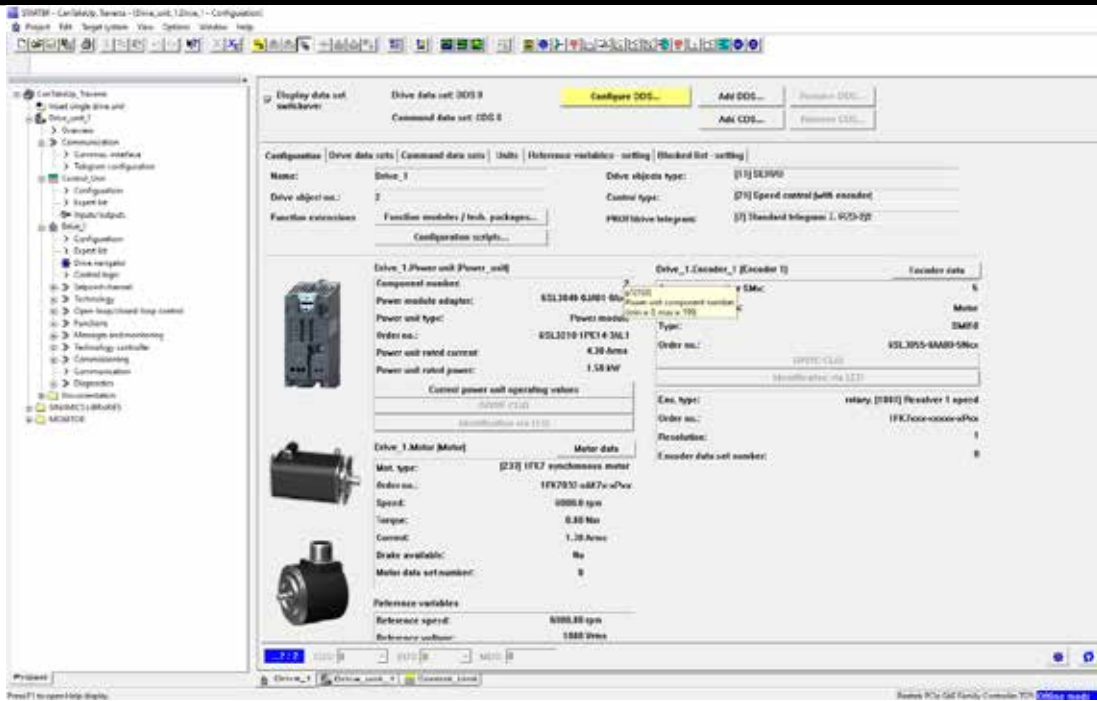


Рис. 5. Програмне середовище SINAMICS STARTER v 5.4

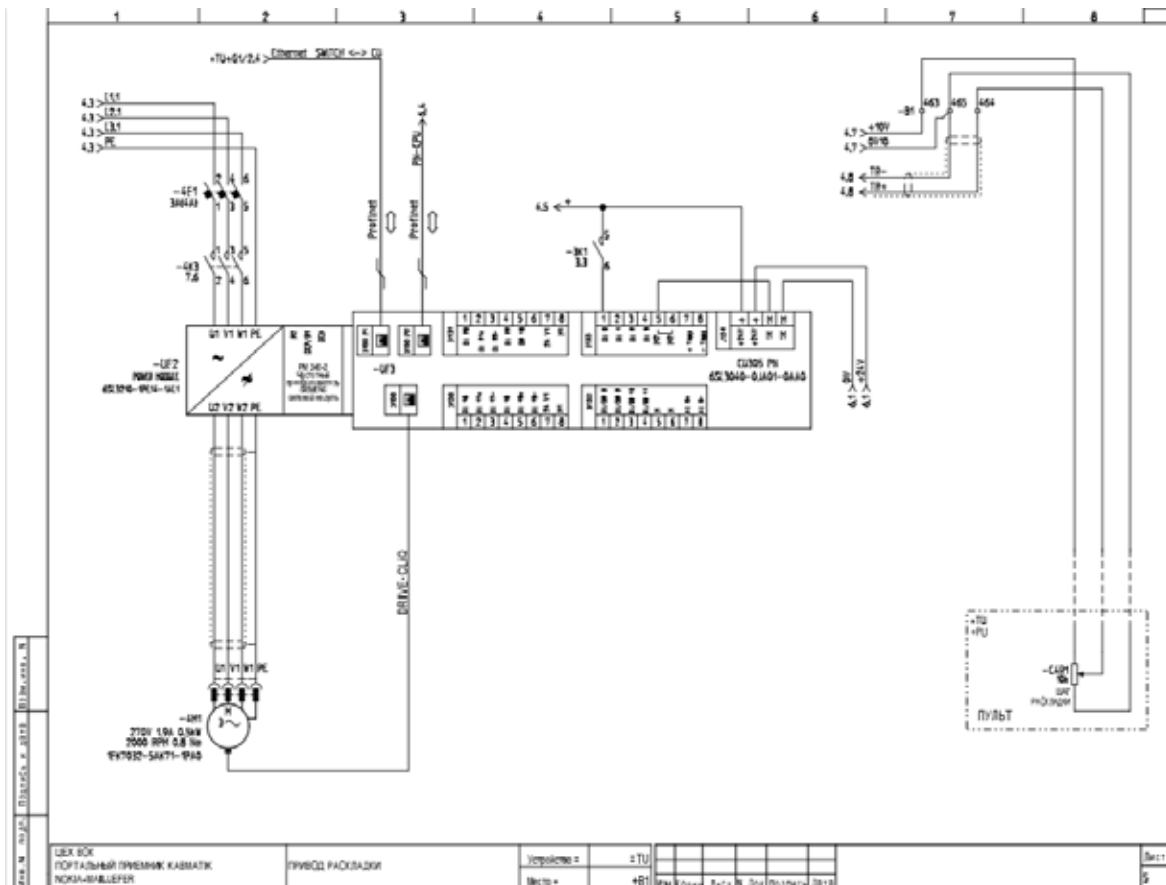


Рис. 6. Електронна схема приводу розкладки

Розглянемо одну з електронних схем функціонування приладу, на прикладі схеми приводу розкладки (рис. 6).

Розроблення програмного забезпечення відбувалось строго в відповідності до розгорнутих електронних схем. Для прикладу наведемо

фрагмент програмного коду налаштування CPU для приладу розкладки програмі Tia Portal v15.1 (рис. 7)

Дослідження етапів впровадження розробленого програмного забезпечення у роботу виробничої лінії базується на всебічному тестуванні основних параметрів роботи автоматизованої системи, що програмно реалізовано і налаштовуються за допомогою програми Tia Portal v 15.1 за допомогою мови програмування LAD. Важливу

роль у розробці програми виконує панель оператора, налаштування якої є важливим та необхідним процесом, який допомагає оператору у контролі приймача, продукції та роботі (рис. 8, 9).

Для перевірки роботи системи на етапі виробничого впровадження велась робота по тестуванню кожного блока системи. Перевірка коректності виконання алгоритмів програми. Важливою дією, при налаштуванні системи, є замір токових сигналів від реле та компенсатора. В ідеальних

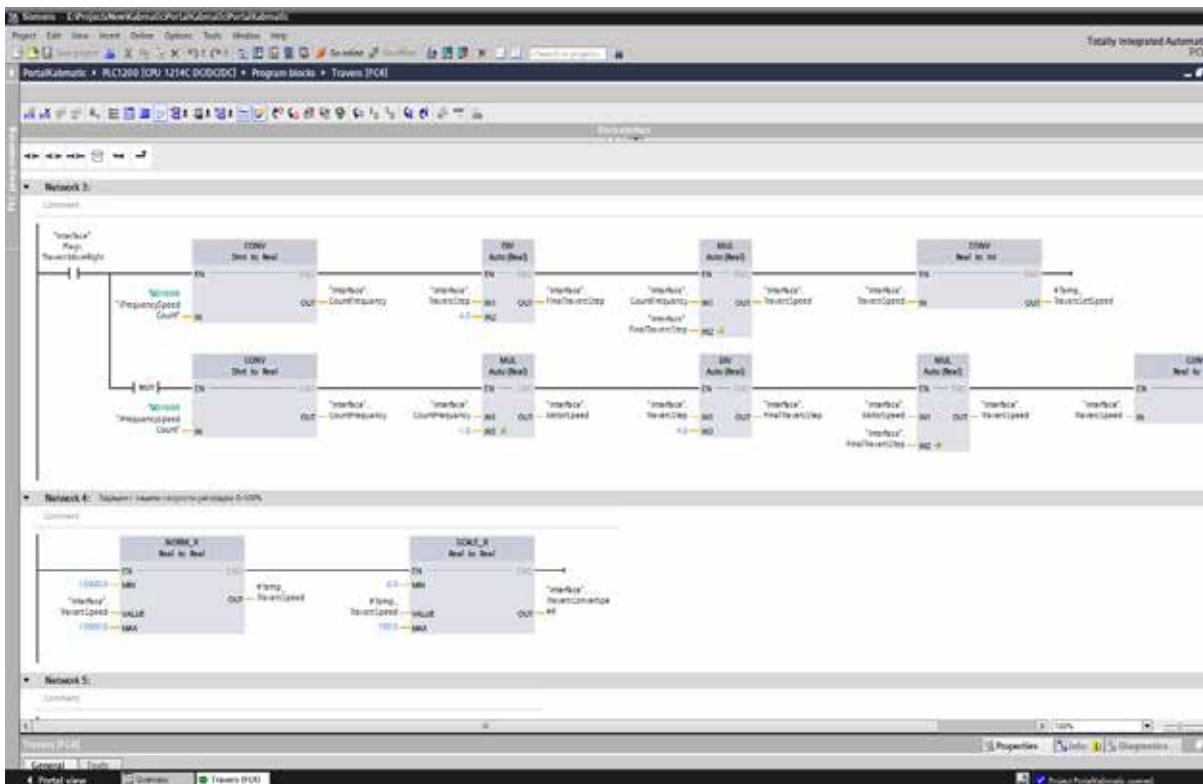


Рис. 7. Фрагмент програми налаштування CPU для приладу розкладки в програмі Tia Portal v15.1

Name	Data type	Start value	Retain	Accessible F...	Write...	Visible in...	Category	Comment
Static	Struct							
TakeUpSetPoint(PID)	Real	0.0						Установка заданя PID
InputDancer	Real	0.0						Включення танцювальних компенсаторів
TakeUpConvSpeed	Int	0						Включений параметр ПИД регулятора
DancerOut(PID)	Real	0.0						Указатель компенсатора
K_Dancer	Real	1.0						
DancerParametr	Real	0.0						Знач. компенсатора с учетом коэф. инт.
SetLineSpeed	Real	0.0						Скорость линии получаемая с контроллера
TakeUpSpeed	Int	0						Скорость приемника в автоматическом ре...
ManualTakeUpSpeed	Int	15						Присваиваем значение переменной с HMI
AutoTakeUpSpeed	Int	15						Задание скорости для начальной с лямпы в д...
HMITakeUpSpeed	Int	0						Скорость приемника заданная с экрана
TakeUpTorqueSetPoint	Int	0						Знач. момента част. прибор. момент при...
TakeUpSpoolSetPoint	Int	0						Знач. скорости част. прибор. момент при...
TraversSpeed	Real	0.0						Задание скорости раскладки
TraversFastMove	Int	4000						Раскладка быстро вправо
TraversFastMoveIn	Int	0						Раскладка быстро влево
TraversFastMoveOut	Int	0						
TraversFastPIM	Int	0						Задание скорости раскладки быстро влево...

Рис. 8. Основні параметри роботи інтерфейсу системи

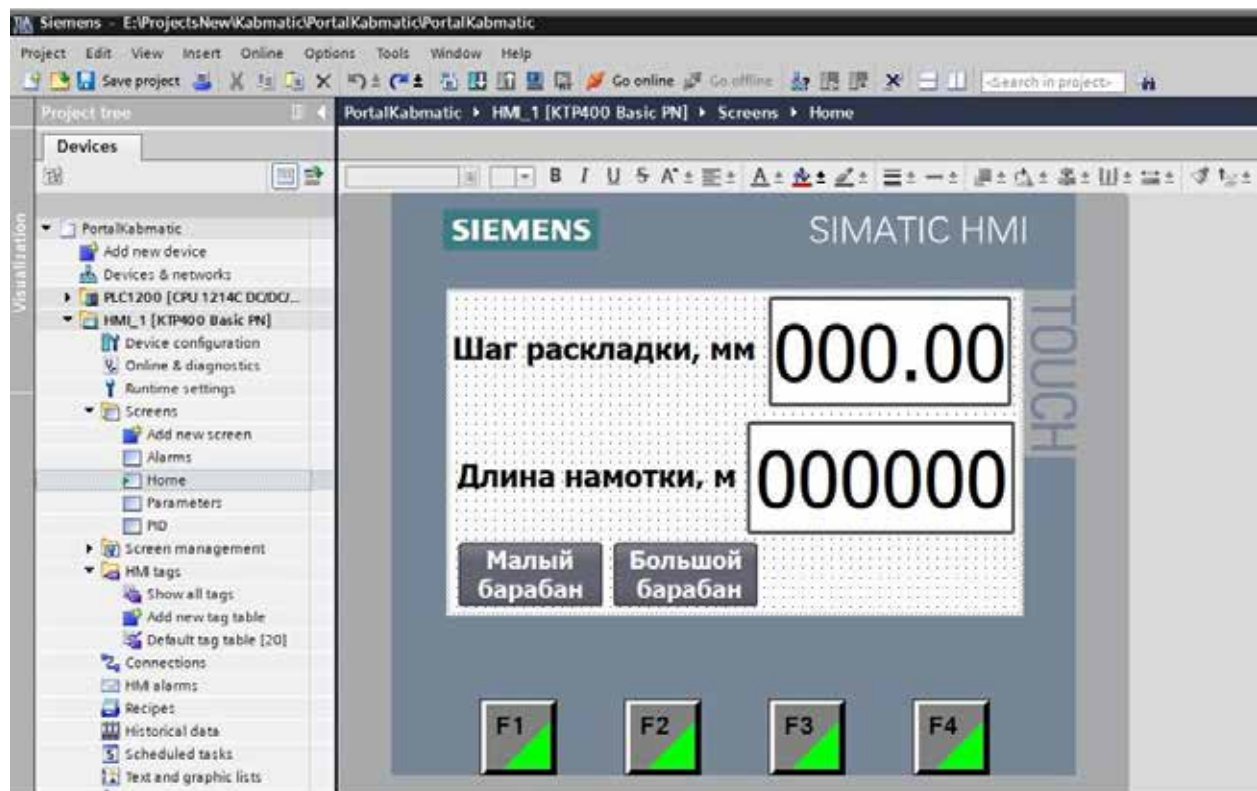


Рис. 9. Програмування інтерфейсу системи в панелі НМІ КТР400 за допомогою Tia Portal v15.1

умовах діапазон становить 0-10 В, але частіше він коливається від 0,5-9,8 В.

**Висновки.** В дослідженні представлено розгорнутий програмний комплекс на базі Siemens Tia Portal 15.1 для програмування центрального процесору SIMATIC S7-1200 та Sinamics STARTER v 5.4 для налаштування роботи при-

воду розкладки приймача готового кабелю. Науково обґрунтовано відповідність розробленого програмного забезпечення структурній та електронній схемам роботи приймача КІСУ виготовлення кабелю. Досліджено етапи впровадження розробленого програмного забезпечення у роботу виробничої лінії.

#### Список літератури:

1. Щербина С.А. Апаратно-чутливі методи контролю ступеня зшивки радіаційно-модифікованої полімерної ізоляції кабелів. *ISSN 2224-0349. Вісник НТУ «ХП»*. 2014. № 56 (1098). С. 145-153.
2. Безпрозванних Г.В., Мірчук І.А. Синтез технологічних режимів охолодження та радіаційного опромінення електричної ізоляції кабелів: монографія / Г.В. Безпрозванних, І.А. Мірчук. – Харків: НТУ «ХП», 2021. – 179 с. – Укр. Мовою
3. Гринишина М. В. Особливості технології виготовлення силових високовольтних кабелів з термопластичною полімерною ізоляцією. *Вісник Національного технічного університету «ХП»*. Серія: *Енергетика: надійність та енергоефективність*, вип. 2 (3), Грудень 2021, с. 59-65, doi:10.20998/2224-0349.2021.02.18
4. Bessonova M., Ponomareva M., Yakutenok V. Numerical solution of polymer melt flow problem in a single screw extruder. *Himičeskaâ fizika i mezoskopiâ*. 2019, vol. 21, no. 2, pp. 198–217. doi: <https://www.doi.org/10.15350/17270529.2019.2.22>.
5. Гарькава В. Ф., Єганов О. Ю., Бандура В. М., Арамян А. М. Моделювання сучасних комп'ютерних систем: монографія. – Варшава: RS Global Sp. z O.O., 2020. – 73 с
6. Programming Guideline for S7-1200/1500 Entry ID: 81318674, V1.6, 12/2018. URL: <https://support.industry.siemens.com/cs/ww/en/view/81318674>
7. Назаренко І.В., Ференець В.Д., Суханов Д. Є. Побудова і моделювання уніфікованих систем управління виконавчими механізмами об'єктів газотранспортної системи. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 1/2 (67) 2014. С. 41-48. URL: <http://journals.urau.com/ejet/article/view/21204/19352>

**Shuvalov D.R. AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE PORTAL RECEIVER DEVICE OF THE FINISHED CABLE**

*The article is devoted to the development and implementation of an automatic control system for the drive layout of the portal cable receiver. Automation is now an integral part of the cable industry, as demand for production volumes and speeds is growing. The field of automation is changing rapidly with the development of hardware and software, so the article discusses modern methods and devices that implement an automatic control system for CPU programming, which provides the layout of the portal receiver of the finished cable. This equipment is an important part of the production and transportation of finished cable, which is used for the needs of society.*

*The article proposes a method of creating an automatic control system (ACS) based on "Siemens" equipment. The control algorithm is created, and functional and electric schemes are given. Means of modern automation are revealed and problems with system adjustment are defined. To put the drive into operation, a program based on Siemens Tia Portal V15.1 was created. The control objects in the portal receiver are the servo drive and the induction motor. The servo is controlled by the Siemens S110 drive and configured in STARTER v5.4. The asynchronous motor receives tasks through the Yaskawa A1000 drive. Both motors are powered by 380 / 220V. The study explains how the Simantic S7-1200 CPU processor and two additional expansion modules are used: Digital Input 16x24VDC\_1 SM 1221 DC digital input module, SM 1234 AI4 / AQ2 analog input module for automated system software development. Communication and configuration settings are defined. Described in the studied stages of industrial connection and configuration of the portal receiver. This program was used in the line of a computer-integrated system for the production of power cables at the Odessa Cable Plant in February 2022.*

**Key words:** *computer-integrated system, software package based on Siemens Tia Portal 15.1, operation of the drive of the layout of the receiver of the finished cable.*



**Яворський О.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## РОЗРОБКА КІСУ САМОБАЛАНСУВАННЯ ДВОКОЛІСНОГО РОБОТА З МЕТОЮ ПОКРАЩЕННЯ СТІЙКОСТІ. КОНТРОЛЬ КУТА НАХИЛУ ПРОТОТИПУ

У статті приведено перелік необхідних деталей для побудови прототипу двоколісного робота, показана схема каскадної автоматизованої системи керування прототипом двоколісного робота, описаний принцип регулювання кута нахилу. Було проведено експериментальне дослідження впливу зміщення центру мас прототипу на якість регулювання його кута нахилу. У статті показані графіки відповідних перехідних процесів та наданий їх аналіз. Метою дослідження є перевірка гіпотези про вплив висоти центру мас на якість стабілізації робота та розробка схеми автоматизації самобалансуючого робота. В результаті дослідження комп'ютерно-інтегрованої системи управління самобалансування двоколісного робота була розроблена схема автоматизації самобалансуючого робота і була спростована гіпотеза про те що чим вище центр мас тим краще стабілізація.

Технології робототехніки зарекомендували себе у багатьох сферах людської діяльності. Робототехнічні комплекси (РТК) використовуються на підприємствах для автоматизації виробничого процесу під час надзвичайних подій для оперативної та безпечної допомоги.

Застосування робототехніки пов'язане з оптимізацією процесу – зниженням витрат і термінів, а також якісним поліпшенням результату. Наприклад, застосування роботів на автомобільних заводах скорочує виробничий цикл, підвищує якість продукції, усуває фактор людської помилки.

Залежно від обсягу продукції та розміру заробітної плати, автоматизація виробничого процесу з використанням роботів може окупитись протягом 1-3 роки. Додаткові кошти, звільнені після оптимізації виробництва, можна використовувати для розширення продуктової лінії, надання послуг, виходу нові ринки.

**Ключові слова:** автоматизація, робот, самобалансування, регулятор, стійкість.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Значимість цього проекту полягає в тому, що робот, що самобалансується, став надзвичайно популярним і так чи інакше використовується в ряді додатків. Чи говоримо ми про це на побутовому, комерційному чи промисловому рівні, цей робот пройшов через усе. Його можна використовувати як самоконтрольований візок у лікарнях, ресторанах, магазинах і т. д. Розробка та створення цього проекту з нуля дали чітке уявлення про роботу цього робота і проінструктували нас про різні компоненти та їх роль у досягненні балансу. Основна причина, через яку цей робот набув популярності, полягає в тому, що він заснований на ідеології популярної теорії перевернутого маятника, яка, згідно з Вікіпедією, «широко використовується як зразок для тестування алгоритмів управління».

### Постановка завдання.

- Вивчення літератури що до об'єкту автоматизації та його опис;
- Розробка схеми автоматизації самобалансуючого робота;

– Перевірка гіпотези про вплив висоти центру мас на якість стабілізації робота

### Виклад основного матеріалу дослідження

**Опис об'єкту автоматизації.** Проект включає мікроконтролер, датчик MPU6050 та драйвери двигунів. Був використаний ATmega328 на основі плати Arduino UNO, який зчитує необроблені дані з датчиків і оптопар, а потім за допомогою методів ПД-регулювання відправляє сигнали даних драйверу двигуна, який, у свою чергу, контролює момент двигунів, що крутить. Чіп датчика MPU6050 має вбудований акселерометр та гіроскоп, який допомагає вимірювати кутову швидкість та прискорення. Для робота, що самобалансується нахил – це кут тіла, який ми контролюємо. Цей кут розглядається як сигнал зворотного зв'язку від акселерометра для еталонного кута, що дорівнює нулю градусів. Тета-посилання – це коли робот перебуває у вертикальному положенні. Величина тета-різниці управляє швидкістю двигуна, а тета-зворотний зв'язок визначає напрямок. Оскільки вихідний сигнал акселерометра дуже шумний, гіроскоп використовується для точного вимі-

рювання зворотного зв'язку. Гіроскоп вимірює кутову швидкість, і комбінація двох виходів – це здебільшого наші необроблені дані.

На рисунку 1 зображено схему автоматизації двоколісного самобалансуючого робота

У цій статті буде розглянуто тільки контур регулятора кута нахилу.

На рисунку 2 зображена схема робота. Де 1 – управляюча електроніка, 2 – акумулятори, 3 – крокові двигуни

Основну масу робота складають три елемента це – управляюча електроніка, акумулятори і два крокових двигуни.

Була висунута гіпотеза, що чим вище знаходиться центр мас тим краще стабілізація робота. Для проведення експерименту необхідно зміщу-

вати центр мас і для цього була обрана платформа з акумуляторами, як найважчий елемент і більш простий для переміщення.

В ході дослідження був проведений експеримент, який складався з двох етапів по два досліди. В першому етапі платформа була у верхньому положенні при якому центр мас знаходився на висоті 12 см від підлоги, що показано на рисунку 3.

В другому етапі платформа була у нижньому положенні з центром мас на висоті 6 см, що показано на рисунку 4.

Для пошуку центру мас самобалансуючого робота було встановлено на вільний підвіс спочатку в одній точці, а потім в другій. Після цього по черзі були проведені перпендикуляри до горизонтальної поверхні, що перетинають

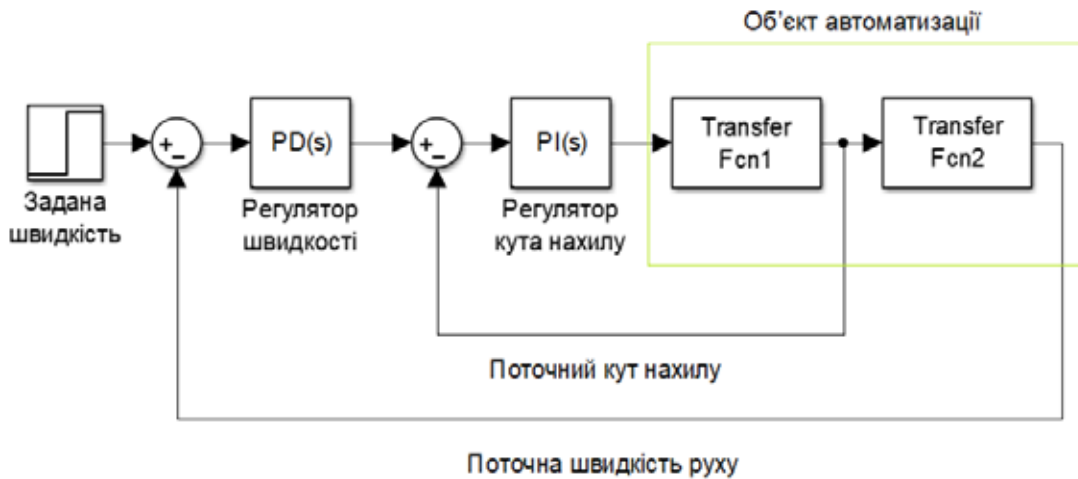


Рис. 1. Схему автоматизації двоколісного самобалансуючого робота

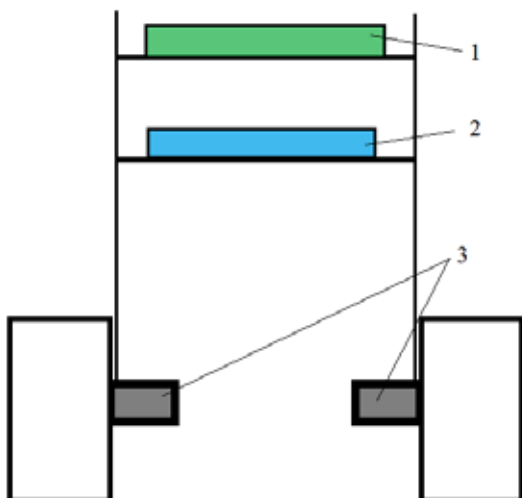


Рис. 2. Схематичне зображення самобалансуючого робота

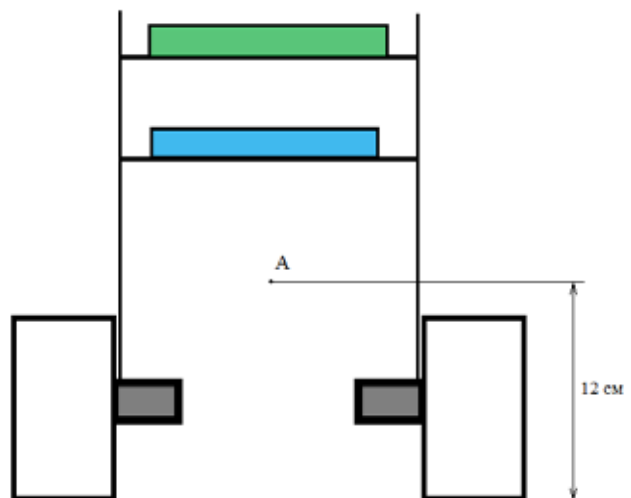


Рис. 3. Схема що відображає центр мас відносно підлоги при платформі з акумуляторами у верхньому положенні



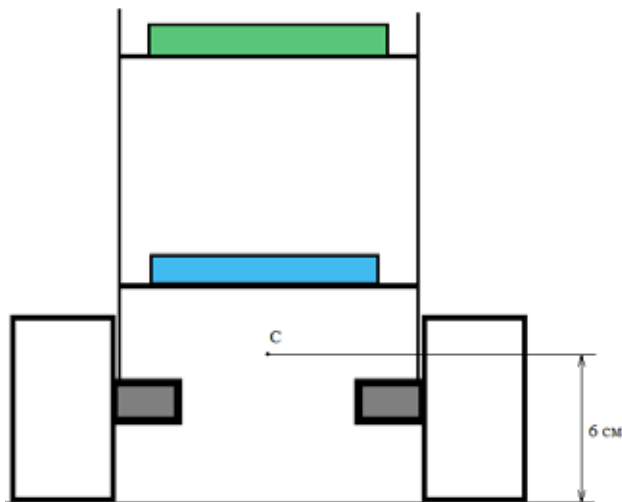


Рис. 4. Схема що відображає центр мас відносно підлоги при платформі з акумуляторами у нижньому положенні

точки підвісу. І у результаті в точці перетину ліній утворених перпендикулярами знаходиться центр мас.

У кожному етапі був один дослід з збуренням поданим по каналу управління швидкістю, а другий по каналу відхилення кута.

Для подачі крокового збурення по каналу управління швидкістю в програмі було задано набирання та дотримання швидкості 60 умовних одиниць. Крокове збурення по каналу управління швидкістю та реакція об'єкта при платформі в нижньому положенні на нього показана

на рисунку 5. Де 1 – збурення відображене по допоміжній осі в умовних одиницях, 2- поточний кут відображений по головній осі в градусах, 3 – цільовий кут відображений по головній осі в градусах.  $\Delta t$  – це цикл роботи програми

Крокове збурення по каналу управління швидкістю та реакція об'єкта при платформі у верхньому положенні на нього показана на рисунку 6.

По каналу відхилення кута було подане імпульсне збурення, для чого було використано пружинний механізм з функцією визначеного натягнення пружини.

Імпульсне збурення по каналу відхилення кута та реакція об'єкта при платформі в нижньому положенні на нього показана на рисунку 7. Де 1 – цільовий кут в градусах, 2- поточний кут в градусах.

Імпульсне збурення по каналу відхилення кута та реакція об'єкта при платформі у верхньому положенні на нього показана на рисунку 8.

Для перевірки якості стабілізації робота залежно від висоти центру мас була розрахована дисперсія від кута нахилу для кожного дослідів та результат зведено до таблиці 1.

Також було знайдено кількість циклів за яких робот входив до сталого режиму та зведено до таблиці 2. Де один цикл роботи програми  $\Delta t \approx 50$  мс.

Як видно з таблиці 1 по каналу відхилення кута при верхньому положенні центру мас маємо дисперсію менше ніж при нижньому положенні

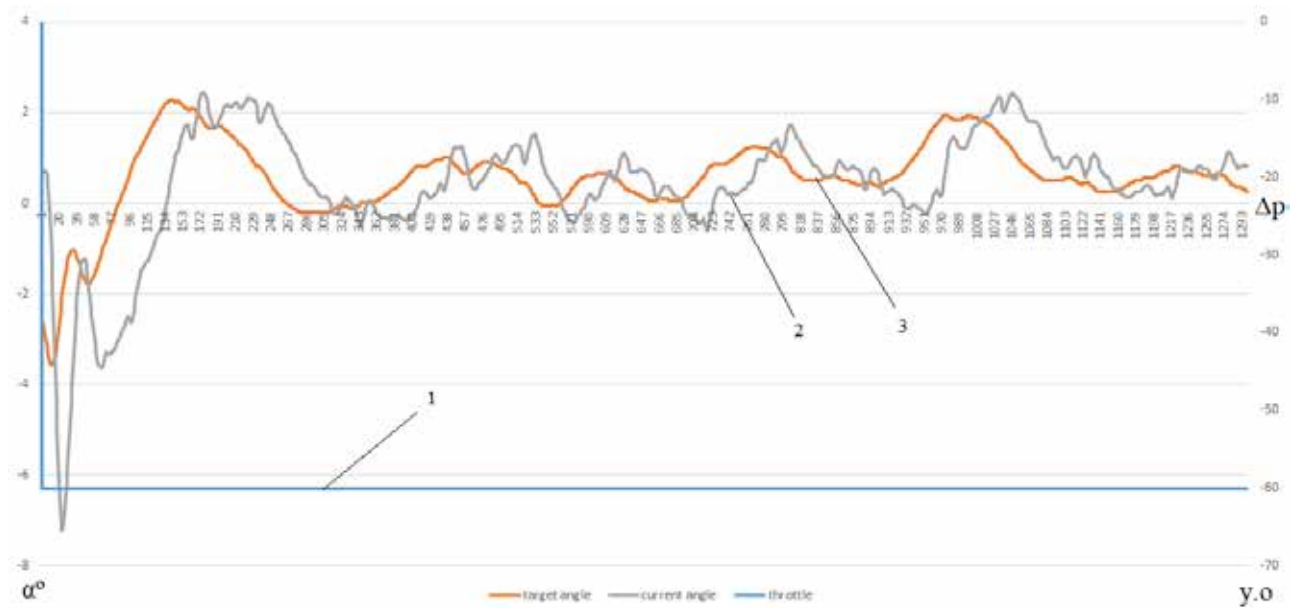


Рис. 5. Реакція об'єкта на збурення по каналу управління швидкістю при платформі у нижньому положенні

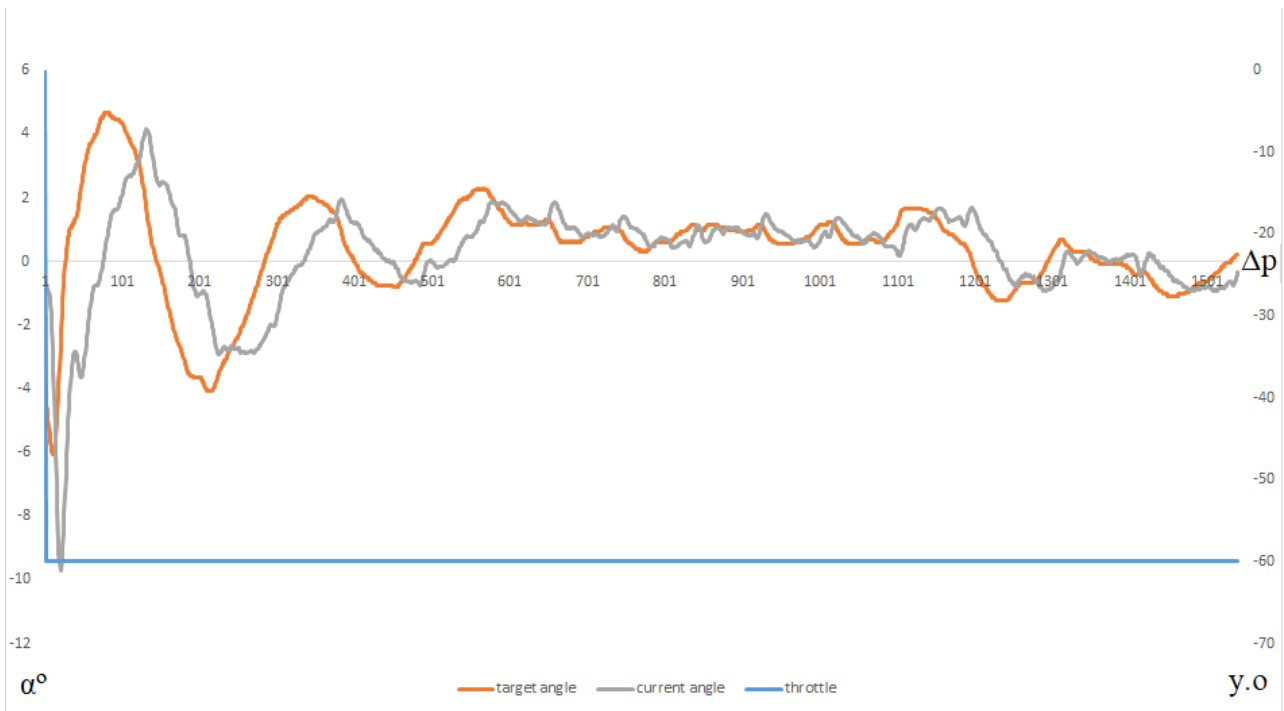


Рис. 6. Реакція об'єкта на збурення по каналу управління швидкістю при платформі у верхньому положенні

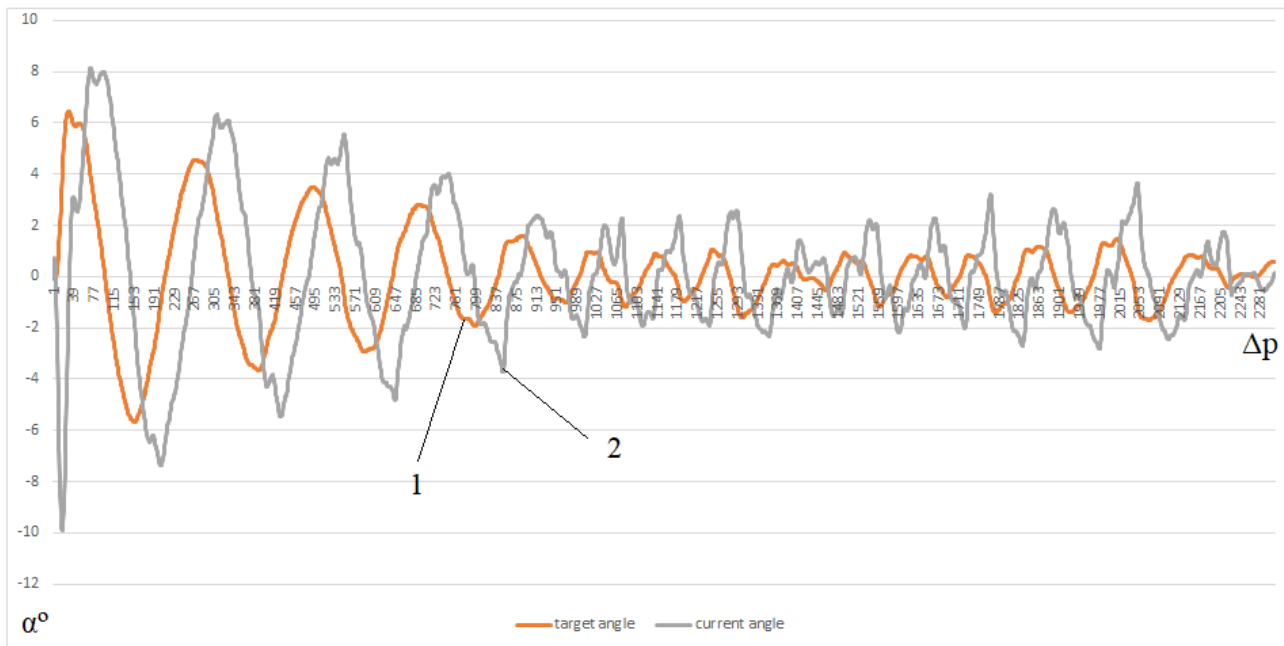


Рис. 7. Реакція об'єкта на збурення по каналу відхилення кута при платформі у нижньому положенні

що говорить про кращу стабілізацію при центрі мас зверху. Однак для каналу управління швидкістю спостерігається зворотна ситуація. В таблиці 2 також спостерігається протиріччя між каналами управління швидкістю та відхилення кута.

**Висновки**

У цій статті була розроблена схема автоматизації самобалансуючого робота. Була спростована гіпотеза про те що чим вище центр мас тим краще стабілізація. В ході експерименту виявилось, що висота центру мас має прямий вплив на стабілі-

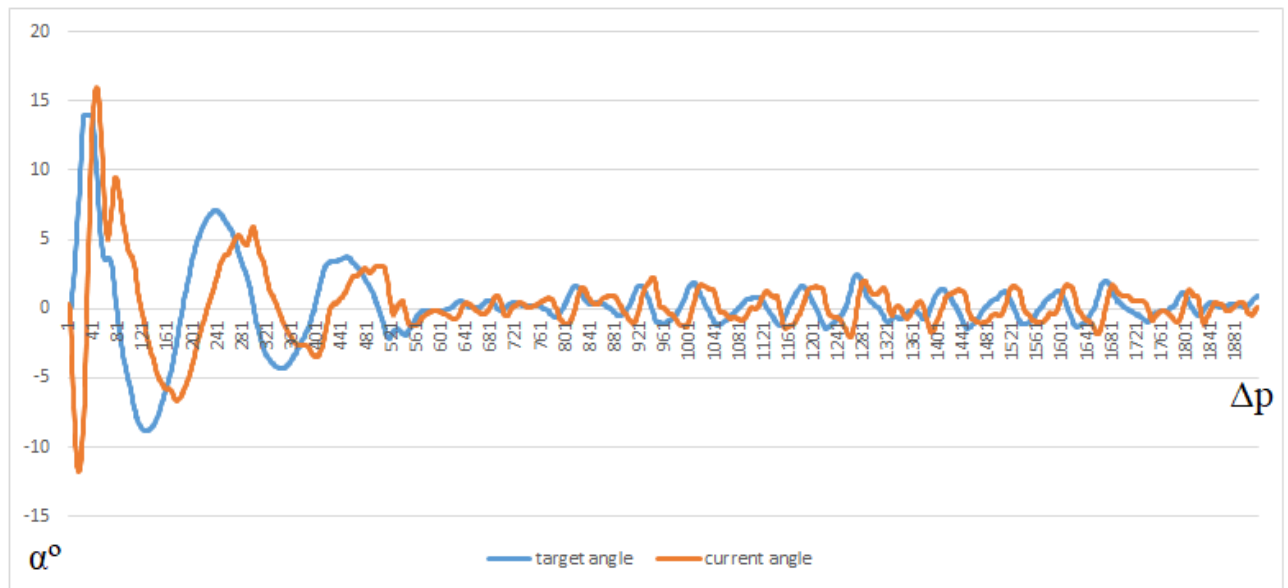


Рис. 8. Реакція об'єкта на збурення по каналу відхилення кута при платформі у верхньому положенні

Таблиця 1

Дисперсія сталого режиму роботи робота

		Положення платформи	
		Верхнє	Нижнє
Збурення	по каналу управління швидкістю	0,51460148	0,032035
	по каналу відхилення кута	0,76772329	1,879742

Таблиця 2

Кількість циклів за яких робот входить до сталого режиму

		Положення платформи	
		Верхнє	Нижнє
Кількість циклів програми	по каналу управління швидкістю	600	320
	по каналу відхилення кута	520	1000

зацію кута при нульовому збуренні по каналу управління швидкістю і зворотній вплив при ненульовому збуренні по каналу управління швидкістю. Однак для більшої достовірності необхідно

провести більше дослідів по кожному з чотирьох варіантів та усереднити їх результати. Так як результати досліджень в цій статті могли вміщати в себе погрішності виміру та зовнішні збурення.

Список літератури:

1. Муколянець А. А., Музафаров А. Р. Енергоефективність використання установки горячего водоснабжения на основе солнечного коллектора. 2015. № 2. – С. 8 – 12.
2. Рац Г. И. Развитие альтернативных источников энергии в решении глобальных энергетических проблем / за ред. М.А. Мординова. Известия Байкальского государственного университета, 2012. № 2. 132–136 с.
3. Тодорцев Ю. К. Объектно-ориентированная модель системы теплоснабжения. Информационные модели. 2005. Вып. 2(24). 160 – 164 с.
4. Лунева С. К. Эффективность применения тепловых насосов. Техничко-технологические проблемы сервиса. 2015. № 3(33). 59– 62 с.

**Yavorskyi O.V. DEVELOPMENT OF PSV FOR SELF-BALANCING OF TWO-WHEELED ROBOT TO IMPROVE STABILITY. CONTROL OF PROTOTYPE'S INCLINATION ANGLE**

The article lists the necessary details for building a prototype two-wheeled robot, shows a diagram of a cascade automated control system prototype two-wheeled robot, describes the principle of adjusting the angle. An experimental study of the effect of shifting the center of mass of the prototype on the quality of its angle of inclination was conducted. The article shows the graphs of the corresponding transients and provides their analysis. The aim of the study is to test the hypothesis about the influence of the height of the center of mass

*on the quality of robot stabilization and to develop a scheme for automation of self-balancing robot. A study of a computer-integrated two-wheeled robot self-balancing control system developed a self-balancing robot automation scheme and refuted the hypothesis that the higher the center of mass, the better the stabilization.*

*Robotics technology has proven itself in many areas of human activity. Robotic complexes (RTC) are used in enterprises to automate the production process during emergencies for operational and safe assistance.*

*The use of robotics is associated with the optimization of the process – reducing costs and time, as well as qualitative improvement of the result. For example, the use of robots in automobile plants reduces the production cycle, improves product quality, eliminates the factor of human error.*

*Depending on the volume of production and the amount of wages, automation of the production process using robots can pay off in 1-3 years. Additional funds released after the optimization of production can be used to expand the product line, provide services, enter new markets.*

**Key words:** automation, robot, self-balancing, regulator, stability.

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 629.78.048

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/22>

**Соломаха А.С.**

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

**Барабаш П.О.**

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

**Ярошевич М.В.**

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

### ВИЗНАЧЕННЯ ОПТИМАЛЬНОЇ КІЛЬКОСТІ СТУПЕНІВ ДЛЯ СИСТЕМИ ДИСТИЛЯЦІЇ З ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИМ ТЕПЛОВИМ НАСОСОМ

*Коротко проаналізовано існуючі та перспективні технології для регенерації води в умовах космічного польоту. Показано недоліки встановленого зараз на Міжнародній космічній станції відцентрового вакуумного дистилятора, будова якого не дозволяє використовувати його для майбутніх далеких космічних місій. Показано, що вказаних недоліків позбавлені розроблені в КПІ ім. Ігоря Сікорського відцентрові дистилятори з термоелектричним тепловим насосом в якості джерела теплоти. Описано принципову схему такого відцентрового дистилятора та розглянуто принцип його роботи. Побудовано математичну модель для визначення оптимальної кількості ступенів у багатоступінчатому дистиляторі, в якій враховано ефективність роботи термоелектричного теплового насосу та фізико-хімічну температурну депресію розчину в процесі дистиляції. На основі попередньо отриманих експериментальних даних було визначено ефективність термоелектричного теплового насосу в залежності від загального температурного перепаду на дистиляторі. Розраховано загальний температурний перепад в залежності від кількості ступенів дистилятора, що дозволило отримати рівняння для визначення ефективності (COP) термоелектричного теплового насосу при різній кількості ступенів дистилятора. Для знаходження залежності впливу концентрації розчину NaCl на фізико-хімічну температурну депресію при вакуумі було використано власні експериментальні дані. Показано, що для отримання 5-7 л/год оптимальна конструкція дистилятора з 5-6 ступенями. Показано, що при зменшенні потужності термоелектричного теплового насосу продуктивність по виробленому дистиляту зменшується, але ефективність системи зростає (зменшуються витрати енергії на отримання 1 кг дистиляту). Наведено спрощення, які були використано при побудові математичної моделі та показано перспективи для майбутніх досліджень.*

**Ключові слова:** дистиляція, регенерація води, термоелектричний тепловий насос, оптимізація, математична модель.

#### Постановка проблеми.

В найближчі роки такі компанії як НАСА, SpaceX, Боїнг, планують довготривалі місії людей на Місяць та Марс. Далекі пілотовані космічні місії не можуть бути реалізовані без використання спеціальних систем регенерації води з різноманітних стічних вод життєдіяльності членів екіпажу [1]. Розробка надійних і ефективних систем реге-

нерації води для пілотованих космічних об'єктів дозволяє істотно знизити витрати на забезпечення космонавтів водою.

Відсутність на пілотованих космічних об'єктах гравітації суттєво ускладнює реалізацію багатьох традиційних для земних умов технологічних процесів, в тому числі процесів дистиляції. З цієї точки зору створення штучної гравітації за

рахунок використання відцентрових сил (відцентрові дистилятори) є перспективним напрямком розробки ефективних систем життєзабезпечення для пілотованих космічних місій [2]. Системи, які базуються на цьому способі, можуть забезпечити регенерацію води з усіх відомих рідких продуктів життєдіяльності космонавтів (сеча, санітарно-гігієнічна вода, конденсат атмосферної вологи) із забезпеченням високої якості отриманого дистиляту.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Технологія відцентрової дистиляції з паровим компресором (VCD) із невисокою швидкістю обертання (до 180 об/хв.) з 2008 року використовується американцями для регенерації води на МКС і є основною в програмі NASA [3-4]. Незважаючи на великий прогрес в розробці і дослідженні VCD в США ця технологія має деякі суттєві недоліки. До них відносяться значний ріст витрати енергії (до 100%) при збільшенні концентрації рідини, що випаровується, невелика продуктивність системи (менше 3 л/год очищеної води), завелика питома вага пристрою (більше 50кг на 1л очищеної води), неможливість функціонування системи при ушкодженні парового компресора, необхідність встановлення допоміжних насосів для забезпечення подачі в систему і циркуляції в ній робочих рідин. В результаті було зроблено висновок про неможливість використання VCD для далеких космічних місій до Місяця та Марсу [5].

Розроблений в КПІ ім. Ігоря Сікорського багатоступеневий відцентровий дистилятор дозволяє отримати близько 7 л/год очищеної води, що дає змогу переробити усі відходи життєдіяльності на борту пілотованого космічного апарата з командою до 7 осіб. Використання термоелектричного теплового насосу в якості джерела теплоти суттєво знижує питоме електроспоживання системи. В результаті питома витрата енергії на виробництво чистої води менше 100 Вт·год/л і на цей показник практично не впливає ступінь концентрування вихідної рідини [6-8]. Для циркуляції рідин не потрібні допоміжні насоси – переміщення рідин в системі, а також відведення продукту (дистиляту) і концентрату відбувається за рахунок використання відцентрових сил.

На сьогоднішній день виготовлено одноступеневий (продуктивність до 1,5 кг/год) [6], триступеневий (до 3,5 кг/год) [7] та п'ятиступеневий (до 7 кг/год) [8] дистилятори. Всі вони здатні ефективно переробляти рідкі відходи життєдіяльності людини, що показано в численних експериментальних роботах.

#### Постановка завдання

На основі раніше отриманих експериментальних даних визначити оптимальну кількість ступенів для відцентрового дистилятора з точки зору мінімальної витрати енергії на процес дистиляції. Розрахунок виконано для випадку дистиляції розчину NaCl.

#### Виклад основного матеріалу досліджень.

Система регенерації води, розроблена в «КПІ ім. Ігоря Сікорського» з використанням відцентрового вакуумного дистилятора (ВВД) в поєднанні з термоелектричним тепловим насосом (ТТН) представлена на рис. 1. У системі використовується багатоступінчастий відцентровий дистилятор (частота обертів  $600 \div 1200$  об/хв).

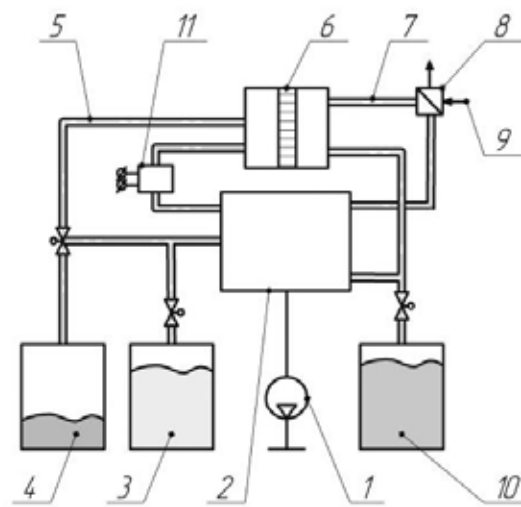


Рис. 1. Принципова схема системи вилучення води з рідких відходів ВВД: 1 – вакуум-насос; 2 – дистилятор; 3 – ємність вихідної рідини; 4 – ємність концентрату; 5 – «гарячий» контур; 6 – термоелектричний тепловий насос; 7 – «холодний» контур; 8 – балансуєчий охолоджувач; 9 – подача охолоджуючої рідини; 10 – збірник продукту-дистиляту; 11 – резервний підігрівач

Робочий розчин надходить з ємності 3 у вакуумований ротор, що обертається, за допомогою вакуум-насоса 1, заповнює до необхідного рівня ступені випаровування відцентрового дистилятора 2, гарячий контур 5 і гарячу сторону термоелектричної батареї 6. Холодна сторона термоелектричної батареї з'єднується з кінцевим конденсатором дистилятора за допомогою контуру 7 («холодний» контур). Відведення надлишкового тепла із системи здійснюється за допомогою холодильника 8. Дистилят-продукт, як результат випарно-конденсаційного процесу, відкачується в ємність 10, а концентрат – в ємність 4. При виході з ладу ТТН, система зможе працювати

зі зниженою ефективністю при підігріві рідини в гарячому контурі за допомогою підігрівача 11. Дистилятор виконаний багатоступінчастим з поверхнями теплопередачі, що обертаються. Вони розділяють розчин і конденсат. Ряд вбудованих насосів (на основі трубок Піто) забезпечує зрошення теплообмінних поверхонь у кожному ступені дистилятора. Стічні води послідовно проходять через кожну з ступенів випаровування.

Кінцевий ступінь випаровування є ступенем миттєвого закипання перегрітого розчину, який перегрівається на гарячій стороні ТТН. Отримана в цьому ступені пара є гріючою у попередньому ступені дистилятора. Дистилят з кожного ступеня та пара ступеня випаровування з найнижчим тиском надходять у кінцевий конденсатор, що охолоджується дистилятом, який циркулює по контуру: кінцевий конденсатор – холодна сторона ТТН – кінцевий конденсатор.

Надлишковий дистилят відкачується з апарата трубкою Піто. Після досягнення в гарячому контурі максимальної (розрахункової) концентрації залишку, що не випарувався, його витісняють із зовнішньої частини гарячого контуру в окремий резервуар свіжим розчином, і система може почати новий цикл.

Відцентрові сили, що виникають при обертанні ротора дистилятора, забезпечують транспортування всіх рідин у системі та роботу дистилятора при зниженій гравітації без застосування зовнішніх насосів.

#### Розрахункові формули

Оптимальне число ступенів багатоступінчастого відцентрового дистилятора для роботи в комплексі з ТТН на борту пілотованого космічного апарата можна отримати наступним чином.

Ефективність роботи теплового насосу:

$$COP_{ТТН} = \frac{Q_1}{N_{ТТН}}$$

де:  $Q_1$  – кількість теплоти, що підведена в першу ступінь дистилятора;

$N_{ТТН}$  – електрична потужність ТТН.

Питома витрата енергії в системі багатоступінчастого відцентрового дистилятора в комплексі з ТТН визначається формулою

$$\eta = \frac{G_d}{N_{ТТН} + N_D}, \quad (1)$$

де  $N_D$  – електрична потужність приводу дистилятора;

$G_d$  – продуктивність дистилятора по дистиляту.

Продуктивність дистилятора визначається по формулі:

$$G_d = \frac{\sum Q}{r} = \frac{n \cdot Q_1}{r} = \frac{N_{ТТН} \cdot COP_{ТТН} \cdot n}{r}, \quad (2)$$

де  $n$  – число ступенів;

$r$  – середня теплота фазового переходу води в ступенях випаровування багатоступінчастого дистилятора.

Таким чином (без врахування  $N_D$ ) можна записати:

$$\eta = \frac{N_{ТТН} \cdot COP_{ТТН} \cdot n}{(N_{ТТН} + N_D)r} \approx \frac{COP_{ТТН} \cdot n}{r}, \quad (3)$$

З цієї формули видно, що вигідно збільшувати кількість ступенів  $n$ . Проте збільшення кількості ступенів в дистиляторі веде до росту сумарного температурного перепаду в ньому:

$$\Delta t = t_{ex} - t_{вих}$$

де  $t_{ex}$  – температура розчину на вході в дистилятор;

$t_{вих}$  – температура дистиляту на виході з дистилятора.

В свою чергу зростання загального температурного перепаду призводить до зниження коефіцієнта ефективності ТТН (див рис. 2). Тобто повинна бути оптимальна кількість ступенів для максимальної ефективності роботи відцентрового дистилятора.

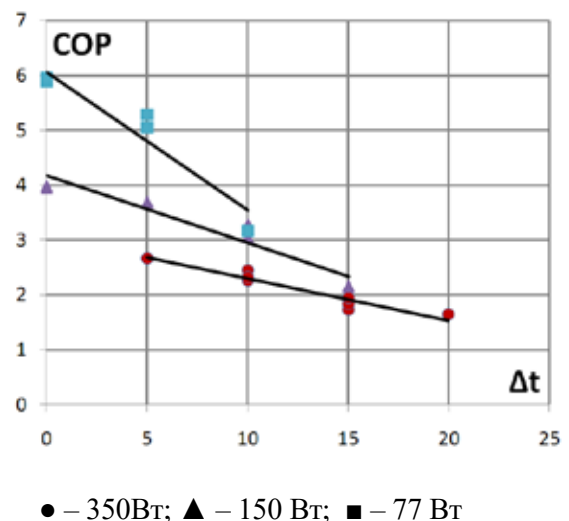


Рис. 2. Вплив різниці температур та електричної потужності ТТН на COP (витрата води в обох контурах 160 кг/год) [9]

Таким чином, для розрахунку ефективності потрібно знати загальний перепад температур в апараті в залежності від кількості ступенів.

**Визначення температурного перепаду у відцентровому дистиляторі**



Очевидно, що загальний температурний перепад у відцентровому дистиляторі є сумою температурних перепадів на кожній ступені:

$$\Delta t = \sum \Delta t_i = \Delta t_1 + \Delta t_2 + \dots + \Delta t_i \quad (4)$$

Перепад температури в одній ступені з урахуванням фізико-хімічної температурної депресії можна записати як:

$$\Delta t_i = (Q_i / KF) + \Delta t_{depr} \quad (5)$$

де:  $Q_i / KF$  – температурний перепад на теплообмінній поверхні, за експериментальними даними  $\approx 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$  [10];

$\Delta t_{depr}$  – фізико-хімічна температурна депресія.

Фізико-хімічну температурну депресію було визначено експериментально в роботах [6, 10], див. рис. 3.

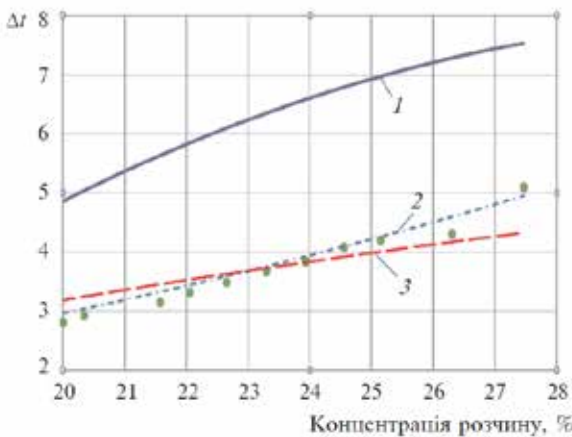


Рис. 3. Вплив концентрації розчину NaCl на фізико-хімічну температурну депресію: 1 – фізико-хімічна температурна депресія за атмосферного тиску; 2, 3 – фізико-хімічна температурна депресія за температури 40 °С, розрахована по [11] і [12]; • – експеримент.

**Розрахунок оптимальної кількості ступенів**

Крім розглянутої вище різниці температур в багатоступеневому дистиляторі існують і інші фактори, які впливають на його ефективність: теплові втрати та перетоки теплоти; витрати теплоти на догрівання свіжого розчину до температури насичення в ступені випаровування, в яку він подається; догрівання розчину, який перетікає з ступені з меншим тиском до ступені з більшим тиском та ін. Це призводить до зменшення кількості теплоти, яка іде на випаровування розчину при переході від ступені з більшим тиском до ступені з меншим тиском. З експериментальних даних [10] можна орієнтовно прийняти, що

$$Q_i = 0,95^{i-1} \cdot Q_1 \quad (6)$$

де  $Q_i$  – витрати теплоти на випаровування в  $i$ -тій ступені.

Враховуючи наведені припущення, за допомогою формул 1-6 було побудовано розрахункову модель та визначено ефективність дистилятора при його роботі на розчині NaCl для трьох різних потужностей теплового насоса (див. рис. 4). Було прийнято, що дистилятор працює в стаціонарному режимі, концентрація розчину в останній ступені випаровування для всіх випадків дорівнює 27%, а свіжий розчин має початкову концентрацію 3%

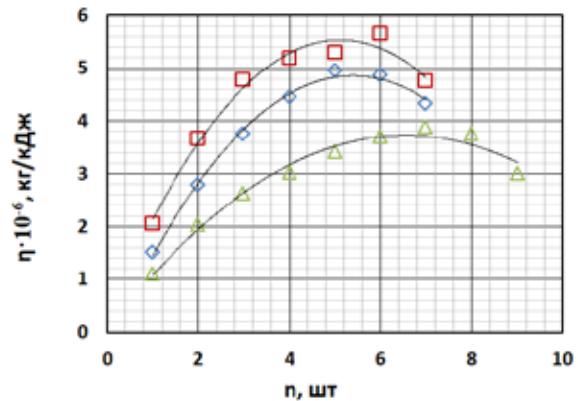


Рис. 4. Ефективність роботи дистилятора в залежності від кількості ступенів. Потужність теплового насоса: ▲ – 350Вт; ◆ – 150 Вт; ■ – 77 Вт

Як видно з рис. 4 оптимум по ефективності роботи дистиляційної системи залежить від потужності теплового насоса. Чим менша потужність теплового насоса, тим більш ефективно працює дистилятор, тобто менші затрати енергії на виробництво дистиляту. При цьому для потужності 77 Вт і 150 Вт максимум ефективності система досягає коли дистилятор має 5 ступенів. Для потужності 350 Вт цей максимум знаходиться, коли дистилятор має 7 ступенів. Це відбувається з тієї причини, що, як видно з рис. 2, чим менша потужність ТТН, тим більш суттєвим є вплив різниці температур на його COP. Для потужності 350 Вт залежність  $COP = f(\Delta t)$  має найбільш пологої характеристику, в результаті зростання загальної різниці температур внаслідок збільшення кількості ступенів не так сильно погіршує ефективність систем. Тому для цього випадку оптимальна кількість ступенів більше, ніж для меншої потужності ТТН.

**Висновки.**

В класичній багатоступеневій системі дистиляції (випарній системі) додавання кожного наступного ступеня підвищує ефективність установки. В резуль-

таті вибір оптимальної кількості ступенів здійснюється на основі техніко-економічного розрахунку.

Для системи дистиляції, в якій в якості джерела теплоти використовується термоелектричний тепловий насос ситуація кардинально змінюється. Як і для будь-якого теплового насоса, COP ТТН в першу чергу залежить від загального температурного перепаду між гарячою і холодною сторонами. Додавання кожної наступної ступені призводить до зростання цього температурного перепаду  $\Delta t$ . Проведений аналіз дозволив оцінити оптимальну кількість ступенів для системи багатоступінчастої дистиляції в комплексі з ТТН. При продуктивності системи по дистиляту  $G_d = 3 \dots 5$

л/год оптимальне число становить 5 ступенів. За необхідності збільшення продуктивності до  $G_d = 7$  л/год необхідно збільшити потужність ТТН і оптимальна кількість зростає до 7 ступенів.

Необхідно відмітити, що аналіз був проведений з деякими спрощеннями, зокрема не враховувалася необхідна потужність на привод ротора дистилятора. Зі збільшенням числа ступенів в дистиляторі збільшується кількість занурених у рідину черпакових насосів, отже, збільшується і потужність на привод дистилятора. В наступних роботах планується доповнити систему рівнянь, щоб при визначенні ефективності системи врахувати затрачену роботу на привод дистилятора.

#### Список літератури:

1. H. W. Jones. Should Oxygen, Hydrogen, and Water on the Moon Be Provided by Earth Supply, Life Support Recycling, or Regolith Mining? 50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-147
2. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, В.Г. Петренко. Центробежные дистиляторы в системах жизнеобеспечения пилотируемых космических объектов // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – № 5(149). – с. 28-35.
3. P. Wieland, C. Hutchens, D. Long, B. Salyer. Final Report on Life Testing of the Vapor Compression Distillation/Urine Processing Assembly (VCD/UPA) at the Marshall Space Flight Center (1993 to 1997). August 1998
4. L. Carter, J. Williamson, C.A. Brown, J. Bazley, D. Gazda, R. Schaezler, F. Thomas, S. Molina. Status of ISS Water Management and Recovery. 49th International Conference on Environmental Systems, 7-11 July 2019, Boston, Massachusetts. ICES 2019-36.
5. L. K. Kelsey, S.P. Boyce, G. Speight, P. Pasadilla, P. Tewes, E. Rabel, C. Meyer. Closing the Water Loop for Exploration: 2020-2021 Status of the Brine Processor Assembly. 50th International Conference on Environmental Systems, 12-15 July 2021. ICES-2021-428.
6. A.S. Solomakha, V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Petrenko, M. Yaroshevych. Centrifugal flash distiller for life support system. 72st International Astronautical Congress (IAC), Dubai, United Arab Emirates, 25-29 October 2021. IAC-20- A1,IP,6,x66795. 7 pages.
7. V.G. Rifert, P.A. Barabash, V. Usenko, A.S. Solomakha, L.I. Anatychuk, A.V. Prybyla. Improvement the cascade distillation system for long-term space flights. 68th International Astronautical Congress (IAC), Adelaide, Australia, 25-29 September 2017. IAC-17-A1.IP.25.
8. В.Г. Ріферт, Л.І. Анатичук, П.О. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, А.В. Прибыла, В.Г. Петренко, В.В. Середя Порівняльний аналіз методів термічної дистиляції з тепловими насосами для тривалих космічних польотів // Термоелектрика. – 2019. – № 4. – с. 5 – 18.
9. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.І. Усенко, В.Г. Петренко, В.П. Боянівський. Влияние режимных параметров на эффективность работы термоэлектрического теплового насоса ALTEC-7005 // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2018. – № 4. – с. 29-33.
10. П.А. Барабаш, А.С. Соломаха, В.Г. Ріферт, В.Г. Петренко, В.І. Усенко, В.П. Боянівський. Кристалізація розчину NaCl у вакуумному відцентровому плівковому дистиляторі // Наукові вісті КПП. – 2019. – № 4. – с. 77-82.
11. Б.П. Никольский. Справочник химика, 2 изд. Москва, Химия, 1986.
12. И.И. Черныльский. Машины и аппараты химических производств, 3 изд. Москва, Машиностроение, 1974.

**Solomakha A.S., Barabash P.O., Yaroshevych M.V. DETERMINATION OF THE OPTIMAL NUMBER OF STAGES FOR A DISTILLATION SYSTEM WITH A THERMOELECTRIC HEAT PUMP**

*Existing and perspective technologies for water regeneration for deep space missions are briefly analyzed. The shortcomings of the centrifugal vacuum distiller currently installed at the International Space Station are shown. The design of this distiller does not allow it to be used for deep space missions. It is shown that developed in Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute centrifugal distillers with thermoelectric heat pump (as a heat source) could remove these shortcomings. The schematic diagram of such a centrifugal distiller is described and the principle of its operation is considered. A mathematical model for determining the optimal number of stages in a multistage distiller is made, which takes into account the efficiency of the thermoelectric heat pump and temperature depression of the solution during distillation. Based on previously obtained experimental data, the efficiency of the thermoelectric heat pump depending on the total temperature difference on the distiller was determined. The total temperature difference depending on the number of stages of the distiller was calculated, which allowed to obtain the equation for determining the efficiency (COP) of thermoelectric heat pump with different number of stages of the distiller. To find the dependence of the effect of NaCl solution concentration on the temperature depression under vacuum, we used our own experimental data. It is shown that to obtain 5-7 liters /h the optimal design of the distiller with 5-6 stages. It is shown that when the power of a thermoelectric heat pump decreases, the productivity of the produced distillate decreases, but the efficiency of the system increases (energy consumption for 1 kg of distillate decreases). The simplifications that were used in the mathematical model are presented and the prospects for future research are shown.*

**Key words:** *distillation, water regeneration, thermoelectric heat pump, optimization, mathematical model.*

**Тарасов Д.О.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## РОЗРОБЛЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СХЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ГРУПИ ПІДІГРІВАЧІВ НИЗЬКОГО ТИСКУ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

*В атомних електростанціях (АЕС) значна увага приділяється запитанням безпеки та якості роботи, надійності головного устаткування. Щоб збільшити якість цих запитань застосовують автоматизацію технологічних процесів. Стаття присвячена розробці функціональної схеми автоматизації (ФСА).*

*У статті розкрито, що ФСА є важливим технічним документом у сучасному світовому інжинірингу, наприклад для створення автоматичних систем керування. Визначено, що при реалізації ФСА створюється декілька завдань для здобуття інформації про положення всіх основних величин технічного процесу і обладнання; безпосереднього впливу на технічний процес щоб керувати ним; стабілізації технічних параметрів процесу; контролю та реєстрації технічних параметрів процесів й стану технічного обладнання. Вказанні завдання вирішуються за рахунок аналізу умов праці технічного обладнання, знаходження законів і критеріїв керування об'єктом, а також вимог, що виставляються до точної стабілізації, контролю і реєстрації технічних параметрів, і до якості керування та надійності. З'ясовано що підтримання необхідного рівню конденсата у підігрівачах низького тиску (ПНТ) є основною частиною автоматичної праці атомної електростанції з реакторним блоком типу ВВЕР 1000. Будь-який технологічний об'єкт в обов'язковому порядку треба контролювати. Для контролю основних параметрів важливу роль грає правильність вибирання засобів вимірювальної техніки, методів виміру технологічних змінних. Актуальність статті полягає у тому, що при підвищенні рівню конденсата від нормальної величини, поверхні теплообміну можуть бути затопленими, також може відбутися потрапляння мікро-крапель води у турбіну; при пониженні рівня конденсат потрапляє до конденсаційних насосів і призводить до кавітації. Через це з'явилася необхідність синтезу і аналізу автоматичної системи керування рівнем конденсату у групі підігрівачів низького тиску, ключовою визначальною частиною якої є відповідна функціональна схема автоматизації.*

**Ключові слова:** автоматизована система регулювання, підігрівач низького тиску, атомна електростанція, автоматизація, функціональна схема автоматизації.

**Постановка проблеми.** Проблеми безпеки, надійності, доброякісності роботи головного устаткування дуже гостро стоять в атомних електростанціях. Найпоширенішим методом вирішення цих є автоматизація технічних процесів, у тому числі керування рівнем конденсату у групі підігрівачів низького тиску.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В дослідженні [1, с. 205–212] відображено алгоритм відтворення нерозбіжних рішаючих правил необхідних для того щоб можна було вибрати раціональну альтернативу з тих функціонуючих схем систем автоматизації що є і з застосуванням теорії нечіткої логіки та приближених множин. Завдяки можливостям алгоритму застосовувати багатокритеріальну оцінку складних варіантів схем досягається велике збільшення тимчасової важкості порівняно з оцінками одно-контурних схем. Сформульовані запитання до початко-

вих множин функціонуючих схем з прийнятими до уваги особливостями частин їх ланцюгів та кругу використання. Виконання алгоритму допомагає спросити розроблення автоматизованих схем технічних об'єктів та покращити якість розробки їх проєктованих вирішень. Головним етапом розробки автоматичної системи керування яким-завгодно технічним процесом є розроблення ФСА.

**Постановка завдання.** Мета – розробити та дослідити функціональну схему автоматизації групи підігрівачів низького тиску в реакторі типу ВВЕР 100.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** По-перше розглянемо вимірюючі прилади для контролювання рівнем конденсату у групі ПНТ атомної електростанції.

Гарантія безпеки, якості роботи, й економічного технічного процесу може бути тільки

якщо усі параметри, що відображають стан електростанції, перебувають в строго заданих границях. При виході за границі відбувається зменшення економності, а у разі безконтрольного зросту відхилень може відбутися аварійна зупинка, чи навіть знищення технічного об'єкта. Потрібно без зупинки слідкувати за цими величинами та подавати такі управляючі сигнали на технічний процес, щоб дотримуватись їхніх необхідних значень.

Нагрівачі низького тиску призначені для нагрівання живильної води у системах регенерації стаціонарних парових турбін теплових електростанцій [4].

Ми будемо виконувати схему нагрівача низького тиску, використовуюваного на АЕС ВВЕР-1000 з реактором.

Для успішного виконання завдання нагрівання живильної води групи нагрівачів АЕС низького тиску з реактором ВВЕР 1000 вимірюються такі параметри, як:

- рівень конденсації поверхневих нагрівачів;
- тиск нагрівального пари всередині нагрівачів;
- тиск поживної води до та після груп ПНТ;
- температура поживної води наближається і на виході з обігрівачів;
- Температура пари всередині паркану до нагрівача [4].

Використовується для вимірювання:

- надання інформації (БШУ);
- створення команд у схемах автоматичного управління;
- створення сигналів аварійного захисту обігрівачів;
- формування сигналу в сигнальних ланцюгах;
- формування завдань у ключових схемах [4].

Передача інформації з технологічного об'єкта оператору здійснюється так:

Вибраний пристрій знаходиться в безпосередньому контакті з робочим середовищем і знаходиться на основному обладнанні:

- штуцер;
- бабіни для встановлення термометра на технічне обладнання;
- трубні дроти.

Трубні кабелі це набір труб і трубних кабелів, підключених до з'єднувальних пристроїв.

Відповідно до функціонального призначення трубні кабелі поділяються на:

- Імпульсні лінії зв'язку;
- основні лінії зв'язку.

Імпульсні лінії зв'язку служать для підключення вибраних пристроїв до вимірювальних при-

ладів, перетворювачів або регуляторів [3, с. 704]. Вони необхідні для передачі впливу вимірюваного або регульованого середовища на чутливі елементи вимірювальних приладів та автоматизації.

Основні лінії зв'язку використовуються для підключення різних функціональних блоків пристроїв автоматизації (датчиків, перемикачів, перетворювачів, виконавчих команд) та передачі командних сигналів (тиску, температури, рівня) від передавальних блоків до блоків приймання [4].

Інформація з вимірювальних приладів передається до автоматизованої системи управління технологічними процесами (далі – АСУ ТП).

Зміст інформаційних функцій АСУ ТП полягає у зборі, обробці та наданні та реєстрації інформації оперативному персоналу про стан технологічного об'єкта.

Моніторинг та вимірювання параметрів процесу полягає у перетворенні значень параметрів об'єкта (рівня, тиску, температури, витрати) на сигнали, необхідні для виявлення персоналом або подальшої автоматичної обробки.

Облік даних здійснюється для подальшого аналізу функціонування технологічного об'єкта. Запис здійснюється в пам'яті комп'ютера, а також на носії комп'ютера [4].

Технічна (попереджувальна) сигналізація здійснюється за рахунок передачі світлових та звукових сигналів та привертає увагу персоналу до порушень технологічного процесу, вираженим відхиленням параметрів у межах допустимих меж.

На кожен параметр є індивідуальний сигнал тривоги, на який реагує сигнальний пристрій, оснащений написом, що вказує на збудження; групову, на яку з'являється світловий сигнал, коли один із заданих параметрів відхиляється.

Відображення положення стопорних органів та механізмів (насосів) здійснюється за допомогою різнокольорових сигналів, що відповідають певним умовам клямок та насосів. Розрізняють індивідуальний стан сигналізації, у якому всі органи чи механізми реагують на свій сигнал, і груповий сигнал, у якому сигнал повідомляє про стан органів та групи механізмів.

З метою забезпечення рівномірного підведення пари до трубного пучку на корпусі кожного апарату встановлений кільцевої короб (зовнішній кожух), з якого пар через отвори у внутрішній обичайці по колу подається в кільцевий зазор між трубною системою і корпусом. Для організації спрямованого руху пара в трубному пучку, остан-

ній на  $\frac{3}{4}$  довжини окружності по всій висоті укладений в кожух.

Пар, що підігріває подається в трубку систему ПНТ по всій її висоті з боку першого ходу основного конденсату і рухається паралельними потоками в сторону пристрою відсмоктування газів, що поперечно омиває трубний пучок.

Підведення і відведення основного конденсату виконані в нижній частині підігрівача. Підведення пара і відведення дренажу пари, що підігріває – в бічний.

Основними вузлами підігрівача є корпус, трубний пучок, знімна кришка, розподільна і перепускна камери, які мають фланцеві роз'єми з мембранним ущільненням. Ущільнення фланцевого роз'єму забезпечується шпильками і обваркой мембран.

Корпус підігрівача складається з кришки, що знімається (циліндрична обичайка, штамповані днище і фланець) і нерухомої частини (внутрішньої і зовнішньої обичайок, фланця). На кришці є лазів люк і штуцер для випуску повітря з міжтрубного простору при заповненні підігрівача водою.

На нерухомій частині корпусу є патрубок підведення пари, що гріє і штуцери приєднання конт-

рольно-вимірювальних приладів, а також вантажні штуцери для підйому корпусу і всього апарату.

Трубний пучок підігрівача являє собою єдиний конструктивний вузол, що складається з каркаса (двох трубних дошок, центральної труби діаметром 219x20, перегородок службовців для дистанціювання теплообмінних труб) і теплообмінних трубок діаметром 16x1 з нержавіючого металу. Закріплення трубок в трубних решітках здійснюється розвальцюванням.

При використанні поверхневих ПНТ і ПВТ продукти корозії, що утворюються в конденсаційно-живильному тракті, можуть відкладатися на поверхнях теплообміну в парогенераторах двоконтурних АЕС і реакторах одноконтурних АЕС. При цьому є вірогідність погіршення тепловідведення і економічності та відповідно надійності роботи АЕС. У зв'язку з цим для теплообмінних поверхонь ПНТ використовують матеріали, що володіють високу корозійну стійкість. До їх числа відносяться латуні і нержавіючі сталі.

На обичайці нижньої камери (приварена до нижньої трубної дошки) розташований патрубок відводу дренажу пари, що підігріває шту-

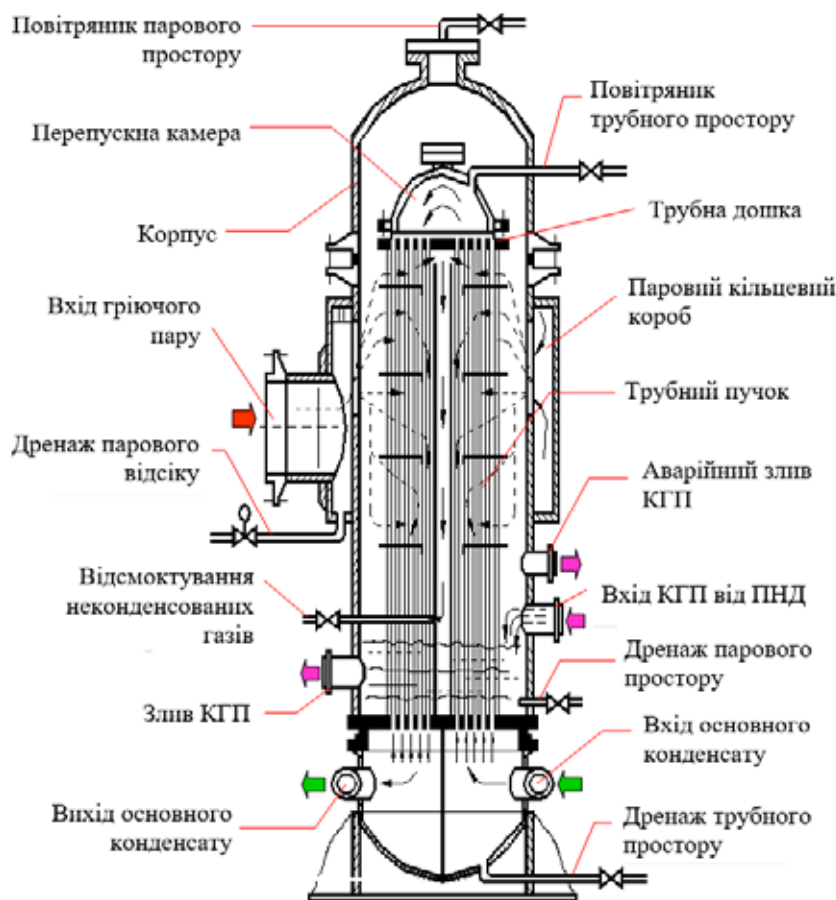


Рис. 1. Блок-схема нагрівача низького тиску

цери приєднання водовказівного приладу, контрольно-вимірювальних приладів, а також штуцери видалення газів, і дренажу міжтрубного простору.

Для можливості огляду вальцювальних з'єднань і глушіння труб в разі виходу їх з ладу без розбирання основного фланцевого роз'єму, конструкцією апаратів передбачені люки в нижній і верхній водяних камерах.

Основний контроль та управління теплотехнічних процесів блоку АЕС із реактором ВВЕР-1000 здійснюється на щиті блоку управління (БЦУ).

Контроль та управління системами регенерації низького тиску забезпечується за всіх умов експлуатації системи.

Для моніторингу обладнання при роботі силового агрегату на деталі РМОТ відображається необхідна інформація про основні технологічні параметри.

**Вимірювання рівня в підігрівачах.** Контроль рівня води (конденсату) в підігрівачах низького тиску (ПНТ) має важливе значення для забезпечення нормальної експлуатації. Для вимірювання рівня в підігрівачах можуть бути використані дифманометри, постачені перетворювачами з вихідним електричним сигналом типу ДМ і ін. Вторинні показують прилади до них повинні бути забезпечені контактним пристроєм для сигналізації підвищення рівня в ПНТ. Для контролю рівня в підігрівачах також можуть бути використані дифманометри, постачені відліковим і контактним пристроями.

Для приєднання дифманометрів до підігрівників застосовують зазвичай однокамерні зрівняльні судини. Як приклад на рисунку 2 показана схема вимірювання рівня конденсату пари, що гріє в ПНТ.

Використовується для вимірювання рівня в обігрівачі, створення команд у схемах блокування, регуляторах, відображення та запису параметрів в УВС. Для відображення рівня

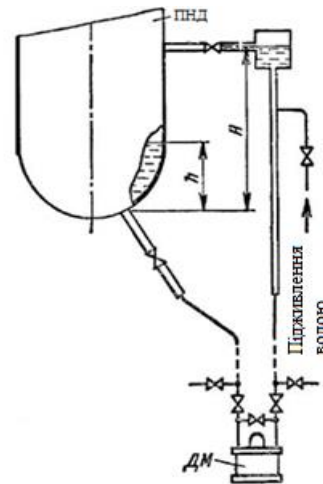


Рис. 2. Схема вимірювання рівня конденсату в ПНТ

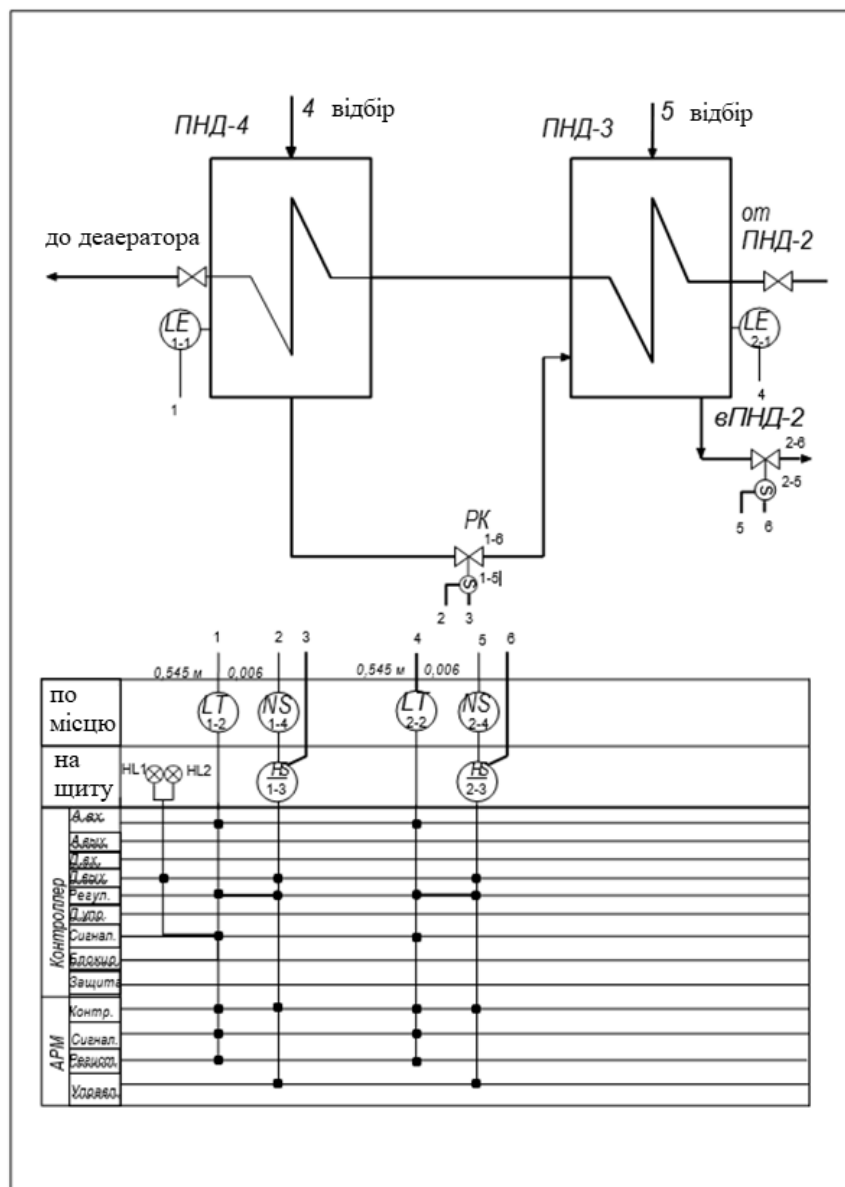


Рис. 3. Функціональна схема автоматизації групи ПНТ АЕС



нагрівача використовуються гідростатичні форми і однорідної прямої дії, що містяться безпосередньо в ПВТ.

На рис. 3 зображена ФСА групи ПНТ АЕС із реакторами типу ВВЕР-1000.

Символи на схемі відповідають ГОСТ 21.208-2013. На графічній частині схеми показаний технічний процес, тобто підігрів води у другому контурі групи ПНТ. Список основних елементів ФСА:

LE – датчик рівню конденсації.

LT – перетворювач сигналу від датка LE до контролеру в діапазоні 4 – 20 мА.

HS – реле, що подає напругу на привод, який відповідає за рух клапана.

CP – клапан, що контролює злив конденсату з ПНТ.

**Висновки.** Таким чином оскільки розробка ФСА є одним із ключових етапів розробки автоматичної системи керування будь-яким технічним процесом, у статті було розроблено ФСА для групи нагрівачів низького тиску АЕС з реакторами ВВЕР-1000.

Дана схема функціональної автоматизації передбачає наступні етапи розробки системи автоматичного контролю рівня конденсації нагрівачів низького тиску: вибір приладів автоматизації, розробка електричної схеми, розробка математичної моделі, написання програми автоматичного керування.

#### Список літератури:

1. Филатова Н.Н., Требухин А.Г. Генерация решающих правил для проектирования функциональных схем автоматизации. Известия ЮФУ. Технические науки. 2012. С. 206–211.
2. Преображенский В.П. Теплотехнічні виміри і прилади : підручник. Москва : «Енергія», 1978. 704 с.
3. ГОСТ 21.404-85. Автоматизація технологічних процесів. Умовні позначення приладів і засобів автоматизації в схемах. – М.: Вид-во стандартів, 1985. – 16 с.
4. Плохотнюк М.О. Пелих С.М. Розробка функціональної схеми автоматизації групи підігрівачів низького тиску атомної електростанції. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021. Том 32 (71) Ч. 1. № 1. С. 146.

#### **Tarasov D.O. DEVELOPMENT AND RESEARCH OF THE FUNCTIONAL SCHEME OF AUTOMATION OF THE GROUP OF LOW PRESSURE HEATERS OF A NUCLEAR POWER PLANT**

*In nuclear power plants (NPPs) much attention is paid to safety and quality of work, reliability of the main equipment. To increase the quality of these issues, automation of technological processes is used. The article is devoted to the development of a functional automation scheme (FSA).*

*The article reveals that the FSA is an important technical document in modern world engineering, for example for the creation of automatic control systems. It is determined that the implementation of the FSA creates several tasks to obtain information about the provisions of all major values of the technical process and equipment; direct influence on the technical process to manage it; stabilization of technical parameters of the process; control and registration of technical parameters of processes and a condition of the technical equipment. These tasks are solved by analyzing the working conditions of technical equipment, finding laws and criteria for facility management, as well as the requirements for accurate stabilization, control and registration of technical parameters, and the quality of management and reliability. It has been found that maintaining the required level of condensate in low-pressure heaters (LVPs) is a major part of the automatic operation of a nuclear power plant with a WWER 1000 reactor unit. Any process facility must be monitored. To control the basic parameters, the correctness of the choice of measuring instruments, methods of measuring technological variables plays an important role. The relevance of the article is that when the level of condensate increases from the normal value, the heat transfer surfaces may be flooded, and micro-drops of water may also enter the turbine; when the level decreases, the condensate enters the condensing pumps and leads to cavitation. This necessitated the synthesis and analysis of an automatic condensate level control system in the group of low-pressure heaters, the key defining part of which is the corresponding functional scheme of automation.*

**Key words:** *automated control system, low pressure heater, nuclear power plant, automation, functional diagram of automation.*

## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.235.5: 622.271

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/24>**Коновал В.М.**

Черкаський держаний технологічний університет

### ОЦІНКА ХАРАКТЕРУ РУЙНУВАННЯ ТВЕРДОГО СЕРЕДОВИЩА ЗАРЯДАМИ ВР ЗМІННОЇ ФОРМИ ПОПЕРЕЧНОГО ПЕРЕРІЗУ ЗА РІЗНИМИ УМОВАМИ ПЕРЕДАЧІ ЕНЕРГІЇ ВИБУХУ

У дослідженні з метою обґрунтування нової конструкції заряду змінної форми поперечного перерізу: циліндричної, у вигляді призми – трикутної і квадратної форми перерізу було проведено експерименти на структурно-однорідних піщано-цементних моделях кубічної форми з ребром 150 мм шляхом порівняння результатів їх руйнуючої дії та чисельних показників амплітуди напружень в хвилі стискання під час вибуху однакових по масі зарядів ВР. Під час виготовлення моделей в металевій формі за допомогою вставок по її осі на глибину 85 мм формували циліндричні порожнини діаметром 10 мм для розміщення в них зарядів ВР циліндричної та у вигляді трикутної і квадратної призми, а також встановлювали п'єзоелектричні датчики на глибину 75 мм від верхньої межі моделі і на відстані від осі заряду 45 мм. Оцінку фізико-механічних властивостей руйнуючого середовища проводили на моделях кубічної форми з розміром ребра  $40 \pm 2$  мм відповідно до чинних Держстандартів. Заряди ВР різних конструкцій формувались в підготовлених паперових патронах, зовнішній діаметр яких становив 0,95 діаметру зарядної порожнини. В якості ВР при руйнуванні моделей використовували промислове ВР типу Комполайн масою 2,0 г або відрізки детонуючого шнура (ДШ) для всіх серій експериментів. Підриг зарядів здійснювали відрізками ДШ довжиною 0,8 м, з'єднані в ланцюг з капсулем-детонатором або хвилеводом неелектричної системи ініціювання – НСІ типу NONEL або Прима ЕРА і вибуховим пристроєм конденсаторним ПІВ100. Експерименти проводились в полігонних умовах кар'єру «Сівач» Корсунь-Шевченківського РУ. Оцінку характеру руйнування моделей проводили методом ситового аналізу за даними яких будували залежності розподілу гранулометричного складу. Результати експериментів показали, що зниження пікового тиску продуктів детонації (ПД) на руйнуюче середовище (модель) досягається за рахунок передачі вибухового імпульсу на поверхню зарядної порожнини в кути профілю заряду, як квадратної так трикутної форми з формуванням різноградієнтних полів напружень в цих зонах.

**Ключові слова:** модель, заряд вибухової речовини, вибух, амплітуда напружень, різноградієнтне навантаження.

**Постановка проблеми.** Процеси гірничого виробництва за технологічною ознакою можна розділити на три основні групи: підготовка гірничої маси до виїмки, виїмково-навантажувальні та транспортні роботи, а також переробка корисних копалин (механічне дроблення, подрібнення та збагачення).

Першим і, в основному, визначальним процесом, що впливає на ефективність екскавації, транспортування та переробки корисних копалин, є буропідригні роботи. При цьому бурові роботи відносяться до найбільш консервативних, що визначено типом існуючих бурових верстатів, і відповідним діаметром свердловин на кар'єрах, як правило, їх не змінюють протягом усього тер-

міну експлуатації родовища. Разом з тим, для управління енергією вибуху та забезпечення якісного дроблення гірських порід діаметр заряду (свердловини) має велике значення. Таким чином, рівень підготовки гірничої маси при існуючому буровому обладнанні, з урахуванням властивостей порід, що руйнуються (міцності та їх структурних особливостей) залежить, перш за все, від ефективності вибухових робіт. Вони включають широкий комплекс засобів і технологічних операцій, а саме: вибір типу вибухових речовин (ВР) та засобів ініціювання, діаметр і конструкцію свердловинного заряду ВР, схеми ініціювання, що обумовлюють взаємодію окремих зарядів ВР та їх груп, умови підригання (рівень обводненості

масиву порід, наявність підпірної стінки), тип застосовуваної набивки.

Тому вибір і обґрунтування удосконалених конструкцій свердловинного заряду є однією із умов створення сучасних ресурсозберігаючих вибухових технологій руйнування гірських порід складної будови на кар'єрах рудних і нерудних корисних копалин.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Як відомо, значна частина енергії вибуху витрачається в зоні, що безпосередньо примикає до зарядної порожнини (зазвичай 2-3 радіусу заряду), де відбувається перездрібнення твердого середовища, що веде до втрат корисної копалини на кар'єрах будівельних матеріалів.

Регулювання величини питомої енергії вибуху при руйнуванні гірських порід, як доведено у роботі Єфремова Э.И. [1], можливо різними шляхами. Зокрема, це досягається за рахунок зміни площі безпосереднього контакту свердловинного заряду вибухових речовин (далі – ВР) з породою, що руйнується, або створення умов, що забезпечують зниженню динамічного впливу вибуху на поверхню зарядної порожнини [1-3].

Для ефективного управління дією вибуху необхідно враховувати, що межа міцності гірських порід на розтягання і зрушення приблизно в 10 разів менше за межу міцності гірських порід на стискання. А оскільки енергоємність руйнування твердих середовищ пропорційна квадрату їх межі міцності при конкретному виду навантаження, то енергоємність руйнування твердих середовищ розтягуючими зусиллями в 100 разів менша за енергоємність руйнування при дії стискаючих напружень. При цьому корисна дія вибуху циліндричних зарядів при руйнуванні гірських порід може бути підвищена шляхом регулювання величини питомої енергії ВР за його довжиною у поєднанні зі збільшенням ролі розтягуючих напружень в твердому середовищі, що руйнується при використанні подовжених комбінованих зарядів: розосереджених інертними, повітряними та водними проміжками, змінного діаметру по висоті колонки та різної форми поперечного перерізу.

З вище сказаного існує низка способів формування свердловинних зарядів, як по його довжині, так і у поперечному перерізу. Зокрема, це:

– формування по висоті зарядної порожнини суцільної конструкції свердловинних зарядів ВР [4];

– створення у пробурених циліндричних порожнинах розширених ділянок діаметром більшим за діаметр первинної порожнини [5-6];

– розташування всередині зарядної порожнини суцільної колонки ВР в поліетиленових оболонках змінного діаметру, у формі конуса які поступово зменшуються в діаметрі до гирла свердловини і з різною конфігурацією поперечного перерізу [7-8];

– розташування всередині зарядних порожнин порожнистих та іншої форми фігур з інертних матеріалів [9-10].

– застосування свердловинних зарядів, розосереджених повітряним проміжком [11-13].

Найбільшого поширення при відбійці гірських порід на кар'єрах набули свердловинні заряди ВР суцільної конструкції, що пояснюється спрощенням операцій під час їх формування. Основний недолік суцільного свердловинного заряду полягає в тому, що при вибуху такого заряду руйнування породи відбувається безпосередньо при контакті з зарядом ВР. Роботу заряду, розосередженого інертним матеріалом, відбувається як дія двох самостійних зарядів. Характер руйнування гірських порід у цьому випадку подібна до руйнування, що відбувається при вибуху заряду ВР суцільної конструкції [14]. Наявність інертної набивки ускладнює інтерференцію вибухових хвиль між суміжними частинами розосередженого заряду, у результаті якого коефіцієнт використання енергії вибуху підвищується в незначній мірі.

Одним із способів більш ефективного використання енергії вибуху при руйнуванні гірських порід є застосування свердловинних зарядів, розосереджених повітряним проміжком [11-13]. При створенні в свердловинному заряді повітряних проміжків можна не тільки знизити ударний пік тиску за рахунок повітряних порожнин, а й збільшити час дії вибуху на масив, а також напруженість породи за рахунок взаємодії ударних хвиль, що розповсюджуються по масиву порід від двох розосереджених частин заряду при одночасному їх ініціюванню. Ударна хвиля, що рухається в свердловині, не тільки забезпечує всьому процесу динамічність, а й безперервно передає в середовище свою енергію, що і визначає підвищення інтенсивності дроблення гірських порід.

Ефективність свердловинних зарядів, розосереджених повітряними проміжками доведена багаторічною практикою вибухових робіт, як у кар'єрах, так і у підземних умовах при відбійці порід різної міцності.

На жаль, метод підривання свердловинних зарядів, розосереджених повітряними проміжками, не отримав подальшого розвитку через

складність формування повітряних проміжків та збільшення обсягів видобутку обводнених гірських порід.

У той самий час, для кар'єрів нерудної промисловості зменшення площі контакту ВР і породи, що реально досягається під час створення повітряних проміжків, дуже актуально з позиції зменшення виходу дрібних (перездрібнених) фракцій. Вирішення цієї проблеми в умовах кар'єрів Докучаєвського флюсо-доломітного комбінату стало можливим після створення спеціального замикаючого пристрою кумулятивної дії [15]. Випробування проводилися під час відбійки необводнених гірських порід. Встановлено, що вихід фракції дроблення менше 200 мм на ділянках з використанням свердловин з повітряними проміжками, за рівних умов підривання (міцність порід та питома витрата ВР), на 5-14 % нижче, ніж на ділянках свердловин із зарядом суцільної конструкції. При цьому було забезпечено високу якість дроблення порід навіть при зменшенню на 10-15% питомих витрат ВР на експериментальних ділянках, що дозволило за рахунок зменшення частки нерегульованого дроблення на рівні набивки знизити в 1,2-1,3 рази вихід негабариту, обсягу перездрібнених порід і тим самим пилогазових викидів в атмосферу кар'єрів.

В останні роки з'явилися реальні способи та засоби формування повітряних проміжків при відбійці обводнених гірських порід [16], які пройшли випробування на гранітних кар'єрах.

Роль основних руйнуючих чинників під час вибуху (хвиль напружень і газоподібних продуктів детонації) залежить від структури гірських порід. За наявності води у твердому середовищі із суцільної структури під час вибуху знижується амплітуда тиску на контакті з ВР. Однак зі збільшенням обсягу зарядної порожнини під дією ударної хвилі (далі – УХ) тиск в обводненому середовищі може виявитися вищим, ніж у необводненому, що може призвести до збільшення загального обсягу зруйнованого середовища. І не дивлячись на те, що напруження у хвилі стискання в обводнених середовищах вище, ніж у необводнених, на практиці спостерігається погіршення дроблення порід вибухом.

При цьому розв'язання проблеми інтенсифікації дроблення порід, як зазначалося вище, у верхній частині уступу на рівні набивки, можна здійснювати за рахунок розосередження колонки заряду ВР інертними проміжками із бурового шламу, відсіву, глини або повітряним і водним проміжком [4]. У місцях розташування інертних

проміжків, внаслідок зниження тиску продуктів детонації на стінки зарядної порожнини, руйнуюча дія вибуху знижується, що істотно важливо для підприємств нерудної промисловості.

Так у роботі [17] встановлено, що вплив на гірський масив подовжених циліндричних зарядів характеризується величиною питомої енергії, що припадає на одиницю його бічної поверхні. Це означає, що зі збільшенням діаметра порожнини руйнуюча здатність заряду зростає. Однак це має місце тільки при забезпеченні умов повного замикавання заряду ВР у середовищі, що руйнується. Для свердловинних зарядів, що мають вихід на денну поверхню, зі збільшенням діаметра заряду різко погіршується замикавання їх набивкою, внаслідок чого знижується коефіцієнт корисної дії енергії вибуху. Це призводить до погіршення якості вибухового дроблення та опрацювання підшви уступу.

Таким чином, підвищити корисну дію вибуху при руйнуванні гірських порід можна використовуючи заряди свердловин, розосереджених як повітряним, так інертним проміжком, інертним кільцевим і зазором між поверхнею ВР і стінкою свердловини [18]. При цьому маса ВР у свердловині зменшується, проте запасу енергії може бути достатньо для руйнування породи. При цьому підвищення ефективності дії вибуху досягається за рахунок збільшення часу дії вибуху на масив та його різноградієнтного навантаження по довжині заряду. Чим більша поверхня контакту заряду ВР та породи, тим більша частина енергії вибуху використовується на руйнування породи. Тоді поверхня контакту породи з зарядом постійної маси залежить від форми поперечного перерізу і щільності ВР, яким заповнена свердловина. Збільшення поверхні заряду постійного об'єму та маси досягається за рахунок зменшення діаметра заряду, що призводить до поліпшення дроблення гірської породи.

Цей ефект реалізований, зокрема, при застосуванні подовжених зарядів змінного діаметру [7-8]. При цьому заряди формуються шляхом розміщення в пробурених свердловинах поліетиленових оболонок (рукавів) змінного діаметру, заповнених ВР. При зміні діаметра заряду ВР змінюється енергія, що трансформується в масив гірських порід, виникає різноградієнтне поле напружень, в якому зростає роль напружень розтягання при руйнуванні породи. Ефективність таких зарядів підтверджено при відбійці гірських порід в умовах залізрудних та флюсових кар'єрів України.

Свердловинні заряди змінного діаметру формувались за допомогою поліетиленових рукавів, діаметр різних ділянок яких становив 180 та 250 мм. Дослідження показали, що використання зарядів ВР змінного діаметру, при скороченні витрати ВР на 10-15%, забезпечило поліпшення руйнуючої дії вибуху свердловинних зарядів за рахунок підвищення ролі напружень розтягання, а саме до зниження обсягу перездрибнених фракцій, що дуже важливо для кар'єрів нерудної промисловості.

Пошук раціональної конструкції свердловинного заряду для підвищення ефективності вибухових робіт призвів до створення вдосконаленого способу котлових розширень по висоті свердловини [6]. Реалізація нового способу вперше була здійснена в умовах кар'єрів ПівдГЗК. Свердловини з котловими розширеннями були створені за допомогою верстатів вогневого буріння. Надалі були спроби формуванню котлових розширень механічним способом, проте вони не набули розвитку. Можливість забезпечити якісне дроблення порід при зменшенні витрат ВР сприяла пошуку нетрадиційного способу створення котлових розширень у свердловинних зарядах плазмовим способом [5].

Рішення сформульованих вище проблем потребує впровадженню невідкладних заходів щодо вдосконалення існуючих та розробці нових технічних рішень по ефективності відбійки міцних гірських порід складної будови з урахуванням гірничотехнічних та гідрогеологічних умов розробки корисних копалин.

У зв'язку з цим дослідження, пов'язані з вибором і обґрунтуванням нової конструкції свердловинного заряду, наприклад, змінної форми поперечного перерізу є основою раціональних технологічних параметрів нових ресурсозберігаючих способів відбійки гірських порід, що базуються на врахуванні тріщино-тектонічної будови масиву і анізотропії їх фізико-механічних властивостей, залишаються актуальними і на теперішній час.

Робота виконується відповідно до комплексної програми Національної академії наук України по розробці безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом, а саме «Науковому обґрунтуванню та розвитку безвідходних технологій видобування корисних копалин відкритим способом зі зменшенням їх шкідливого впливу на навколишнє середовище» (№ ДР 0120U101113) та Договору про науково-технічне співробітництво між ІТТМ НАН України та

Черкаським технологічним університетом МОН України.

**Постановка завдання.** Метою роботи є проведення експериментальних досліджень по виборі і обґрунтуванню конструкції подовженого заряду ВР різної форми поперечного перерізу. Для досягнення мети проведено комплексні дослідження на підготовлених структурно-однорідних піщано-цементних моделях кубічної форми по оцінці характеру руйнування твердого середовища, хвильової дії вибуху зарядів ВР різної форми поперечного перерізу та за різними умовами передачі енергії вибуху. За отриманими результатами дроблення моделей побудовані кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу і виконано аналіз цих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**1. Експериментальні дослідження руйнування твердого середовища зарядами ВР різної форми поперечного перерізу та за різними умовами передачі енергії вибуху**

Для вивчення руйнуючої і хвильової дії вибуху подовжених зарядів різної форми поперечного перерізу в твердому середовищі розроблена методика експериментальних досліджень, які проводились в полігонних умовах кар'єру «Сівач» Корсунь-Шевченківського кар'єроуправління ПрАТ «Укragроввибухпром», в основу якої обрано положення розробленого способу моделювання вибухового руйнування гірських порід [19] та відомих методик [20].

Метою експериментальних досліджень було обґрунтування нових конструкцій подовжених зарядів різної форми поперечного перерізу шляхом порівняння руйнуючої та показників амплітуди напружень в хвилі стискання від вибуху однакових по масі зарядів ВР. При цьому проводилось порівняння результатів руйнування вибухом моделей при зміні не тільки конструкційних параметрів зарядів ВР, а і умов передачі енергії вибуху руйнуючому середовищу. Таке моделювання дозволяє отримати якісні та кількісні результати руйнування, які необхідні для перевірки в промислових умовах.

Методикою передбачено проведення *дві серії* експериментальних досліджень з різними формами зарядних порожнин: циліндричної, квадратної і трикутної на піщано-цементних моделях.

**Для проведення першої серії** експериментальних досліджень по вивченню руйнуючої і хвильової дії вибуху зарядів ВР різної форми перерізу були виготовлені моделі кубічної форми з ребром 150 мм з піщано-цементної однорідної

суміші при співвідношенні компоненті 1:1 з додаванням 0,5 % води. Підчас виготовлення моделей в центрі її розміщують вставки різної форми поперечного перерізу – циліндричну, квадратну і трикутну на глибину  $(0,5-0,6)h_{\text{мод}}$ , а на відстані  $(8-10)r_0$ , від осі заряду на глибину  $0,5h_{\text{мод}}$  встановлюють п'єзоелектричні датчики так, щоб площа датчиків була перпендикулярна напрямку хвилі стискання від вибуху заряду ВР (рис. 1). П'єзодатчики, встановлені в моделях, представляли собою квадранти круглих дисків діаметром  $d = 14,8$  мм і товщиною  $h = 0,65$  мм.

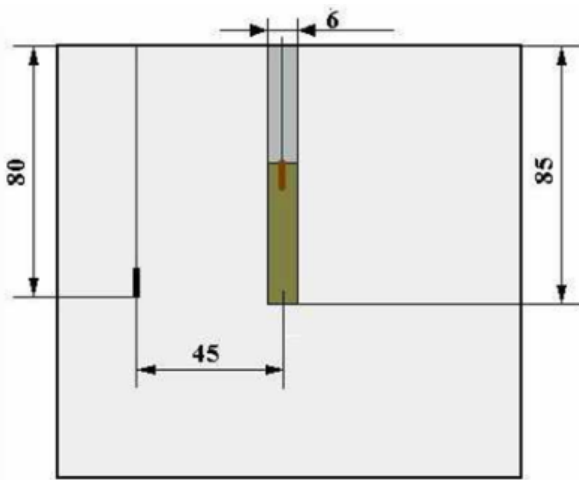


Рис. 1. Схема розташування в моделі п'єзодатчиків відносно заряду ВР

Перед установкою в моделі були заміряні електричні ємності круглих дисків, а потім з урахуванням того, що електрична ємність пропорційна площі плоского конденсатора, розраховувались електричні ємності п'єзодатчиків, встановлених в моделях.

Площа кожного датчика ( $S_d$ ) дорівнювала 1/4 площі круглого диску діаметром 14,8 мм і становила відповідно  $S_d = 4,3 \cdot 10^{-5}$  м<sup>2</sup>. Тарировка

п'єзоелектричних датчиків здійснювалась методом резонансу-антирезонансу, а потім розрахунковим шляхом визначено п'єзомодуль  $d_{33}$  кожного датчика [21]. Параметри застосовуваних п'єзоелектричних датчиків і електричні амплітуди сигналів, зареєстровані ними, наведені в табл. 1.

У підготовлених зарядних порожнинах формували заряди різного поперечного перерізу – циліндричної, квадратної і трикутної форми з використанням ВР типу Комполайт ГС-6. Вибухову суміш розташовували в підготовлені паперові патрони різної форми. Маса ВР в заряді становила 2,0 г для всіх серій експериментів, а в якості набивки використовували кварцовий пісок фракції 0,25 мм. Питома витрата ВР становила – 0,3 кг/м<sup>3</sup>. Висота колонки заряду в залежності від його перерізу коливалась в межах 25-35 мм. Ініціювання зарядів здійснювали відрізками хвилеводу довжиною 0,8 м НЕСІ Імпульс», ПРИМА ЕРА з'єднаний з капсулем-детонатором. Конструкції зарядів наведено на рис. 2.

Так, як руйнуюча дія вибуху сильно залежить від фізико-механічних і міцних властивостей твердого середовища, одночасно з виготовленням основних моделей виготовлялись зразки для визначення щільності  $\rho$ , швидкості поздовжніх хвиль  $C_p$  і міцності на одновісне стискання  $\sigma_{\text{ст}}$  матеріалу моделей. Зразки для визначення фізико-механічних властивостей мали форму куба з ребром  $40 \pm 2$  мм. Швидкість поздовжніх хвиль визначали за допомогою розробленого в ІГТМ НАН України стенду [22], а визначення щільності зразків і випробування їх на міцність при одновісному стисканні проводились на стандартному обладнанні і відповідно до чинних Держстандартів [23-26].

Вибухи проводилися в товстостінній металевій вибуховій камері, внутрішня поверхня якої футерована гумою. Під час вибуху зарядів ВР в моде-

Таблиця 1

Параметри п'єзоелектричних датчиків

№№ датчика (табл.)	Електрична ємність, пФ, $C \cdot 10^{-10}$	Площа датчика, $S_d \cdot 10^{-5}$ , м <sup>2</sup>	П'єзомодуль $d_{33} \cdot 10^{-10}$ , К/Н	Електрична амплітуда сигналів U, В	Чутливість осцилографа	
					по амплітуді, В/дел	по довжині мкс/дел
1 (41)	0,164	8,6	3,13	220	20	50
2 (43)	0,152	8,6	2,93	280		
3 (28)	7,85	4,3	2,86	160		
4 (48)	0,148	8,6	2,50	220		
5 (25)	7,65	4,3	2,77	220		
6 (48)	0,148	8,6	2,50	300		
7 (25)	7,65	4,3	2,77	260		

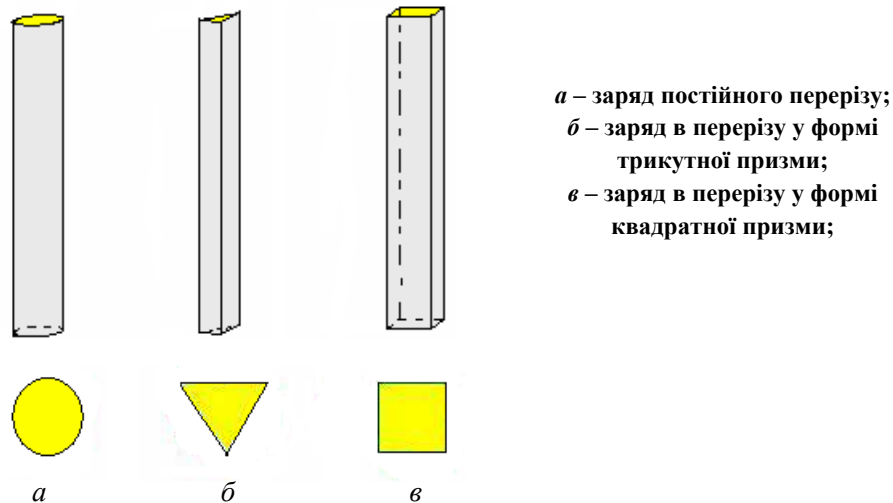


Рис. 2. Конструкції зарядів ВР

лях максимальні механічні напруження в хвилі стискання, перетворювались п'єзоелектричними датчиками в електричні сигнали, які надходили на цифровий осцилограф типу OWON, серії POS 58225, який має внутрішню пам'ять. Перед вимірами проводили калібрування осцилографу і встановлювали необхідну для даного експерименту чутливість його по амплітуді і тривалості імпульсу, отриманих при пробних вибухах. Зареєстрована датчиками інформація кодується і передається на обчислювальний комплекс – NOTEBOOK, де з використанням програмного забезпечення (ПЗ) обробляється і виводилася на монітор в діалоговому вікні у вигляді осцилограми з числовими даними по всьому діапазону вимірювань. По осцилограмам визначали максимальні величини напружень і тривалість імпульсу [19].

Для обґрунтування ефективності і вибору найбільш прийнятної конструкції заряду ВР проводили порівняльну оцінку результатів руйнування моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу. Зруйновану модель із камери струшують в ємність і далі проводять її гранулометричний аналіз по відомим методикам [27] з використанням набору лабораторних сит типу СЛ-200 № 58 та аналізатору ситового А30 для оцінки гранулометричного складу на макрорівні. Отримані результати заносять в таблиці і обробляють їх, по яким будують кумулятивні криві і гістограми розподілу гранулометричного складу  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованої моделі подовженим зарядом ВР різної форми поперечного перерізу з використанням Додатку Microsoft Excel.

По отриманим даним результатів руйнування моделі, що характеризують якість дроблення

моделі зарядом ВР різної форми поперечного перерізу, розраховують діаметр середнього куску, площу новоутвореної поверхні зруйнованої моделі та інші енергетичні показники за відомими залежностями [19] Результати обробки експериментальних даних наведено в табл. 2 за якими побудовані кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу зруйнованих моделей зарядами ВР різної форми (рис. 3 і рис. 4) і гістограми розподілу фракційного складу продуктів руйнування моделі вибухом (рис. 5 і рис. 6).

Порівняльний аналіз результатів дроблення твердого середовища і показників амплітуди напружень в хвилі стискання дозволив встановити, що під час вибуху зарядів постійної форми перерізу по висоті колонки напруження в хвилі стискання нижче (0,14 ГПа), ніж напруження від вибуху зарядів у цій порожнині квадратної і трикутної форми перерізу через проміжне середовище – повітря (0,17 ГПа і 10,2 ГПа відповідно). Це свідчить про те, що під час вибуху зарядів ВР у формі квадратної і трикутної призм при переміщенні фронту детонаційної і ударної хвиль (далі – ДХ і УХ) і випереджаючи у часі фронти ДХ і УХ в зарядах суцільної конструкції (постійної форми перерізу), в кутах їх концентруються максимальні амплітудні значення напружень в хвилі стискання з формування різноградієнтних силових полів. Такий механізм навантаження твердого середовища сприяє збільшенню впливу зсувних і напружень розтягання над стискаючими. Це призводить до рівномірності дроблення моделі вибухом заряду ВР зі збільшенням виходу великих фракцій розміром  $d_1 > 50$  мм, в 1,5-2,0 рази площі новоутвореної поверхні і зниження діаметру середнього

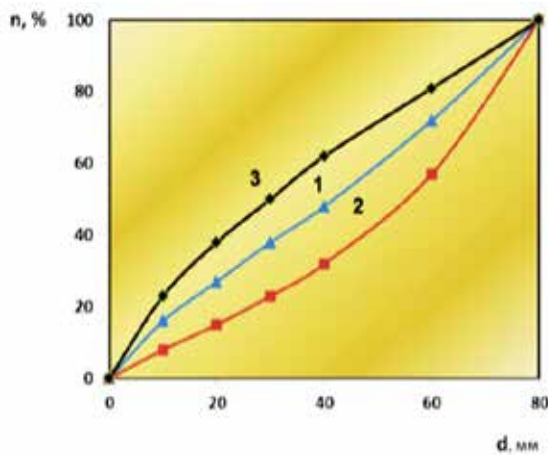


куску на 5-10% для зарядів в перерізу квадратної і трикутної призми.

Для обґрунтування і подальшого прогнозування гранулометричного складу продуктів руйнування твердого середовища в залежності від конструкції заряду ВР і умов передачі енергії вибуху **була проведена друга серія** експериментальних досліджень в полігонних умовах кар'єру «Сівач» з використанням наведеної вище методики досліджень. Основна відмінність якої полягає в тому, що під час виготовлення моделей з ребром рівним 150 мм одна частка моделей виготовлялась із однорідної піщано-цементної

суміші, заповнювачем якої був м'який річковий пісок, при їхньому співвідношенні 1:1:0,5, а інша частка моделей виготовлювалась із заповнювача – м'який річковий пісок + гранітний відсів діаметром фракцій 5-10 мм з додаванням затворювача – цемент марки М400 + вода при співвідношенні компонентів 1:1:0,5.

Підготовлене цементне тісто заливали в спеціальні залізні форми з розміром ребра 150x150x150 мм. В центрі кожної моделі в процесі її виготовлення формували зарядні порожнини розміщенням вставок циліндричної форми діаметром 16 мм на глибину 80 мм. Після



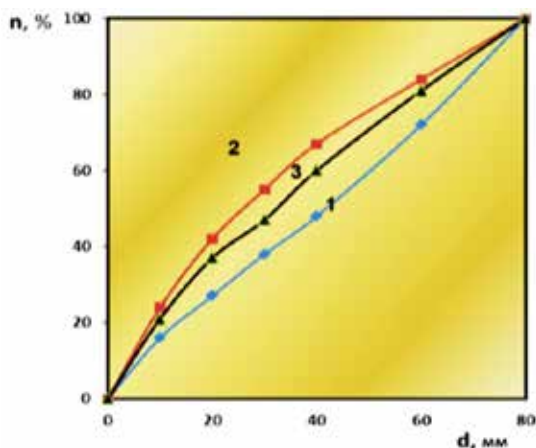
1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 3. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при передачі енергії ВР через проміжне середовище – повітря

Таблиця 2

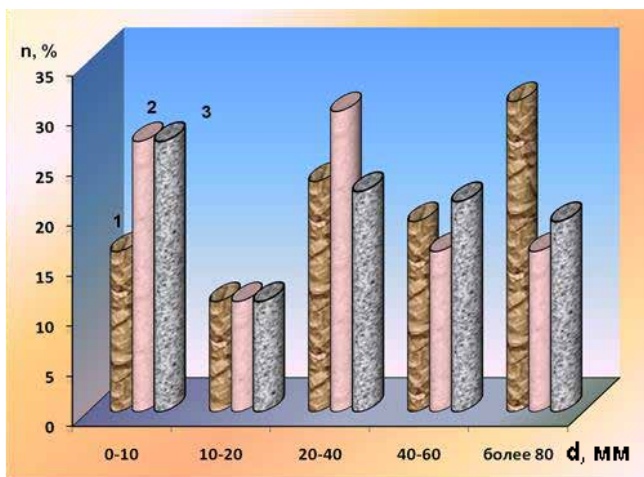
Результати руйнування піщано-цементних моделей від дії вибуху заряду ВР різної форми поперечного перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху середовищу, що руйнується

Конструкції зарядів	Маса моделі, $m$ , кг	Діаметр середнього куску $d_{cp}$	Склад фракцій (%), в зруйнованих вибухом моделях		Напруження в хвилі стискання, ГПа	Новоутворена поверхня $S_{н.}$ , $cm^2$
			$d_i < 20$ мм	$d_i > 50$ мм		
Заряд постійного перерізу	5,735	41,83	27,0	53,0	0,14	83010
Заряд у вигляді квадратної призми, розміщений в циліндричній порожнині з повітряним проміжком	6,476	35,8	31,0	45,0	0,17	171408
Заряд у вигляді трикутна призма, розміщений в циліндричній порожнині з повітряним проміжком	6,319	49,0	20,0	60,0	10,2	98600
Заряд в моделі – квадратна призма, розміщений к хвилі напружень	6,596	32,8	32,0	40,0	0,15	225006
					0,20	
Заряд в моделі – трикутна призма, розміщений к хвилі напружень	6,601	31,2	37,0	32,0	14,2	237828
					16,7	



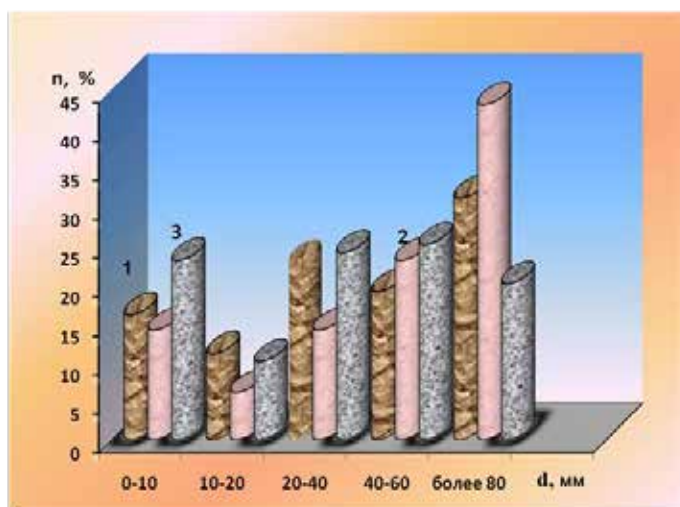
1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 4. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при безпосередньому контакті поверхні заряду з руйнуючим середовищем



1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 5. Гістограма розподілу фракцій дроблення  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при передачі енергії ВР через проміжне середовище – повітря



1– заряди ВР постійного перерізу; 2 і 3 відповідно – трикутна і квадратна призма

Рис. 6. Гістограма розподілу фракцій дроблення  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом моделей зарядами ВР різної форми поперечного перерізу при безпосередньому контакті поверхні заряду з руйнуючим середовищем

отримання 30 % міцності моделей їх виймали з форми і витримували на повітрі до набрання максимальної міцності згідно діючих Держстандартів [23-24].

Для проведення **2 – ї серії експериментів** було виготовлено 19 моделей по 3 шт. для кожного виду навантажень і однієї для пробного вибуху. Разом з виготовленням основних моделей виготовлялись зразки для оцінки фізико-механічних властивостей твердого середовища, що руйнується згідно діючих Держстандартів [22, 25-26]. Результати фізико-механічних властивостей матеріалу моделей наведені в табл. 3.

В підготовлених для руйнування моделей з різними фізико-механічними властивостями в зарядні порожнини встановлювали паперові гільзи, які мають форму в перерізу у вигляді трикутної, квадратної призми і циліндру (рис. 2) з розміщенням в них вибухової речовини типу «Комполайт ГС-6» вагою 2г з ініціатором – капсулем-детонатором, з'єднаною з неелектричною системою ініціювання – НСІ «Імпульс» або ПРИМА ЕРА.

Сформовані конструкції зарядів ВР в моделях з різними фізико-механічними властивостями підривали вибуховим приладом конденсаторним типу ППВ 100 з наступними умовами передачі енергії вибуху руйнуючому середовищу. Так, в одній групі моделей простір навколо гільз зарядів трикутної і квадратної форми заповнювали піском, водою і залишали повітряний проміжок, а в іншій групі моделей, в яких розташовували циліндричні заряди, колонка його мала безпосередній контакт з поверхнею зарядної порожнини. Підготовлені моделі розташовували в вибуховій камері і підривали.

Оцінку результатів руйнування проводили по розподілу гранулометричного складу зруйнованої вибухом моделей методом ситового аналізу за відомими методиками [27] з використанням набору лабораторних сит типу СЛ-200 № 58 та аналізатору ситового А30. Отримані результати заносять в таблиці і обробляють їх з використанням Додатку Microsoft Excel.

По результатам дроблення моделей вибухом визначали: загальну масу зруйнованої вибухом моделі, вміст дрібних фракцій, вміст великих фракцій, площа новоутвореної поверхні і діаметр середнього куску. Отримані результати дозволили побудувати кумулятивні криві розподілу гранулометричного складу зруйнованої моделі конструкціями зарядів ВР різної форми перерізу (рис. 7. і рис. 8) і гістограми фракційного складу продуктів руйнування  $n$  від їх розміру  $d$  за різних умов вибухового навантаження твердого середовища (рис. 9 і рис. 10).

Аналіз результатів експериментальних досліджень дозволив встановити, що використання подовжених зарядів ВР різної форми перерізу – трикутної, квадратної форми за різними умовами навантаження (проміжне середовище – повітря, вода, пісок) досягається рівномірність дроблення руйнуючого середовища в порівнянні з зарядом циліндричної форми. Особливо це доведено при руйнуванні обводненого середовища. Це свідчить про те, що змінюється механізм вибухового навантаження за рахунок переважаючих зсувних та розтягуючих напружень.

Результати проведених досліджень дозволили створити умови по розробці нової ресурсозберігаючої технології руйнування міцних гірських порід складної будови з використанням комбінованих свердловинних зарядів з регульованою

Таблиця 3

## Фізико-механічні властивості матеріалу моделей

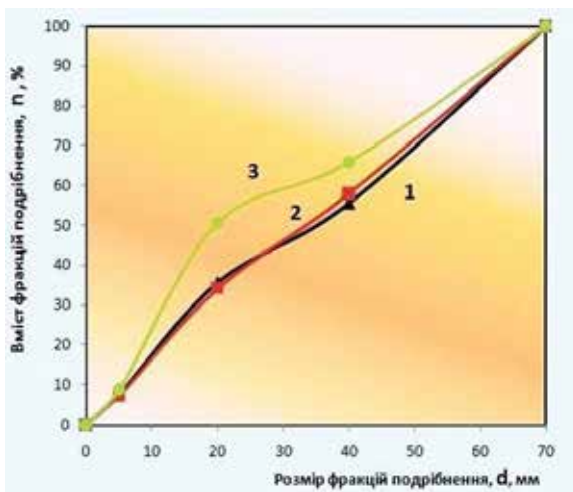
Тип моделей	Маса зразків, $m \cdot 10^{-3}$ , кг	Щільність, $\rho$ , кг/м <sup>3</sup>	Швидкість повздовжніх хвиль, $C_p$ , м/с	Міцність на стискання, $\sigma_{ск}$ , МПа
Піщано-цементна модель з додаванням води в співвідношенні 1:1:0,5	Середні показники, 131,2	Середні показники 1910	Середні показники 3080	Середні показники 130,0
	Середньоквадратичне відхилення, $\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	30	40	1,7
	Коефіцієнти варіації, $v_{вар.}$ , %	1,6	1,6	6,9
Піщано-цементна модель з додаванням гранітного відсіву і води в співвідношенні 1:1:1:0,5	Середні показники, 235,3	Середні показники 1510	Середні показники 4085	Середні показники 26,0
	Середньоквадратичне відхилення, $\Delta$ , кг/м <sup>3</sup>	35	40	1,7
	Коефіцієнт варіації, $v_{вар.}$ , %	1,8	1,8	7,9

енергією вибуху за рахунок зміни площі контакту ВР зі стінками зарядної порожнини і питомої енергії вибуху, що передається гірській породі через бічну поверхню заряду та може забезпечити отримання реального економічного ефекту за рахунок рівномірності дроблення породи, зниження об'єму перездрібнених фракцій та витрат на вибухові матеріали.

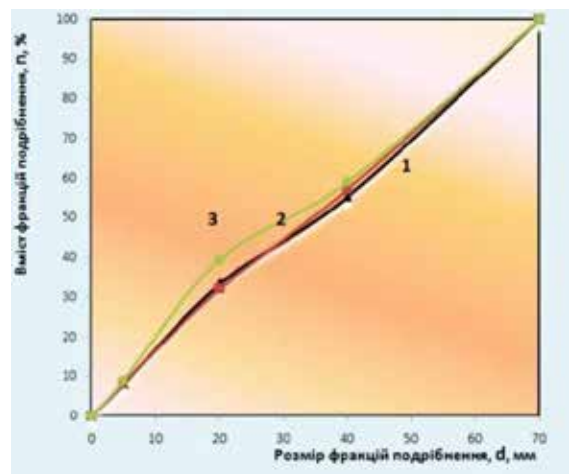
**Висновки.** У результаті дослідження отримані такі результати:

– експериментально встановлено, що під час вибуху зарядів постійної форми перерізу по висоті колонки напруження в хвилі стискання нижче (0,14 ГПа), ніж напруження від вибуху зарядів у цій порожнині квадратної і трикутної форми перерізу через проміжне середовище – повітря (0,17 ГПа і 10,2 ГПа відповідно).

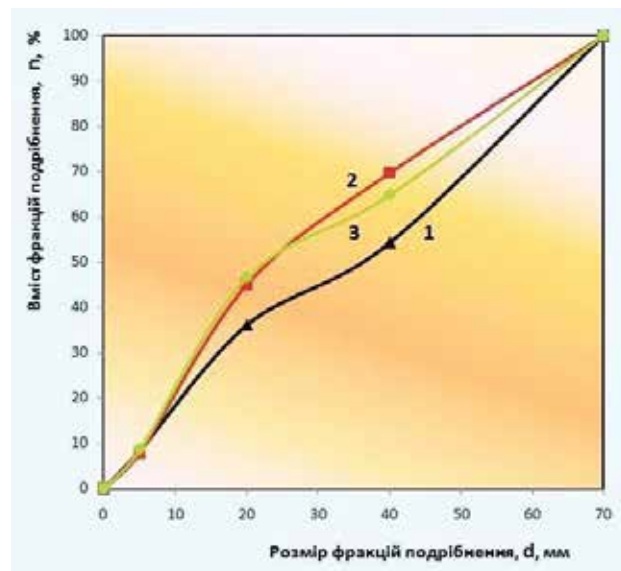
– доведено, що під час вибуху зарядів ВР у формі квадратної і трикутної призми при переміщенні фронту детонаційної і ударної хвиль (далі –



а



б



в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 і 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

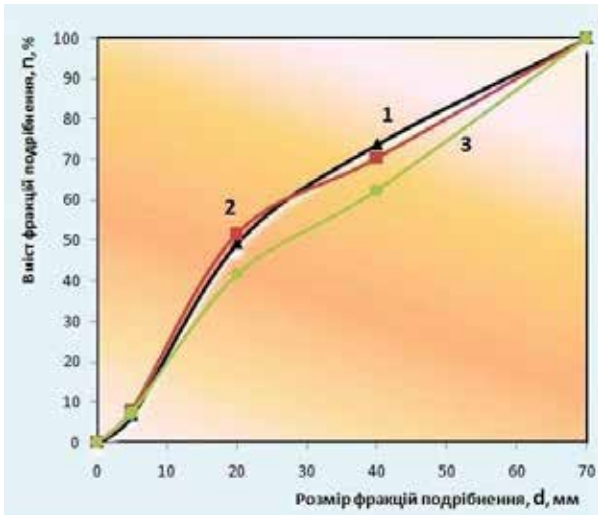
Рис. 7. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення  $n$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом структурно-однорідних піщано-цементних моделей зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху ВР через проміжне середовище

ДХ і УХ) і випереджаючи у часі фронти ДХ і УХ в зарядах суцільної конструкції (постійної форми перерізу), в кутах їх концентруються максимальні амплітудні значення напружень в хвилі стискання з формування різноградієнтних силових полів.

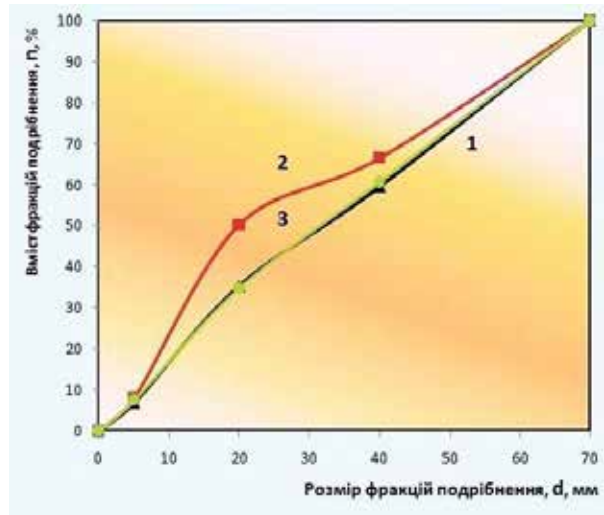
– встановлено, що отриманий механізм навантаження твердого середовища сприяє збільшенню впливу зсувних і напружень розтягання над стискаючими. Це призводить до рівномірності дроблення моделі вибухом заряду

ВР зі збільшенням виходу великих фракцій розміром  $d > 50$  мм, в 1,5-2,0 рази площі новоутвореної поверхні і зниження діаметру середнього куску на 5-10% для зарядів в перерізу квадратної і трикутної призми.

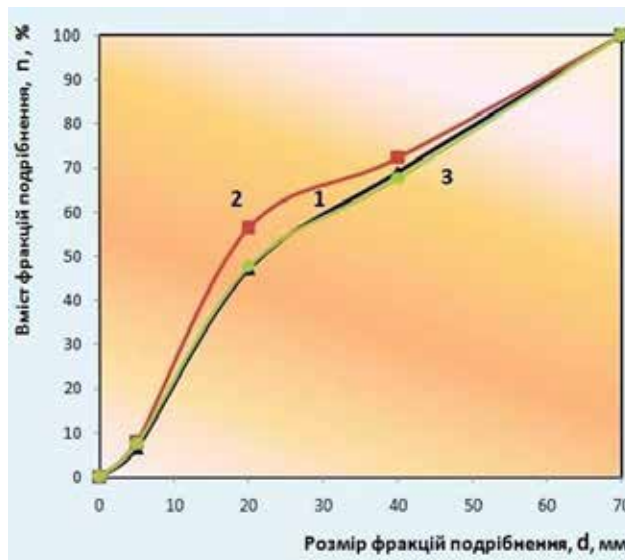
– отримані результати досліджень сприятимуть пошуку та розробці нових технічних рішень по підвищенню ефективності руйнування міцних гірських складної будови енергією вибуху на кар'єрах нерудних корисних копалин.



а



б

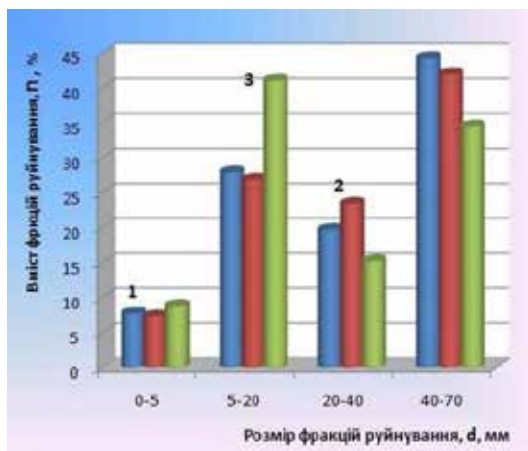


в

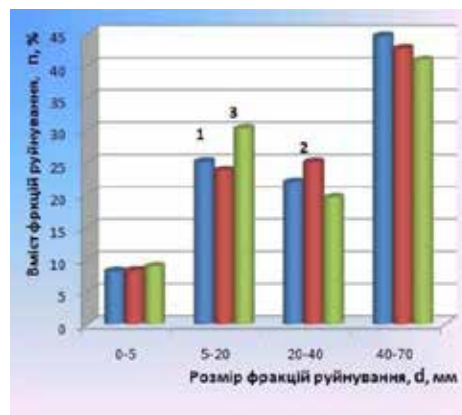
а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

Рис. 8. Кумулятивні криві розподілу фракцій дроблення п від їх розміру d зруйнованих вибухом моделей з відмінними фізико механічними властивостями зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії ВР через проміжне середовище

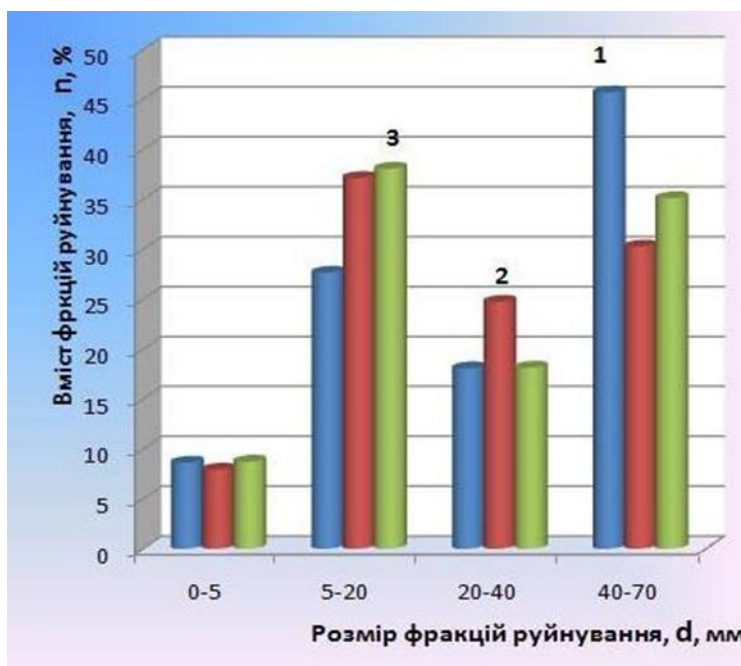




*a*



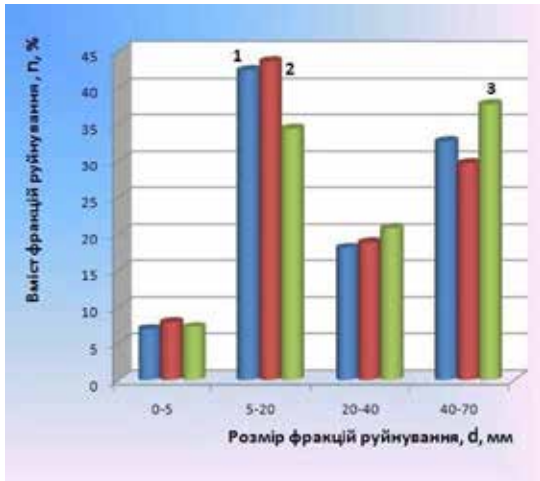
*б*



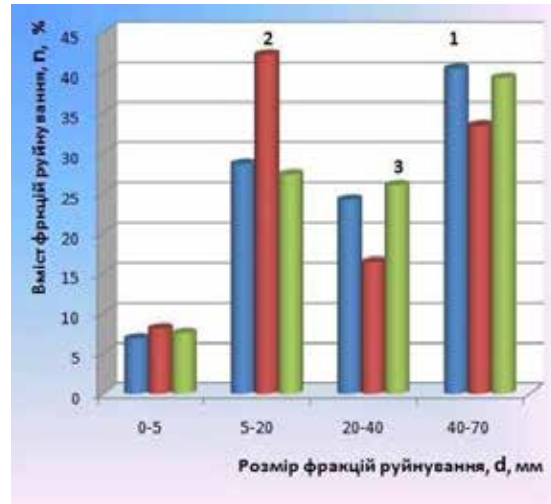
*в*

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

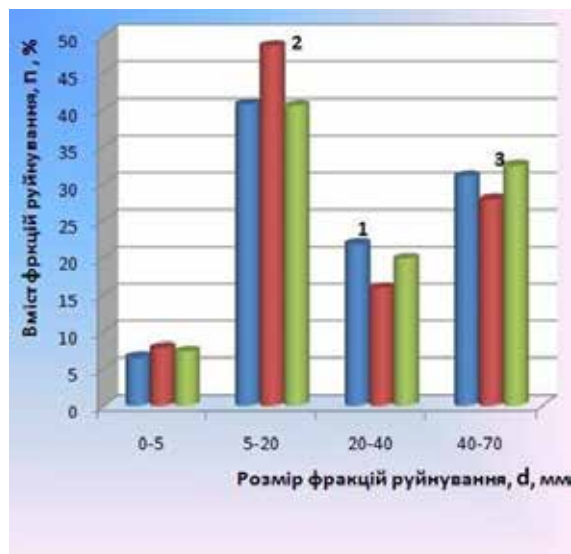
Рис. 9. Гістограми розподілу фракцій дроблення п від їх розміру d зруйнованих вибухом структурно-однорідних піщано-цементних моделей зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії вибуху ВР через проміжне середовище



а



б



в

а) повітря; б) вода; в) пісок; 1, 2 и 3 – заряди ВР різної форми перерізу: трикутної, квадратної і у вигляді кола відповідно

Рис. 10. Гістограми розподілу фракцій дроблення  $p$  від їх розміру  $d$  зруйнованих вибухом моделей з відмінними фізико механічними властивостями зарядами ВР різної форми перерізу за різними умовами передачі енергії ВР через проміжне середовище



Список літератури:

1. Ефремов Э.И. Подготовка горной массы на карьерах. М.: Недра, 1980. 272с.
2. Ефремов, Э.И. Управление размерами зоны переизмельчения горных пород при их взрывном разрушении / Весник Криворожского технического университета. Кривой Рог, 2007. Вып.18. С. 36-39.
3. Ефремов Э.И., Комир В.М., Чебенко В.Н., Ромашко А.М. Влияние типа ВВ и условий взрывания на переизмельчение нерудных полезных ископаемых: Матер.международ. конф. «Форум горняков- 2010». Днепропетровск: НГУ, 2010. С. 60-63.
4. Барон В.Л., Кантор В.Х. Техника и технология взрывных работ в США.-М.:Недра,1989. 376с
5. Булат А.Ф., Никифорова В.А., Осенний В.Я. Повышение эффективности буровзрывных работ в крепких рудах / Весник Кременчужского гос. политехн. ун-та. 2006 (37). Вып. 2. Част.2. С. 93-94.
6. Белоконь В.П., Ильин В.И., Белоконь М.П. и др. Эффективность отбойки горных пород системой сосредоточенных зарядов / Metallургическая и горнорудная промышленность. 1974. № 2. С. 59-60.
7. Ефремов Э.И., Белоконь М.П., Николенко Е.В., Баранник В.В., Пономарев А.В. Опытные промышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра / Геотехническая механика. 2005. № 58. С. 13-18.
8. Белоконь М.П., Николенко Е.В., Яицков К.В., Яны С.В. Опыт взрывания скважинных зарядов переменного диаметра по высоте уступа / Вісник Кременчужського держ. політехн. ун-ту. Кременчук, 2006. Вип.6 (41). част. 1. С. 56-60.
9. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ищенко К.С. Способы взрывной отбойки горных пород зарядами переменного сечения / Современные ресурсосберегающие технологии горного производства. 2008(1). № 1. С. 7-10.
10. Шкуматов А.Н., Калякин С.А. Перераспределение импульса взрыва при помощи рефракторов / Взрывное дело № 98/55. М.: МВК по взрывному делу, 2007. С. 120-128.
11. Тищенко. С.В., Федоренко П.И., Еременко Г.И. [и др.]. Обоснование параметров скважинного заряда взрывчатого вещества с воздушным промежутком и отражателем из сыпучих материалов / Metallургическая и горнорудная промышленность. 2015. № 2. С. 90-93.
12. Комир В.М., Сокурченко В.А., Ромашко А.М. Эффективность различных конструкций зарядов при взрывной отбойке известняков на карьерах / Науковий вісник НГУ. 2005. № 10. С. 7-10.
13. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Пономарев А.В., Поляков Ю.С. Эколого-экономическая эффективность скважинных зарядов, рассредоточенных воздушными промежутками на карьерах нерудной промышленности. Науковий Вісник НГУ. 2008. № 3. С. 10-15.
14. Гончаров С.А. Разрушение горных пород, путем повышения его эффективности // Горн.журн. 1996. № 5. С.9-12
15. Пристрій для розосередження заряду ВР повітряним проміжком. пат. на корисну модель № 1576, Україна. / В.В. Воробйов, Г.В. Славко, В.Т. Щетинін, К.В. Лотоус та інші. 2003. Бюл. № 6.
16. Быков Е.К. Способ получения воздушных промежутков / УСИВ. 2006. № 3. С. 3-5.
17. Ефремов Э.И., Пономарёв А.В., Никифорова В.А. Влияние свойств ВВ размеры зоны переизмельчения при разрушении твердых сред / Науковий вісник НГАУ. 2001. № 1. С. 24-26.
18. Ефремов Э.И., Никифорова В.А., Ромашко А.М. О механизме разрушения горных пород цилиндрическими зарядами с кольцевыми инертными зазорами / Вісник Кременчужського національного університету. Кременчук: КрНУ, 2012. Вип. 1/2012(72). С. 127-130.
19. Спосіб моделювання вибухового руйнування гірських порід: пат. на винахід 110745 Україна / Іщенко К.С., Коновал С.В., Кратковський І.Л., Круковська В. В., Коновал В.М. № а 201408761; заявлено 04.08. 2014; опубл. 10.02. 2016. Бюл. № 3.
20. Комир В.М., Гейман Л.М., Кравцов В.С., Мячина Н.И. Моделирование разрушающего действия взрыва в горных породах. М.: Наука, 1972. 214 с.
21. Глозман И.А. Пьезоэлектрические материалы в электронной технике. М.-Л.: Энергия, 1965. 192 с.
22. Яланский А.А., Паламарчук Т.А., Скипочка С.И. [и др.]. Временные методические указания по экспресс-определению упругих свойств горных пород ультразвуковым методом на необработанных образцах керна геологоразведочных скважин РД. Л.: ВНИМИ, 1987. 41 с.
23. ГОСТ 21153.0-75. Породы горные. Отбор проб и общие методы физических испытаний. Введен с 01.07.75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 20 с.
24. ГОСТ 10181.2-81. Смеси бетонные. Методы определения плотности. Введен с 01.01.81. М.: Изд-во стандартов, 1981. 25 с.
25. ГОСТ 21153.2-84. Породы горные. Метод определения предела прочности при одноосном сжатии. Введен с 01.07.86. М.: Изд-во стандартов, 1986.10 с.
26. ГОСТ 21153.7-75. Породы горные. Метод определения скоростей распространения упругих продольных и поперечных волн. Введен с 01.01.75. М.: Изд-во стандартов, 1976. 35 с.
27. Барон Л.И. Кусковатость и методы ее измерения. М.: Изд-во АН СССР, 1960. 124 с.

**Konoval V.M. EVALUATION OF THE NATURE OF SOLID ENVIRONMENT DESTRUCTION BY CHARGES OF VARIABLE CROSS-SECTION FORM UNDER DIFFERENT CONDITIONS OF EXPLOSION ENERGY TRANSMISSION**

*In the study to substantiate the new design of the charge of variable cross-sectional shape: cylindrical, prism-shaped – triangular and square cross-sectional experiments were conducted on structurally homogeneous sand-cement models of cubic shape with a rib of 150 mm by comparing the results of their destructive action and numerical indicators the amplitude of the stresses in the compression wave during the explosion of the same mass of explosive charges. During the manufacture of models in metal form with the help of inserts along its axis to a depth of 85 mm formed cylindrical cavities with a diameter of 10 mm to accommodate the charges of cylindrical explosives and triangular and square prisms, and installed piezoelectric sensors to a depth of 75 mm the upper limit of the model and at a distance from the axis of the charge of 45 mm. Evaluation of physical and mechanical properties of the destructive environment was performed on cubic models with a rib size of  $40 \pm 2$  mm in accordance with current State Standards. Explosive charges of various designs were formed in prepared paper cartridges, the outer diameter of which was 0.95 diameter of the charging cavity. As explosives in the destruction of models used industrial explosives type Compoline weighing 2.0 g or pieces of detonating cord (LH) for all series of experiments. The charges were detonated by LS segments 0.8 m long, connected in a chain with a detonator capsule or a waveguide of a non-electric initiation system – NSI type NONEL or Prima EPA and an explosive device condenser PIV100. The experiments were conducted in the field conditions of the Sivach quarry of the Korsun-Shevchenkivsky Regional University. The nature of the destruction of the models was assessed by the method of sieve analysis, according to which the dependences of the particle size distribution distribution were constructed. The results of experiments showed that the reduction of peak pressure of detonation products (PD) on the destructive medium (model) is achieved by transmitting an explosive impulse to the surface of the charging cavity in the corners of the charge profile, both square and triangular with different gradient stress fields in these zones.*

**Key words:** model, explosive charge, explosion, voltage amplitude, multi-gradient load.

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 676.166

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/25>

**Trembus I.V.**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**Hondovska A.S.**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**Tinytska Ye.Yu.**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**Mykhailenko N.V.**

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

### **RESOURCE-SAVING OXIDE-ORGANOSOLVENT TECHNOLOGY OF STRAW FIBER SEMI-FINISHED PRODUCTS**

*Suggested method of obtaining cellulose from wheat straw stalks is substantiated. The influence of catalyst – citric acid costs on the quality indicators of straw fibrous semi – finished products has been studied. The influence of technological parameters, duration and temperature of oxidative delignification of vegetable raw materials on cellulose strength indicators is established. The developed technology allows to obtain cellulose with high quality indicators: yield from 55.1 to 84.7%, and residual lignin content from 1.0 to 6.7%, breaking length from 3000 m and tear resistance from 275 to 520 mN. The regression equation of the process of oxidative-organosolvent cooking of wheat straw stalks using the method of full factorial experiment is obtained. The optimal parameters of the process of delignification of vegetable raw materials are obtained using optimization method and generalized Harrington desirability function. In contrast to traditional long-term and time-consuming methods of obtaining cellulose-containing fibrous semi-finished products, the developed method of delignification can reduce energy consumption and reduce negative impact on the environment. Technological parameters of the obtained straw cellulose allow its use in the production of bleached types of cardboard and paper products.*

**Key words:** wheat straw, peroxyacetic acid, catalyst, delignification, cellulose, mathematical models.

**Formulation of the problem.** Pulp and paper industry of Ukraine has shown quite positive results in recent years. At the same time, reserves of intensive development remained only in medium and small enterprises. Opportunities to increase production at large enterprises due to intensive factors are almost exhausted. Development of the pulp and paper industry in the country depends primarily on the consumption of its products. Production facilities of pulp and paper enterprises of Ukraine are loaded by only 30%, and about 50% of cardboard and paper products, imported into the country [1-2]. Today products of domestic enterprises in the industry are 80% made from secondary raw materials, which negatively affects its quality. This problem is due to the lack of own production of cellulose semi-finished products. This problem can be solved

by using annual plants and agricultural waste for the production of cellulose-containing materials for various purposes.

Over the last 20 years, principles of evaluating cellulose production methods in the world have changed significantly. Tighter requirements for the composition of effluents and gaseous emissions of industrial enterprises raised the question of the need to abandon technologies that involve usage of chlorine and sulfur compounds. This stimulated research for alternative ways of delignification of plant raw materials that would be more environmentally friendly. Nevertheless, problem of contamination with hydrogen sulfide, organic sulfides and other harmful compounds can't be solved only by improving the auxiliary processes and equipment (absorption, evaporation, washing, sodoregeneration).

One of the ways to solve environmental problems is to develop fundamentally new ways to produce cellulose. First of all, it can be catalytic oxidative methods of delignification of vegetable raw materials with hydrogen peroxide in an acidic environment [3-4].

**Analysis of recent researches and publications.** Effective catalysts for the reaction of lignin oxidation by hydrogen peroxide are compounds of transition metals – chromium, molybdenum, tungstate. They interact with hydrogen peroxide with the formation of intermediate peroxocomplexes [5-6]. Peroxocarboxylic acids, like most hydroperoxides, are chemically unstable, mainly due to influences of metals of variable valence. The addition of citric acid significantly more effectively to improve the stability of peroxyacids (0.3% by volume, which is 1.5% by weight of absolutely dry wood) [7-9]. Therefore, such oxidative-organosolvent technologies are one of the promising areas for obtaining cellulose from non-woody vegetable raw materials.

Agriculture which produces significant amount of grain, industrial and other crops annually, has a large resource of by-products. Of all types of agricultural waste, cereal stalks are recognized as suitable for the production of fibrous semi-finished products [10-12].

**Formulation of the goals of the article.** The aim of the work is to develop resource-saving and cost-effective catalytic oxidative-organosolvent technology for pulp production from Ukraine's own raw materials.

**Presentation of the main material of the research.** Distinctive features of the fibrous mass of wheat straw determines its chemical composition. Stems of wheat straw contain large amount of pentosans 26.7%, lignin content lower than 17.7% and total ash content and content of silicon compounds compared to deciduous wood (for birch the corre-

sponding figures are 23.3%, 19.4% and 0.5%) are several times higher – 6.6%.

Study of the process of obtaining cellulose from wheat straw chips in the system "acetic acid – water-hydrogen peroxide" was based on technological modes developed by authors [13]. In order to reduce the cost of cellulose for the cooking process, it is proposed to use citric acid as a catalyst, which is many times less expensive than molybdenum and tungstate and has a multi-ton production.

There was made a number of experimental researches of the process of delignification of wheat straw chaff with a cooking solution containing glacial acetic acid and water, at a ratio of 75:25 by volume, with the addition of 50% H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> by weight of absolutely dry raw materials, and citric acid at a cost of 0.5 to 3.0% by weight of absolutely dry raw materials. Delignification was performed at constant temperature and duration (100 °C, 90 min.) in glass flasks at atmospheric pressure. The results of cooking were characterized by the yield of solid residue (as a percentage of the mass of absolutely dry raw materials) and the mass fraction of lignin in the solid residue (as a percentage) of Fig. 1.

Investigation has found (Fig. 1) that the usage of citric acid leads to an increase in the yield of straw cellulose by 1.5 – 4.1%, content of residual lignin decreases by 0.46 – 0.58% by weight of absolutely dry cellulose. Such changes in the quality of the solid residue are associated with the acceleration of the process of dissolution of lignin macromolecules and its transfer to the cooking solution and the stabilization of the carbohydrate component of vegetable raw materials.

It should be noted that with the usage of citric acid more than 0.5% compared to the weight of dry raw

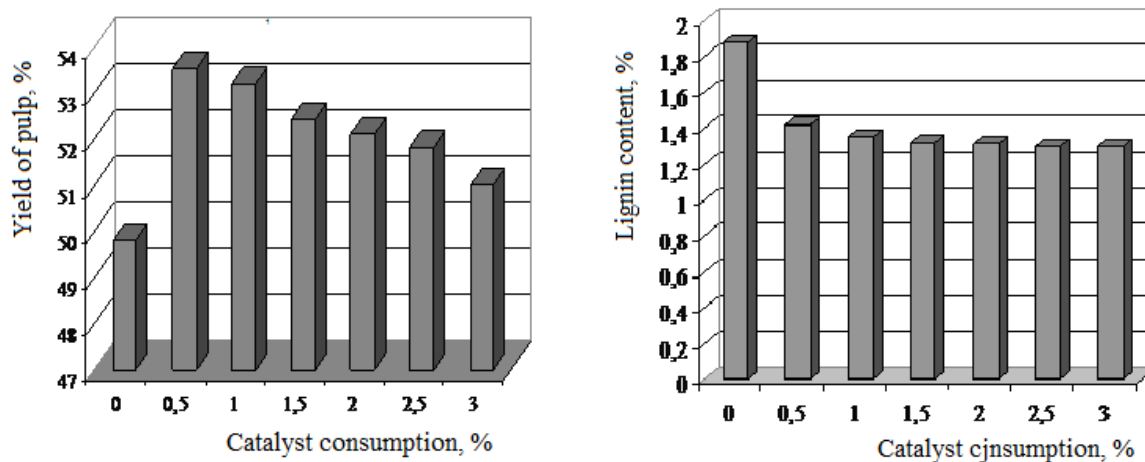


Figure 1. Dependence of yield and residual lignin content of oxidative-organosolvent straw cellulose on the catalyst content in the cooking solution

materials, the yield decreases with almost the same degree of delignification compared to similar cooking of wheat straw without usage of chemical impurities. The optimal values of these parameters of the process of delignification of wheat straw are achieved at a consumption of citric acid 0.5% by weight of absolutely dry raw materials.

Oxidative cooking of wheat straw with a cooking solution containing glacial acetic acid and water in the ratio  $\text{CH}_3\text{COOH} : \text{H}_2\text{O} - 75 : 25$  volume % with the addition of hydrogen peroxide 50% by weight of absolutely dry raw material are used to establish the optimal cooking parameters – temperature and duration of the delignification process,. The delignification process was carried out at a temperature starting from 80 to  $100 \pm 2$  °C, duration from 60 to 180 minutes, hydromodule 10: 1, catalyst consumption 0.5% by weight of absolutely dry raw material Quality indicators of acetic – peroxide straw cellulose are given in table 1.

The process of delignification of vegetable raw materials in the studied system takes place in mild

conditions with significant swelling of plant fibers. The growth of technological parameters, especially temperature, accelerates the process of delignification, which allows to obtain cellulose with high yield and low residual lignin.

Indicators of strength of the obtained organosolvent straw cellulose are shown in Fig. 2. Fibrous semi-finished product obtained at a temperature of 80 °C with the duration of the delignification process 60-120 minutes is failed to grind due to the large amount of indigestion.

Due to the better paper-forming properties of straw cellulose due to the formation of additional hydrogen bonds between polysaccharides and high content of hemicelluloses, with increasing cooking time to 120 minutes, the physical and mechanical properties of the obtained fibrous semi-finished products increase. Further increase in cooking time doesn't improve strength to the large extend. As the result this pulp is recommended for the production of mass bleached paper.

For the mathematical processing of the results, a complete factorial experiment was used. The follow-

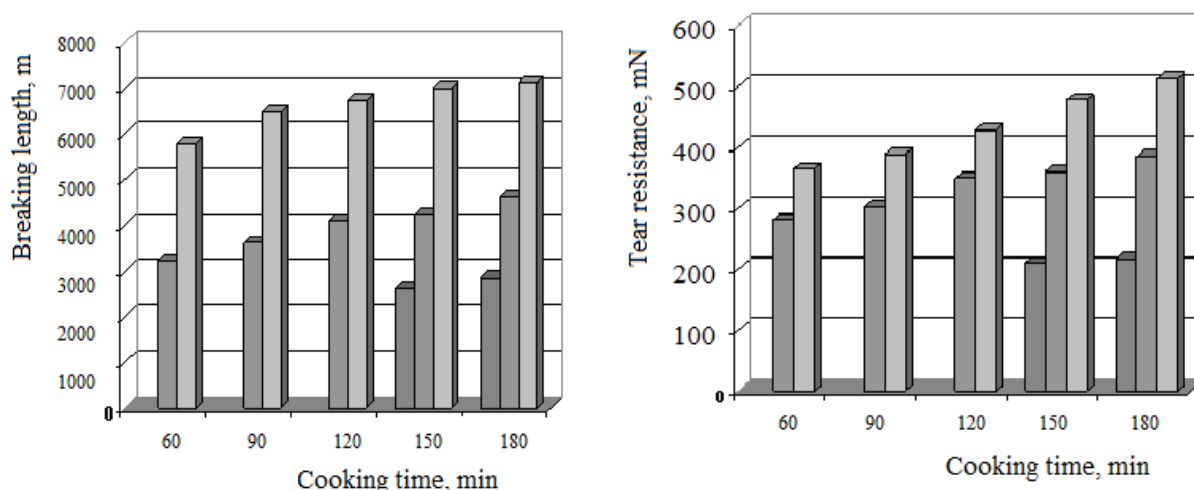


Figure 2. Dependence of breaking length and tear resistance of straw cellulose on the duration of the cooking process wheat straw at different temperatures: ■ – 80°C, ■ – 90°C, ■ – 100°C

Table1

Quality indicators of straw fibrous semi-finished products

Delignification temperature, °C	Quality indicators of fibrous semi-finished products by cooking time, min				
	60	90	120	150	180
Yield of fibrous semi-finished products,% of absolutely dry raw materials					
80	-	84,7	80,4	78,6	73,2
90	76,9	74,7	73,3	65,6	62,1
100	68,7	57,5	56,9	55,6	55,1
Residual lignin content, %					
80	-	6,7	5,6	5,5	5,3
90	6,7	5,5	4,6	4,1	4,0
100	2,4	2,2	1,7	1,5	1,0

ing variables were considered as the main technological parameters influencing the quality indicators of oxidative-organosolvent straw cellulose ( $x_i$ ), which after ranking according to the degree of influence on the output variables ( $Y_i$ ), are located in the following row: cooking temperature, °C ( $x_1$ ); cooking time, min. ( $x_2$ ); pH of the medium ( $x_3$ ); hydraulic module of cooking ( $x_4$ ); degree of compaction ( $x_5$ ); humidity of raw materials ( $x_6$ ); chemical composition of raw materials ( $x_7$ ).

Since vegetable raw materials with the same humidity and chemical composition, degree of compaction, hydromodule and pH of the medium were used for cooking, the factors  $x_1 - x_7$  are constant in the study and therefore weren't taken into account when obtaining regression equations. The following cellulose quality indicators were selected as optimizing parameters: cellulose yield, % ( $Y_1$ ); residual lignin content, % ( $Y_2$ ); tear resistance, mN ( $Y_3$ ); breaking length, m ( $Y_4$ ).

The mathematical model, in accordance with its purpose, should reflect the mechanisms of the studied processes with the greatest degree of accuracy. That is why the purposeful usage of information in order to study the pattern of changes in the mentioned properties should be done by the development and further study of mathematical models. As a result of mathematical processing, regression equations were obtained, which adequately describe the dependences of the initial variables  $Y_i$  on technological factors  $x_i$ :

a) mathematical model for cellulose yield, %

$$Y_1 = +70,422 - 10,2x_1 - 7,25x_2 + 0,375x_1x_2 - 0,33333x_1^2 + 0,51667x_2^2$$

b) mathematical model for the content of residual lignin, %

$$Y_2 = +4,7544 - 2,215x_1 - 1,0483x_2 + 0,2025x_1x_2 - 1,1817x_1^2 + 0,51833x_2^2$$

c) mathematical model in terms of tear resistance, mN

$$Y_3 = +340,22 + 117,33x_1 + 47,833x_2 + 28x_1x_2 - 20,333x_1^2 - 3,8333x_2^2$$

d) mathematical model in terms of breaking length, m

$$Y_4 = +4071,1 + 2068,3x_1 + 593,33x_2 + 120x_1x_2 + 508,33x_1^2 - 146,67x_2^2$$

The optimum point is observed under conditions when factors  $x_1$  and  $x_2$  acquire the following values: cooking temperature  $x_1 = 100$  °C; cooking time  $x_2 = 90$  minutes. The optimum quality indicators of the obtained straw cellulose has the following values: yield – 63.8%, residual lignin content – 1.98% by weight of absolutely dry cellulose, tear resistance – 394 mN, breaking length – 6210 m.

According to the found statistical regression equations  $Y_1 - Y_4$ , multicriteria optimization was performed using the Gauss – Seidel method, and also determined the compromise area of delignification of wheat straw depending on the main technological parameters ( $x_i$ ), which is shown in Fig. 3 (the area is located on the plane  $x_1 - x_2$ ).

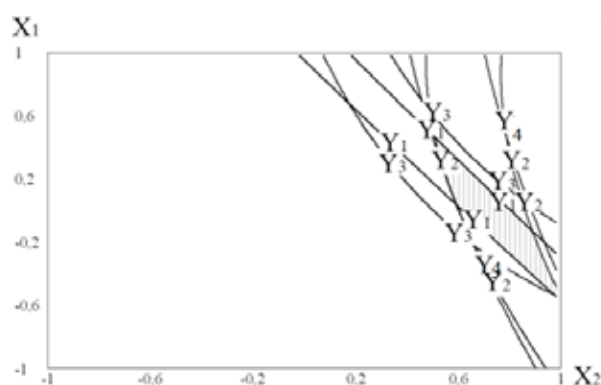


Figure 3. Compromise area of oxidative-organosolvent delignification of wheat straw: 1 – cellulose yield; 2 – residual lignin content; 3 – tear resistance; 4 – breaking length

The analysis of the obtained regression equations allows us to state that the indicators of cellulose quality are more influenced by the temperature of the delignification process.

**Conclusions.** On the basis of the conducted theoretical and experimental researches the usage of citric acid as a catalyst is offered as a resource-saving way of reception of cellulose from stalks of wheat straw. Using the method of experimental planning and analysis of experimental data, the optimal mode of oxidative low-temperature delignification of vegetable raw materials was determined. The proposed cooking is an alternative and environmentally friendly way to obtain cellulose.

#### References:

1. Malik S., Rana V., Joshi G., Gupta P.K., Sharma A. Valorization of Wheat Straw for the Paper Industry: Pre-extraction of Reducing Sugars and Its Effect on Pulping and Papermaking Properties. *ACS Omega*. 2020. No 47. P. 30704–30715.
2. Барбаш В.А., Трембус И.В., Оксентюк Н.Н. Бумага и картон из стеблей сорго сахарного. *Химия растительного сырья*. 2014. № 4. С. 271-278.

3. Кузнецова С.А., Данилов В.Г. Разработка новых экологически безопасных процессов получения целлюлозы. *Вест. Краснояр. ун-та*. 2003. № 2. С. 73–80.
4. Barbash V., Trembus I., Sokolovska N. Performic pulp from wheat straw. *Cellulose chemistry and technology*. 2018. № 52(7-8). P. 673-680.
5. Пен Р.З., Бышев А.В., Шапиро И.Л. и др. Катализируемая делегнификация древесины пероксидом водорода в кислой среде. *Химия растительного сырья*. 2001. № 2. С. 21-30.
6. Trembus I., Semenenko N. Oxidative-organosolvent delignification of wheat straw. *Технічні науки та технології*. 2020. № 1 (19). С. 250-256.
7. Poppius K, Laamanen L, Sundquist J. Multi – Stage peroxyformic acid pulping. 4 – *htIntern. Sump. Wood. Pulping Chem.* 1987. № 2. P. 211-214.
8. Cybulska I, Brudecki GP, Zembrzuska J. Organosolv delignification of agricultural residues (date palm fronds, *Phoenix dactylifera* L.) of the United Arab Emirates. *Applied Energy*. 2017. № 185. P. 1040-1050.
9. Dapiá S, Santos V, Parajó JC. Formic acid-peroxyformic acid pulping of *Fagus sylvatica*. *Journal of Wood Chemistry and Technology*. 2000. № 20. P. 395-413.
10. Malik S., Rana V., Joshi G., Gupta P., Sharma A. Valorization of Wheat Straw for the Paper Industry: Pre-extraction of Reducing Sugars and Its Effect on Pulping and Papermaking Properties. *ACS Omega*. 2020. No 47. P. 30704–30715.
11. Barbash V., Trembus I., Nagorna J. Obtaining pulp from corn stalks. *Chemistry & Chemical Technology*. 2012. No. 1. P. 83–87.
12. Elhelece W.A. Rice Straw as a Raw Material for Pulp and Paper Production. *Encyclopedia of Renewable and Sustainable Materials*. 2020. Volume 2. P. 296–304.
13. Трембус І.В., Соколовська Н.В. Делігніфікація пшеничної соломи в системі  $\text{CH}_3\text{COOH} - \text{H}_2\text{O} - \text{H}_2\text{O}_2$ . *Wshodnioeuropejskie Czasopismo Naukowe East European Scientific Journal*. 2018. № 2. С. 61-66.

#### **Трембус І.В., Гондовська А.С., Тинницька Е.Ю., Михайленко Н.В. РЕСУРСОЩАДНА ОКИСНО-ОРГАНΟΣОЛЬВЕНТНА ТЕХНОЛОГІЯ ОДЕРЖАННЯ СОЛОМ'ЯНИХ ВОЛОКНИСТИХ НАПІВФАБРИКАТІВ**

Обгрунтовано запропонований спосіб одержання целюлози із стебел пшеничної соломи. Вивчено вплив витрат каталізатора – лимонної кислоти на показники якості солом'яних волокнистих напівфабрикатів. Встановлено вплив технологічних параметрів, тривалості і температури окисної делегнифікації рослинної сировини, на показники міцності целюлози. Розроблена технологія дозволяє отримати целюлозу з високими показниками якості: виходом від 55,1 до 84,7%, та вмістом залишкового лігніну від 1,0 до 6,7%, розривною довжиною від 3000 до 7000 м та опором роздиранню від 275 до 520 мН. Отримано рівняння регресії процесу окисно-органосольвентного варіння стебел пшеничної соломи з використанням методу повного факторного експерименту. Методом оптимізації з використанням узагальненої функції бажаності Харінгтона одержано оптимальні параметри проведення процесу делегнифікації рослинної сировини. На відміну від традиційних довготривалих і трудомістких способів отримання целюлозовмісних волокнистих напівфабрикатів, розроблений метод делегнифікації дозволяє зменшити енерговитрати і знизити негативний вплив на навколишнє середовище. Технологічні параметри одержаної солом'яної целюлози дають можливість її використання у виробництві вибілених видів картонно-паперової продукції.

**Ключові слова:** солома пшенична, перексоцтова кислота, каталізатор, делегнифікація, целюлоза, математичні моделі.



УДК 552.52

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/26>**Фролова Л.А.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Шунькін І.С.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Закіпна О.П.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Сухий М.К.**

ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ БЕНТОНІТУ

Глинисті мінерали та їх похідні – це велика родина мінералів, з унікальними за мікроструктурою та фізико-хімічними характеристиками для промислового застосування. Глини та глинисті мінерали такі, як монтморилоніт, вермикуліт, іліт, каолініт і бентоніт, широко використовуються в переробній і нафтовій промисловості, інженерно-будівельних роботах, природоохоронних технологіях, технологіях кераміки та вогнетривких матеріалів, фармацевтиці, переробці харчових продуктів. Глини використовуються в багатьох хімічних процесах через їх реакційну та каталітичну активність. Зазвичай глинистими мінералами є гідратовані силікати алюмінію, магнію та алюмінію, іноді як катіони-замінники присутні лужні та лужноземельні елементи. Враховуючи вищезазначене важливо оцінити склад і фізико-хімічні властивості бентоніту з Черкаського родовища (Україна).

Характеристику бентоніту проводили за допомогою інфрачервоної Фур'є спектроскопії, методів скануючої електронної мікроскопії, енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії, рентгенофазового аналізу та УФ спектроскопії.

Проведені дослідження дозволили охарактеризувати бентонітову глину з урахуванням їх мінералогічного складу, оцінити основні показники мікроструктури, розташування та тип взаємодії між структурними частинками. На електронно-мікроскопічних знімках за морфологічними особливостями бентоніт був охарактеризований як агрегати, що складаються з частинок з середнім розміром 5-10 мкм, що мають лускату структуру.

Рентгенофазовий аналіз показав, що бентоніт вміщує монтморилоніт та кварцит. Рентгенофазовий аналіз дав змогу орієнтовно визначити кількісний вміст і запропонувати формулу  $\text{CaMg}_2\text{AlSi}_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ . На основі дослідження якісного складу були прогнозовані властивості глинистої породи.

Результати свідчать про те, що бентоніт є ефективним наповнювачів полімерних композитів, адсорбентом для видалення  $\text{Cr}(\text{III})$ , перевагою якого є низька вартість матеріалу.

**Ключові слова:** бентоніт, глини, мікрофотографії, ІЧ спектри.

**Постановка проблеми.** В останні роки використання глин у якості адсорбентів, каталізаторів, складових керамічних матеріалів, наповнювачів композитів основі приділено значну увагу в наукових колах і промисловості через значне поліпшення властивостей цих матеріалів у порівнянні з властивостями індивідуальних речовин [1, 2].

**Постановка завдання.** Природні шаруваті силікати, такі як монтморилоніт, який є основним компонентом мінеральних бентонітових глин, мають надзвичайно широке коло використання [3, 4]. Бентонітові породи складаються в основному з одного або кількох мінералів з групи смектитових глинистих мінералів (монт-

морилоніт, бейделіт, нонтроніт, сапоніт, сауконіт, волконскоїт і гекторит), утворених в результаті хімічної зміни скловидного матеріалу магматичного походження.

Властивості бентонітових глин залежать від структури та хімічного складу, обмінних іонів тип і розміру частинок смектиту. Ці властивості включають велику питому поверхню, високу ємність катіонного обміну та інші фізико-хімічні властивості, такі як набухання, пластичність, когезія, стисливість, міцність, розмір частинок, адсорбційні властивості, структура пор, кислотність поверхні та каталітична активність [5, 6].

Бентоніт являє собою алюмосилікат, який у природному вигляді має обмінні катіони  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$  і  $\text{Fe}^{3+}$ . Більшість покладів бентоніту в Україні інтенсивно вивчаються. Ці дослідження привели до їх використання в широкому спектрі технологічних процесів [7-10].

Перспективним є використання глин завдяки їх зручності в експлуатації і високій адсорбційній здатності, термічній стійкості і каталітичній активності. Найбільш високими технологічними властивостями володіють натрієві бентоніти вулканогенно-осадового та гідротермального походження.

Враховуючи все вищезазначене, можна вважати, що дуже цікаво оцінити фізико-хімічні властивості бентоніту з Черкаського родовища (Україна).

Мета роботи – вивчення фізико-хімічних властивостей бентоніту з Черкаського родовища.

#### Виклад основного матеріалу дослідження

Морфологія бентоніту була охарактеризована за допомогою скануючого електронного мікроскопа JSM6390 LV (JEOL, Japan).

Елементний склад визначено за допомогою енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії. ІЧ-спектри були отримані, використовуючи ІЧ-спектрофотометр Spectrum One (Perkin Elmer) в таблетках КВг. Фазовий склад висушених порошоків визначався методом рентгенофазового аналізу (ДРОН-2.0, Со-К $\alpha$ -випромінювання).

Для оцінювання адсорбційної активності використовували модельні розчини сульфату хрому. Ідентифікацію та визначення концентрації хрому, проводили спектрофотометричним аналізом за допомогою спектрофотометра UV 5800 PC.

Ступінь очищення від хрому.

$$\%X = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} 100\% \quad (1)$$

де  $C_0$  - початкова концентрація хрому в розчині,  $C_t$  - концентрація в момент часу  $t$ .

Відомо, що хімічний склад глинистих мінералів непостійний і значною мірою залежить від умов формування породи, геологічного віку, вмісту зв'язаної води тощо. Метод електронної мікроскопії дозволяє встановити мінеральний склад, розміри, форму частинок глинистих порід, тому на першому етапі визначали гранулометричний склад глинистих порід бентоніту Черкаського родовища.

Зображення растрової мікроскопії свідчать, що бентоніт має шарувату структуру (рис. 1). Шари силікатів утворюють скупчення з прошарками між ними, поверхня мінералів є високорозвиненою – володіє рельєфною топологією, що також є немаловажним чинником у збільшенні ступеню адсорбції.

Для визначення розподілу оксидів в зразках глинистого мінералу була виконана серія дослідів з визначення елементного складу у обраних точках на поверхні агрегатів і аналіз вмісту хімічних елементів в усередненій пробі. На спектрограмі чітко реєструються інтенсивні піки відповідні алюмінію і силіцію, а кількісний перерахунок на вміст оксидів дає характерне для бентоніту співвідношення (табл. 1).

Результати енергодисперсійної рентгенівської спектроскопії виявили, що частинки монтморилоніту в основному складаються з елементів Si, O та Al, Mg, Ca, Fe.

Відомо, що кожній сполуці в складі глини притаманна своя кристалічна решітка зі специфічними параметрами (значеннями величин

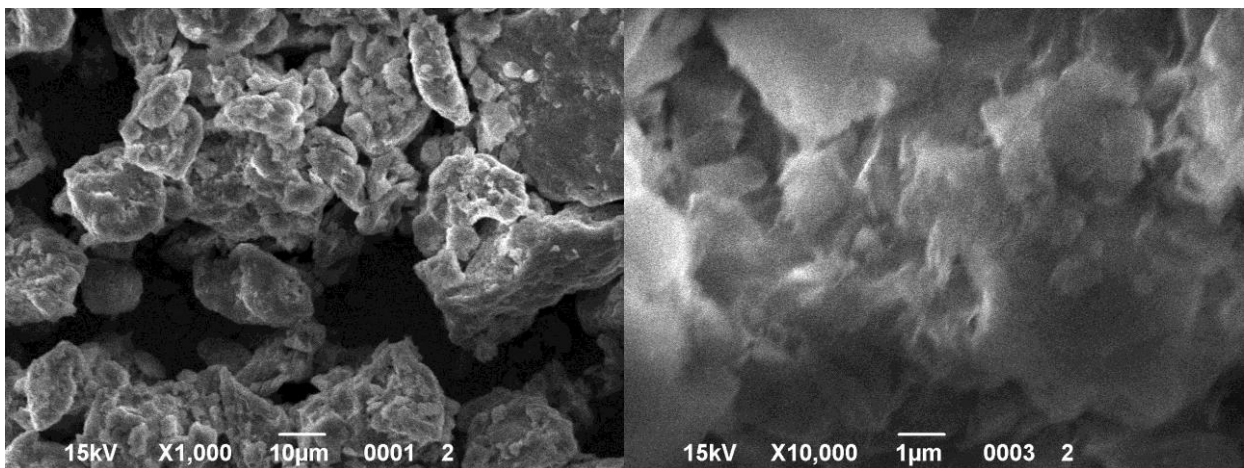


Рис. 1. СЕМ фотографії бентоніту

міжплощинних відстаней  $d$  і відносних інтенсивностей  $I$  для кожної лінії), що характерні тільки цій фазі. Отримані в результаті рентгенофазового аналізу дифрактограми зразків глини (рис. 2) показали, що характерним є високий вміст

монтморилоніту. Досліджуемий зразок містить переважно монтморилоніт PDF 020239 Хімічна формула  $\text{CaMg}_2\text{AlSi}_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ , відповідно серія рефлексів: 9,87; 4,43; 3,02; 2,54; 2,42; 2,27; 1,97; 1,69; 1,50; 1,45, 1,29 та кварц ( $\alpha\text{-SiO}_2$ ) відпо-

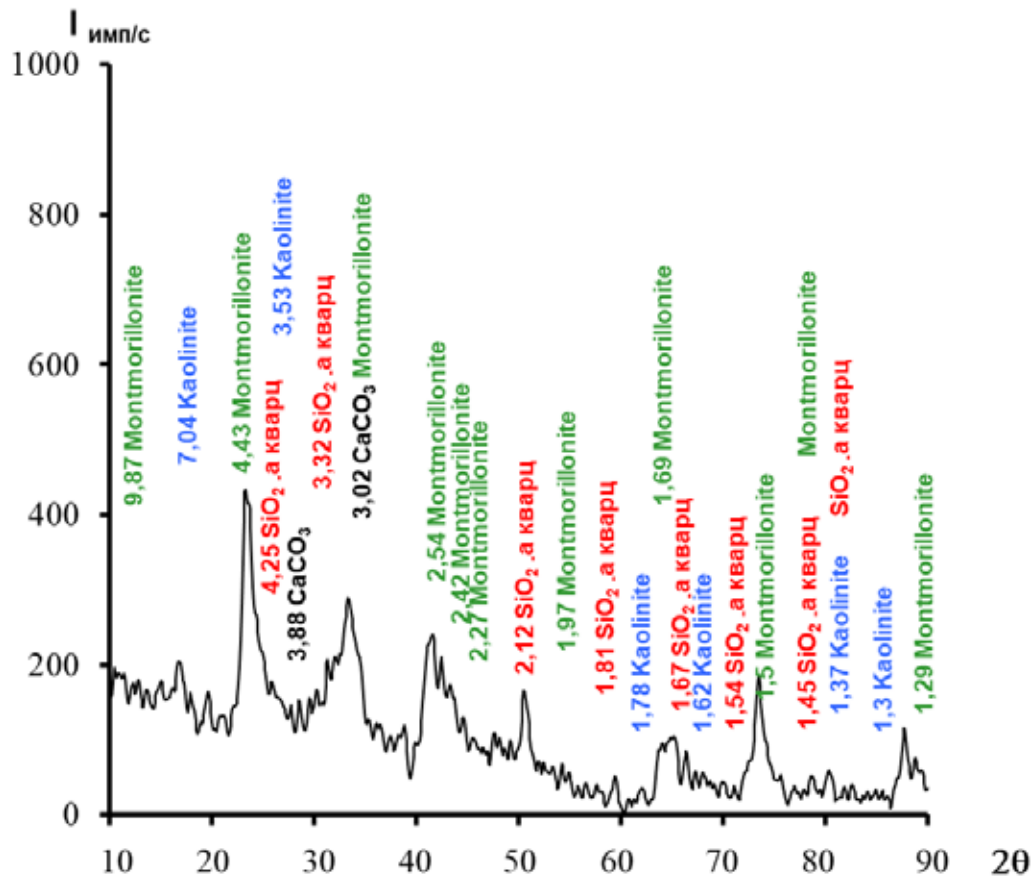


Рис. 2. Рентгенограма бентоніту

Таблиця 1

Елементний склад бентоніту

Елемент	Умов.	Інтенсивність	Ваговий %	Ваговий %	Атомний %	Сполука %	Формула	Число
	Конц.	Попр.		Сигма				Іонів
Na K	1.18	1.1040	2.67	0.14	2.42	3.60	Na <sub>2</sub> O	0.46
Mg K	1.10	0.9214	2.97	0.13	2.54	4.92	MgO	0.49
Al K	3.73	0.9557	9.73	0.19	7.50	18.38	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.44
Si K	10.81	0.9156	29.47	0.32	21.84	63.05	SiO <sub>2</sub>	4.18
S K	0.04	0.8286	0.12	0.08	0.08	0.29	SO <sub>3</sub>	0.01
Cl K	0.04	0.7498	0.15	0.09	0.09	0.00		0.02
K K	0.21	1.0139	0.52	0.11	0.27	0.62	K <sub>2</sub> O	0.05
Ca K	0.82	0.9674	2.11	0.15	1.10	2.96	CaO	0.21
Ti K	0.10	0.8120	0.29	0.15	0.13	0.49	TiO <sub>2</sub>	0.02
Fe K	1.27	0.8127	3.89	0.33	1.45	5.55	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.28
O			48.10	0.40	62.58			11.98
Iтого			100.00					
							Сума катіонів	7.15

відно серія рефлексів: 4,25; 3,32; 2,12; 1,81; 1,67; 1,54; 1,45; 1,37.

ІЧ спектр загалом можна розділити на три області, що відповідають присутності  $\text{OH}^-$  груп: область високих значень хвильового числа від 3700 до 3200  $\text{cm}^{-1}$ , область середнього значення з 1700 до 1600  $\text{cm}^{-1}$  і низькохвильова область від 1000 до 500  $\text{cm}^{-1}$ . Смуги поглинання в області високих значень довжини хвилі валентні коливання структурних  $\text{OH}^-$  груп і гігроскопічної води.

Середньохвильова область показує смуги поглинання, пов'язані присутністю гігроскопічних, адсорбованих і структурних  $\text{OH}^-$  груп. Смуги за низьких значень хвильового числа відповідають коливанням  $\text{Si}$  (або  $\text{Al}$ )– $\text{O}$  та октаедрично розташованого катіону  $\text{Me-OH}$ . Всі відповідні довжини хвилі наведені в таблиці 2.

Наявність значної кількості монтморилоніту свідчить про відносно високу адсорбційну ємність

глинистої породи і значну пористість. Кожна частинка бентоніту у водному розчині має великий негативний заряд. Таким чином він має тенденцію притягувати будь-які позитивно заряджені іони до своєї поверхні. Негативний заряд частинок бентоніту дає змогу притягувати до поверхні катіони для нейтралізації заряду. Структура бентоніту є така, що складається з октаедричного прошарку між тетраедричними шарами [11].

Тобто поверхневий заряд, що має від'ємне значення відкриває значний потенціал використання у якості адсорбентів саме катіонів (наприклад, важких металів). Відомо, що поверхня частинок глини покрита гідроксильними групами. Наявність цих груп на поверхні в даний час підтверджено чисельними експериментальними даними.

Це припущення підтверджується спектроскопічними дослідженнями адсорбції не тільки катіонів хрому, але і метиленового синього. Але позитивних результатів у випадку адсорбції метиленового синього не виявлено. Барвники основного характеру, такі як метиленовий синій, реагують з продуктами гідролізу бентоніту, що мають негативний заряд, при цьому утворюється розчинний комплекс (відповідний пік при 248 нм).

**Висновки.** Проведені дослідження дозволили охарактеризувати бентонітову глину з урахуванням їх мінералогічного складу, оцінити основні показники мікроструктури, розташування та тип взаємодії між структурними частинками. На електронно-мікроскопічних знімках за морфологічними особливостями глинисті мінерали були охарактеризовані як агломерати, що складаються

Таблиця 2

Основні показники ІЧ спектрограми

Зв'язок	Хвильове число, $\text{cm}^{-1}$
$\text{Al}_2\text{OH}$	3627
$\text{H}_2\text{O}$	3441
$\text{H}_2\text{O}$	1647
$\text{Si-O-Si(Al)-O}$	1090
$\text{Si-O}$	1002
$\text{Al}_2\text{OH}$	948
$\text{AlFeOH}$	870
$\text{AlMgOH}$	811
$\text{Al}^{3+}\text{-Fe}^{3+}$	687
$\text{Si-O-Al}$	526
$\text{Si-O}$	470

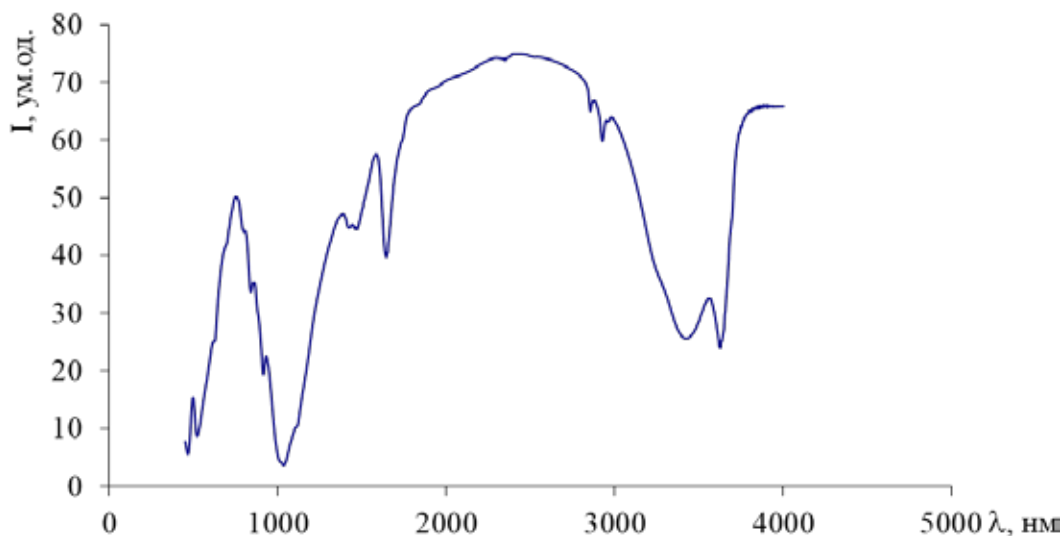
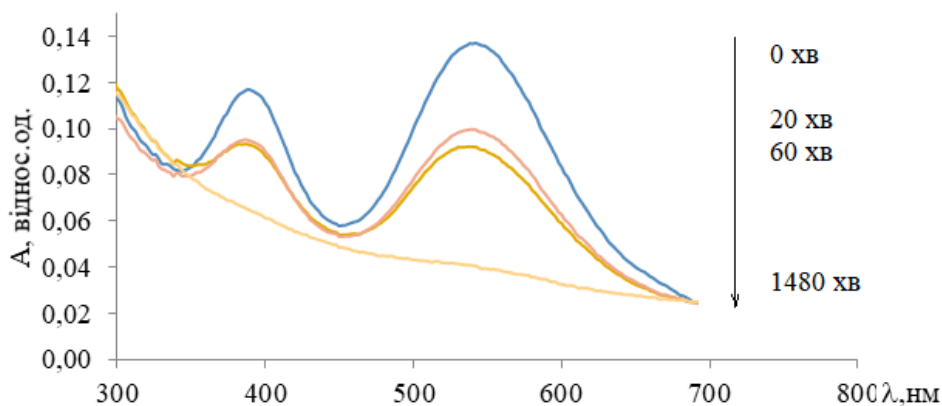
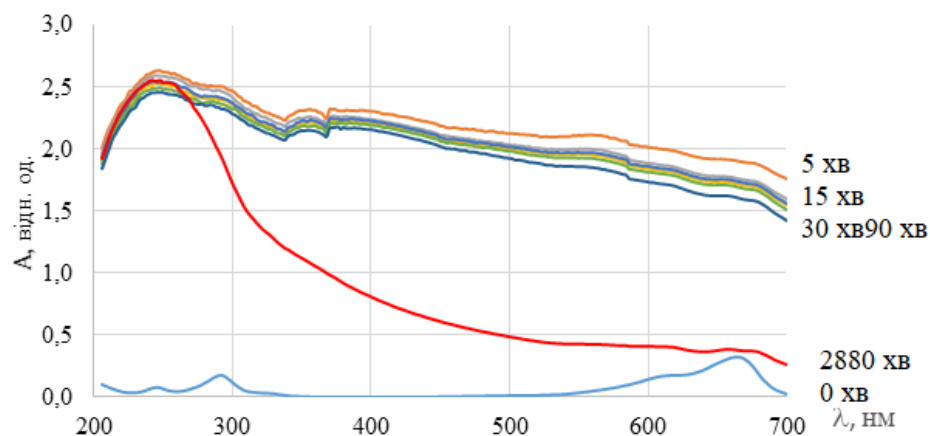


Рис. 3. ІЧ спектрограма бентоніту



а)



б)

Рис. 4. УФ-спектри адсорбції  $\text{Cr}^{3+}$  (а) і метиленового синього (б) бентонитом

з частинок з середнім розміром 5-10 мкм, що мають лускату структуру.

Рентгенофазовий аналіз показав, що бентоніт вміщує монтморилоніт і кварцит та дав змогу орієнтовно визначити кількісний вміст і запропо-

нувати формулу  $\text{CaMg}_2\text{AlSi}_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ . На основі дослідження якісного складу були прогнозовані властивості глинистої породи. Результати, отримані в цьому дослідженні, показали, що бентоніт є ефективним для адсорбції катіонів хрому.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ:

1. Ouahabi M. E. et al. Modified mineral phases during clay ceramic firing, *Clays and Clay Minerals*. 2015. 63. 5, P. 404-413.
2. Otunola B. O., Ololade O. O. A review on the application of clay minerals as heavy metal adsorbents for remediation purposes, *Environmental Technology & Innovation*. 2020. 18, P. 100692.
3. Shahadat M. et al. Regeneration performance of clay-based adsorbents for the removal of industrial dyes: A review, *RSC advances*. 2018. 8. 43, P. 24571-24587.
4. Haase H., Schanz T. Compressibility and saturated hydraulic permeability of clay-polymer composites—experimental and theoretical analysis, *Applied Clay Science*. 2016. 130, P. 62-75.
5. Jlassi K., Krupa I., Chehimi M. M. Overview: clay preparation, properties, modification, *Clay-polymer nanocomposites*. 2017, P. 1-28.
6. El-Nagar D. A., Sary D. H. Synthesis and characterization of nano bentonite and its effect on some properties of sandy soils, *Soil and Tillage Research*. 2021. 208, P. 104872.
7. Mi J. et al. Changes in soil biochemical properties following application of bentonite as a soil amendment, *European Journal of Soil Biology*. 2021. 102, P. 103251.
8. Zhou Y., Wang G. H., Yuan Y. F. Basic properties and engineering application of bentonite-cement-water glass grouting, *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2020. 24. 9, P. 2742-2750.

9. Alexander J. A. et al. Surface modification of low-cost bentonite adsorbents—A review, *Particulate Science and Technology*. 2019. 37. 5, P. 538-549.

10. Magzoub M. et al. Thermochemical upgrading of calcium bentonite for drilling fluid applications, *Journal of Energy Resources Technology*. 2019. 141. P. 4.

11. Іщенко В. М., Колотуша Т. П., Полумбрик О. М. Використання бентонітів у харчовій промисловості, *Харчова промисловість*. 2013. 14. С. 34-36.

#### **Frolova L.A., Shunkin I.S., Zakipna O.P., Sukhyy M.K. INVESTIGATION OF PHYSIC-CHEMICAL PROPERTIES BENTONITE**

*Clay minerals and their derivatives are a large family of minerals, with unique microstructure and physicochemical characteristics for industrial use. Clays and clay minerals such as montmorillonite, vermiculite, illite, kaolinite and bentonite are widely used in the refining and oil industries, civil engineering, environmental technologies, ceramics and refractory materials, pharmaceuticals, and processing. Clays are used in many chemical processes due to their reactive and catalytic activity. Clay minerals are usually hydrated silicates of aluminum, magnesium and aluminum, sometimes alkaline and alkaline earth elements are present as substitution cations. Given the above, it is important to assess the composition and physicochemical properties of bentonite from the Cherkasy deposit (Ukraine).*

*Bentonite was characterized by infrared Fourier spectroscopy, scanning electron microscopy, energy-dispersive X-ray spectroscopy, X-ray phase analysis, and UV spectroscopy.*

*The conducted researches allowed to characterize bentonite clay taking into account their mineralogical composition, to estimate the main indicators of microstructure, location and type of interaction between structural particles. In electron microscopic images, the morphological features of bentonite were characterized as agglomerates consisting of particles with an average size of 5-10  $\mu\text{m}$ , having a scaly structure.*

*X-ray analysis showed that bentonite contains montmorillonite and quartzite. X-ray phase analysis made it possible to tentatively quantify the content and propose the formula  $\text{CaMg}_2\text{AlSi}_4(\text{OH})_2\text{H}_2\text{O}$ . Based on the study of the qualitative composition, the properties of the clay rock were predicted.*

*The results indicate that bentonite is an effective filler of polymer composites, an adsorbent for the removal of Cr(III), the advantage of which is the low cost of the material.*

**Key words:** bentonite, clays, microphotographs, IR spectra.

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/27>**Штефан В.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Нкука Мабіала Б.Д.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Кануннікова Н.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Кобзев О.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

## ЕЛЕКТРОХІМІЧНЕ ФОРМУВАННЯ ОКСИДНИХ ПОКРИТТІВ НА СПЛАВІ ЦИРКОНІЮ Е110

*Вирішення важливих питань захисту конструкційних матеріалів обладнання атомної енергетики від різних типів корозійного руйнування є пріоритетним завданням, яке обумовлює необхідність розробки нових способів отримання високоефективних та надійних покриттів. В роботі проаналізовано, що одним з результативних методів одержання на поверхні металів оксидних покриттів з необхідним набором функціональних властивостей є метод мікродугового оксидування. Метою роботи є дослідження впливу концентрації пірофосфату калію на процес формування та морфологію оксидних покриттів на сплаві цирконію Е110.*

*Представлені результати експериментальних досліджень свідчать про те, що варіювання концентрації компоненту електроліту істотно не впливає на характер формувальних залежностей, яким характерно три ділянки процесу МДО: доіскрова, іскрова та мікродугова області. Показано, що ділянки залежностей, які відповідають доіскровій області одержання покриття, є лінійними, що свідчить про ріст товщини плівки. Встановлено час до початку іскріння при варіюванні концентрації пірофосфату калію при густинах струму 4-10 А/м<sup>2</sup>. З'ясовано, що збільшення концентрації вмісту компоненту в електроліті призводить до зниження напруги формування оксидних покриттів. Встановлено, що оксидні покриття на цирконієвому сплаві Е110, які сформовані при концентрацією 0,5 та 0,75 моль/л, мають білий колір, проте збільшення вмісту компоненту до 1 моль/л змінює колір покриття на світло-сірий та підвищує суцільність. На підставі вивчення морфології поверхні сплаву цирконію Е110 після МДО в пірофосфаті калію в діапазоні концентрації 0,5...1 моль/л зроблено спостереження, що при підвищенні вмісту компоненту електроліту розмір комірок значно збільшується.*

**Ключові слова:** сплав цирконію, оксидне покриття, морфологія, пірофосфат калію, напруга, мікродуги.

**Постановка проблеми.** Розробка нових способів отримання високоефективних та надійних покриттів для захисту та зміцнення обладнання атомної енергетики є однією із самих актуальних завдань сучасної науки у зв'язку із ростом жорсткості умов експлуатації, агресивності технологічного середовища та відповідно до підвищення вимог до конструкційних матеріалів. Незважаючи на високу корозійну стійкість цирконієвих сплавів, адекватні механічні властивості та низький поперечний переріз теплових нейтронів, у таких суворих умовах схильні до впливу корозійних сил, що обмежують термін служби [1-4].

Додатковою проблемою, пов'язаною зі сплавами цирконію є поглинання водню, який може

бути отриманий в результаті корозії оболонки або радіолізу води. Частина іонів водню проникає через окалину та розчиняється у металевій матриці та осаджується у вигляді крихких гідридів ( $ZrH_x$ ), коли його вміст перевищує межу розчинності то відбувається зниження пластичності та міцності оболонки труби. Цей ефект значно знижує експлуатаційні характеристики облицювання та може призвести до аварійних ситуацій світового рівня [5-7].

Мікродугове оксидування (МДО) це процес, що є розвитком класичного оксидування. Відмінність його полягає у тому, що при певній напрузі відбувається електричний пробій оксидної плівки, що супроводжується іскрінням. МДО є перспективним методом формування захисних покриттів



на вентильних металах таких, як алюміній, титан [8-14], цирконій [15] та інші.

Завдяки своїм властивостям покриття МДО представляють великий інтерес для елементів конструкційних матеріалів ядерного реактору, які захищають від корозії, прискороженого окислення при високих температурах, крихкості та поглинання кисню та водню [16-19].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогоднішній день для захисту від корозії відомі сплави цирконію на основі заліза, хрому і міді, що мають явну перевагу по корозійній стійкості перед такими сплавами як циркалої та бінарними сплавами з ніобієм. Однак, недостатню увагу було приділено дослідженням, які були б спрямовані на отримання та вивчення властивостей оксидних плівок на цирконії з метою захисту від корозії. Так, у роботі [7] запропоновано спосіб одержання оксидних покриттів на цирконії в 1 моль/л розчині  $H_2SO_4$ . Формування відбувається за допомогою двостадійного процесу, що складається з гальваностатичного анодування при густині струму  $100 \text{ mA/cm}^2$ . Дослідження впливу анодування цирконію на хімічний склад та корозійну стійкість цирконію в розчині Рінгера показало, що напруга анодування дуже впливає на поверхневі властивості отриманих анодно-оксидних плівок. Встановлено, що високий вміст сірки в оксидному покритті негативно впливає на загальну корозійну стійкість цирконію, тоді як його стійкість до піттингової корозії виявляється вищою після обробки при більш високих напругах. Анодування при напрузі вище 80 знижує вміст сірки в плівках і одночасно підвищує корозійну стійкість цирконію.

Пористі плівки отримані вченими [6] на цирконії, які сформовано в розчинах сірчаної кислоти із додаванням фторидів, мають правильно організовану трубчасту структуру з порами діаметром від 10 до 100 нм. Серед останніх наукових публікацій слід відмітити розробки авторів [20-22], які полягають в одержанні покриттів у два етапи на сплаві цирконію E110 (Zr1%Nb). На першому етапі здійснюють анодування у фторидних електролітах при напрузі 95-13 В та густині струму  $10\text{-}20 \text{ mA/cm}^2$ . Другий етап містить електрокатодну поляризацію цирконію при напрузі 200-300 В та густині струму  $1\text{-}5 \text{ mA/cm}^2$ . Для підвищення антикорозійних та ізоляційних властивостей анодних покриттів до електроліту запропоновано додавати етиленгліколь або гліцерин.

МДО проводили у водному розчині гіпофосфіту натрію (5 г/л) і силікату натрію (9 г/л)

з додавання субмікронного порошку оксиду ітрію (6 г/л) при густині струму 20, 30 і  $40 \text{ A/dm}^2$  протягом 20 хв. Середній розмір частинок порошку становив  $\sim 0,28 \text{ мкм}$ . Дослідження поперечних перерізів покриттів показало, що товщина МДО-покриттів збільшується з підвищенням густини струму обробки з 15 до 35  $\text{мкм}$ . Морфологія поверхні покриттів характеризується ділянками кратероподібної структури з порами в центрах кратерів, кулястою структурою, і адсорбованими частинками оксиду ітрію розміром  $\sim 600 \text{ нм}$ . У структурі покриттів поперечного перерізу є три шари покриття: бар'єрний, середньопористий і зовнішній шари із струморозрядними каналами [23, 24, 28-30].

Однак на сьогоднішній день одним із важливих завдань захисту конструкційних матеріалів обладнання атомної енергетики від корозії є одностадійне отримання різноманітних високотемпературних оксидних структур на цирконієвих сплавах, у тому числі і перспективних для застосування в даній галузі.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження впливу концентрації пірофосфату калію на процес формування та морфологію оксидних покриттів на сплаві цирконію E110.

**Виклад основного матеріалу.** Формування оксидних покриттів на цирконієвому сплаві здійснювали в гальваностатичному режимі із застосуванням джерела постійного струму Б5-50 в електрохімічній комірці, яка представляла собою термостійкий скляний електролізер об'ємом 100 мл із системою водяного охолодження. Матеріал робочого електрода – сплав цирконію E110 (виробництва ДП «Цирконій», Україна) з робочою поверхнею  $70 \text{ мм}^2$ , складом, %: 97.9881~98.9527 Zr; 0.94~1.02 Nb;  $\sim 0.012$  Fe; 0.07~0.93 O; 0.0008~0.0014 N; 0.008~0.01 C; 0.015~0.036 Hf;  $<0.0005$  F; 0.001~0.002 Si. Допоміжним електродом слугував сплав ОТ4-1. Оксидування проводили в електроліті пірофосфату калію концентрацією 0,5; 0,75 та 1 моль/л при значеннях густини струму 4; 6 та  $10 \text{ A/m}^2$ . Значення напруги вимірювали вольтметром M2018 та сили струму – амперметром M2044. Перемішування електроліту здійснювали магнітною мішалкою MM-5 [23-27].

Дослідження морфології отриманих покриттів проводили за допомогою металографічного мікроскопу Leica DM ILM з цифровою відеокамерою Leica DFC 295.

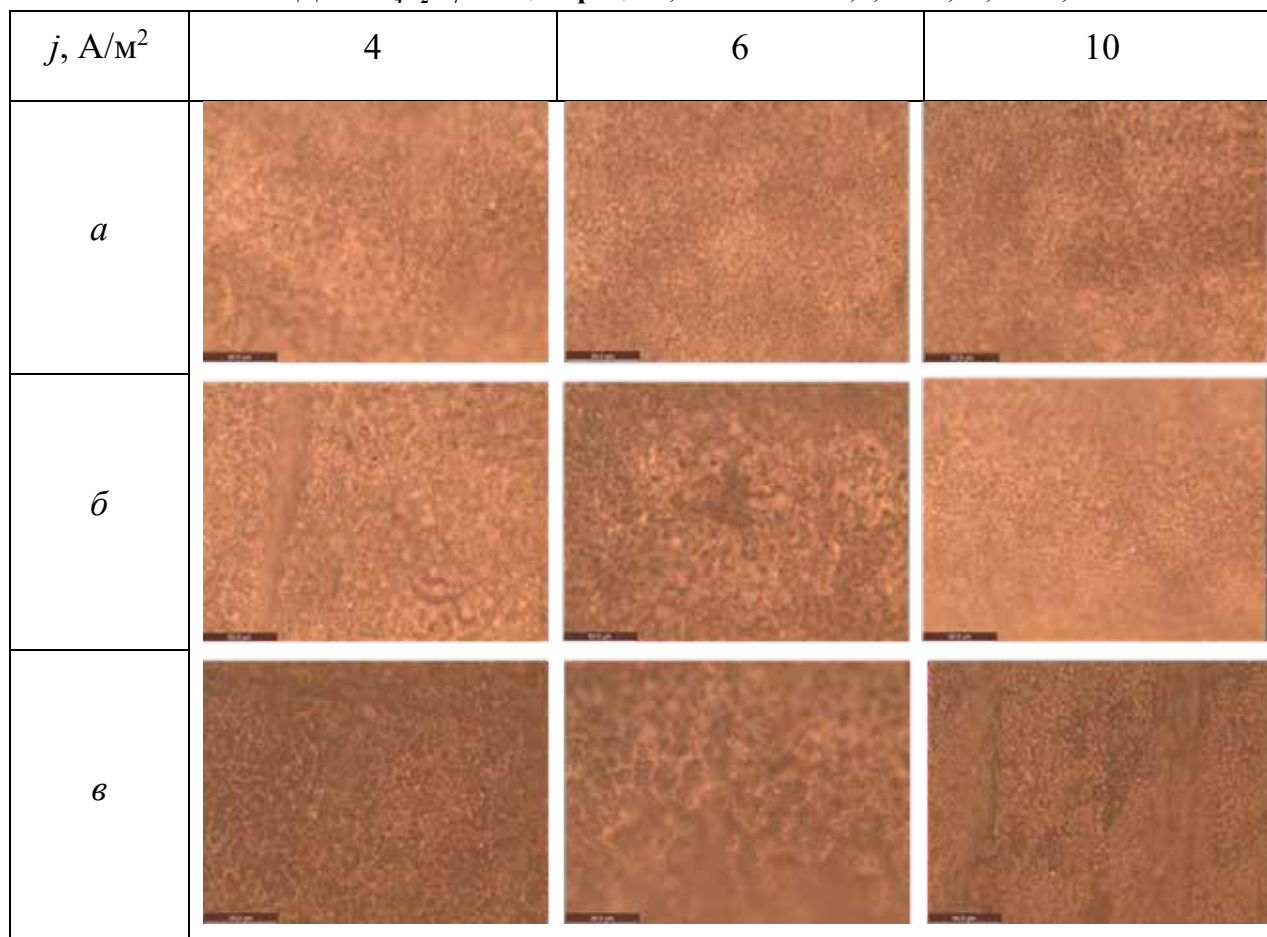
В процесі пошуку нового електроліту проведені спроби оксидування цирконію сплаву E110 у розчинах різних сполук ( $NaOH$ ,  $H_2SO_4$ ,  $K_4P_2O_7$ ),



Залежність часу початку іскріння та мікродуг в залежності від концентрації компоненту електроліту

Концентрація, моль/л	Іскріння		Мікродуги	
	Час, с	Напруга, В	Час, с	Напруга, В
$j = 4 \text{ A/m}^2$				
0,5	40	44	480	150
0,75	50	60	120	120
1,0	50	55	150	102
$j = 6 \text{ A/m}^2$				
0,5	20	40	150	151
0,75	50	100	150	114
1,0	30	60	120	105
$j = 10 \text{ A/m}^2$				
0,5	20	50	270	150
0,75	30	107	40	115
1,0	50	70	120	102

Таблиця 2

Мікрофотографії поверхні сплаву цирконію E110 після МДО в  $\text{K}_4\text{P}_2\text{O}_7$  концентрацією, моль/л: а – 0,5; б – 0,75; в – 1,0

Оксидні покриття, сформовані у розчині пірофосфату калію концентрацією 0,5 та 0,75 моль/л мають білий колір та є не суцільними. Проте підвищення густини струму до  $10 \text{ A/m}^2$  при формуванні оксидного покриття з концентрацією компо-

ненту 0,75 моль/л сприяє одержанню переважно суцільного покриття. При збільшенні концентрації до 1 моль/л відбувається зміна кольору покриття на світло-сірий та покриття є суцільними та добре зчеплені із основою.

На зовнішній поверхні сплаву цирконію E110 після МДО в пірофосфаті калію в діапазоні концентрації 0,5...1 моль/л спостерігаються нерівності із комірковою текстурою (Табл. 2). Аналіз морфології оксидних покриттів, які одержано при різних концентраціях свідчить, що менший розмір комірок спостерігається при концентрації 0,75 моль/л та густині струму 10 А/м<sup>2</sup>, який складає 50-100 мкм (Табл. 2, б). При підвищенні концентрації компонента електроліту розмір комірок значно збільшується, що можливо вплине на функціональні властивості оксидних покриттів.

**Висновки.** Встановлено, що варіювання концентрації K<sub>4</sub>P<sub>2</sub>O<sub>7</sub> не суттєво впливає на характер формувальних залежностей процесу МДО сплаву цирконію E110, яким характерно три області. Представлені результати свідчать про те, що збільшення концентрації пірофосфату калію призводить до зниження напруги формування оксидних покриттів. Отримані оксидні покриття мають білий та сіро-білий колір в залежності від концентрації пірофосфату калію. Дослідження морфології одержаних оксидних покриттів показали, що підвищення концентрації компонента електроліту збільшує розмір комірок від 50 до 200 мкм.

#### Список літератури:

1. Branzoi I.V., Iordoc M., Codescu M. Electrochemical studies on the stability and corrosion resistance of new zirconium-based alloys for biomedical applications. *Surf. Interface Anal.* 2008. Vol. 40, № 3-4. P. 167-173.
2. Rosalbino F., Maccio D., Giannoni P., et al. Study of the in vitro corrosion behavior and biocompatibility of Zr-2.5 Nb and Zr-1.5Nb-1Ta (at %) crystalline alloys. *J. Mater. Sci.: Mater. Med.* 2011. Vol. 22, № 7. P. 1293-1302.
3. Трушкина Т.В., Михеев А.Е., Гирн А.В., Алякрещкий Р.В., Раводина Д.В. Морфология и пористость поверхности оксидных покрытий. *Вестник СибГАУ.* 2014. № 2(54). С. 144-148.
4. Shin H., Jeong D.-K., Lee J., Sung M.M., Kim J. Formation of TiO<sub>2</sub> and ZrO<sub>2</sub> nanotubes using atomic layer deposition with ultraprecise control of the wall thickness. *Advanced Materials.* 2004. Vol. 16.(14). P. 1197-1200.
5. Мирзоев Р.А., Давыдов А.Д. Анодные процессы электрохимической и химической обработки металлов. Санкт-Петербург, Изд-во Политехнического университета, 2013. 382 с.
6. Fidan S., Muhaffel F., Riool M., Cempura G., L.de Boer, Zaat S.A.J., Czyrsk -Filemonowicz A., Cimenoglu H. Fabrication of oxide layer on zirconium by micro-arc oxidation: Structural and antimicrobial characteristics. *Materials Science and Engineering: C.* 2017. Vol. 71. P. 565-569.
7. Sowa, M., Łastówka, D., Kukharenko, A.I. et al. Characterisation of anodic oxide films on zirconium formed in sulphuric acid: XPS and corrosion resistance investigations. *J Solid State Electrochem.* 2017. Vol. 21. P. 203–210.
8. Shtefan, V. V., Smirnova, A. Y. Synthesis of Ce-, Zr-, and Cu-containing oxide coatings on titanium using microarc oxidation. *Russian Journal of Electrochemistry.* 2015. Vol. 51(12). P. 1168-1175.
9. Shtefan, V. V., Smirnova, A. Y. Electrochemical formation of cerium-containing oxide coatings on titanium. *Russian Journal of Applied Chemistry.* 2013. Vol. 86(12). P. 1842-1846.
10. Шев'якін С.В., Штефан В.В., Смирнова О.Ю. Каталітична активність МДО-покривів на сплаві титану допованих РРЕ. *Вісник НТУ «ХПІ».* 2010. № 30. С. 200 – 204.
11. Штефан В.В., Смирнова О.Ю., Стеценко Г.В. Одержання церійвмісних каталітичних систем. *Вісник НТУ «ХПІ».* 2013. № 47. С. 129 – 135.
12. Штефан В.В., Смирнова А.Ю. О строении церийсодержащих оксидных покрытий на титане. *Вопросы химии и химической технологии.* 2013. № 4. С. 195 – 197.
13. Штефан В.В., Смирнова А.Ю. Электрохимическое формирование церийсодержащих каталитических материалов. *Перспективные материалы.* 2014. № 1. С. 60 – 64.
14. Штефан В., Байрачний Б., Тульська А., Смирнова О. Корозійна поведінка феросплавних та оксидних матеріалів на основі титану. *Фізико-хімічна механіка матеріалів.* 2014. № 10(Т. 1). С. 84 – 88.
15. Shtefan, V. V., Bairachnyi, B. I., Lisachuk, G. V., Smyrnova, O. Y., Zuyok, V. A., Rud, R. O., Voronina, O. V. Corrosion of Aluminum in Contact with Oxidized Titanium and Zirconium. *Materials Science.* 2016. Vol. 51(5). P. 711-718.
16. Trivinho-Strixino F., Guimarães F.E.G., Pereira E.C. Zirconium oxide anodic films: Optical and structural properties. *Chemical Physics Letters.* 2008. Vol. 461(1-3). P. 82-86.
17. S. Li J., Bai X., Zhang D., Li H. Characterization and structure study of the anodic oxide film on Zircaloy-4 synthesized using NaOH electrolytes. *App. Surf. Sci.* 2006. Vol. 252, P. 7436–7441.
18. Ракоч А.Г., Хохлов В.В., Лебедева Н.А., Магурова Ю.В. Модельные представления о механизме микродугового оксидирования металлических материалов и управление этим процессом. *Защита металлов.* 2006. Т. 42. № 2. С. 173–184.
19. Shtefan, V. V., Smirnova, A. Y. Oxidation of titanium in Zr-and Mo-containing solutions. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces.* 2017. Vol. 53(2). P. 322-328.

20. Смирнова А.Ю., Штефан В.В. Коррозионная стойкость МДО-покрытий на титане, сформированных в W-, Mo-, V-, Se-содержащих электролитах. *Коррозия: Материалы, защита*. 2014. № 8. С. 14-19.
21. Petrenyov I.A., Kamalov R.V., Vokhmintsev A.S., Martemyanov N.A., Weinstein I.A. Nanostructural features of anodic zirconia synthesized using different temperature modes. *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1124. Article number 022004.
22. Chen Q., Yang W., Zhu J., Fu L., Li D., Zhou L. In situ fluorine doped ZrO<sub>2-x</sub> nanotubes for efficient visible light photocatalytic activity. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 2019. Vol. 30(1). P. 701-710.
23. Tsuchiya H., Schmuki P. Thick self-organized porous zirconium oxide formed in H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>/NH<sub>4</sub>F electrolytes. *Electroch. Commun.* 2004. Vol. 6, P. 1131–1134.
24. Llewelyn Leach J.S., Pearson B.R. The effect of foreign ions upon the electrical characteristics of anodic ZrO<sub>2</sub> films. *Electrochimica Acta*. 1984. Vol. 29(9). P. 1271-1282.
25. Штефан В.В., Смирнова О.Ю., Варчак О.Г. Вплив сполук PPE на мікродугове окисдування сплаву титану ОТ. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2009. № 21. С. 115 – 120.
26. Штефан В.В., Шевякин С.В., Смирнова А.Ю. Кинетика формирования церий- и вольфрамсодержащих МДО-покрытий на титане. *Вопросы химии и химической технологии*. 2011. № 4. С. 292 – 295.
27. Штефан В.В., Дементій А.В., Смирнова О.Ю., Коваленко В.Ю., Фоміна Л.П. Одержання церійвмісних каталізаторів на титані методом мікродугового окисдування. *Вісник НТУ «ХПИ»*. 2011. № 59. С. 131 – 134.
28. Tsuchiya H., Macak J.M., Sieber I., Schmuki P. Self-organized high-aspect-ratio nanoporous zirconium oxides prepared by electrochemical anodization. *Small*. 2005. Vol. 1, P. 722–725.
29. Lee W.J., Smyrl W.H. Zirconium oxide nanotubes synthesized via direct electrochemical anodization. *Electroch. Solid-State Lett.* 2005. Vol. 8:B7–B9.
30. Berger S., Faltenbacher J., Bauer S., Schmuki P. Enhanced self-ordering of anodic ZrO<sub>2</sub> nanotubes in inorganic and organic electrolytes using two-step anodization. *Phys. Stat. Sol. (RRL)*. 2008. Vol. 2. P. 102–104.

#### **Shtefan V.V., Hkouka Mabila B.D., Kanunnikova N.O., Kobziev O.V. ELECTROCHEMICAL FORMATION OF OXIDE COATINGS ON ZIRCONIUM ALLOY E110**

*Addressing important issues of protection of structural materials of nuclear power equipment from various types of corrosion destruction is a priority, which necessitates the development of new ways to obtain highly efficient and reliable coatings. The paper analyzes that one of the effective methods of obtaining oxide coatings on the surface of metals with the required set of functional properties is the method of microarc oxidation. The aim of the work is to study the influence of potassium pyrophosphate concentration on the formation process and morphology of oxide coatings on E110 zirconium alloy.*

*The presented results of experimental studies indicate that the variation in the concentration of the electrolyte component does not significantly affect the nature of the formation dependences, which are characterized by three parts of the MDO process: pre-spark, spark and microarc regions. It is shown that the areas of dependences that correspond to the pre-spark region of the coating are linear, which indicates an increase in the film thickness. The time to the beginning of sparking at variation of concentration of potassium pyrophosphate at current densities of 4-10 A/m<sup>2</sup> is established. It was found that increasing the concentration of the component content in the electrolyte leads to a decrease in the stress of oxide coating formation. It was found that oxide coatings on zirconium alloy E110, which are formed at a concentration of 0.5 and 0.75 mol/L, have a white color, but increasing the component content to 1 mol/L changes the color of the coating to gray-white and increases continuity. Based on the study of the surface morphology of the zirconium alloy E110 after MDO in potassium pyrophosphate in the concentration range of 0.5...1 mol/L, it was observed that with increasing content of the electrolyte component, the cell size increases significantly.*

**Key words:** zirconium alloy, oxide coating, morphology, potassium pyrophosphate, voltage, microarcs.

# ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 664.723.047

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/28>**Пазюк В.М.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**Дмитренко Н.В.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

**Іванов С.О.**

Інститут технічної теплофізики Національної академії наук України

## ТЕПЛОФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ НАСІННЯ ГАРБУЗА ТА ОСОБЛИВОСТІ ЙОГО ТЕПЛООВОГО СУШІННЯ

У статті досліджуються теплофізичні властивості насіння гарбуза (теплоємність та теплота випаровування вологи), особливості технології його теплового сушіння та вплив підвищених температур на збереження здатності насіння до проростання. Важливість дослідження обумовлена великим значенням якості посівного матеріалу для продовольчої безпеки країни та необхідністю створення надійних сучасних технологій його якісного сушіння після збирання врожаю. Дослідження проводили: методами диференціальної калориметрії, шляхом сушіння невеликих об'ємів матеріалу на стенді теплового конвективного сушіння та шляхом лабораторного пророщування висушеного посівного матеріалу в чашках Петрі. Отримано формулу залежності теплоємності насіння від температури і вологості матеріалу та експериментальну залежність теплоти випаровування вологи від зміни вологості насіння під час сушіння при різних температурах. Теплота випаровування вологи з насіння гарбуза з самого початку сушіння виявилась на 6% більшою від табличного значення теплоти випаровування чистої води. Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної вологи з самого початку процесу сушіння. Результати калориметричного вимірювання підтверджуються даними, отриманими при сушінні насіння на конвективному стенді. Обрахунок кінетичних кривих сушіння показав, що після попереднього прогріву насіння сушіння відбувається в періоді падаючої швидкості. Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів дозволили підібрати найбільш раціональні режими конвективного сушіння посівного насіння гарбуза. Нами рекомендовано сушити насіння до відносної вологості 12% при температурі теплоносія 40...50 °С. Це дозволить зберегти схожість насіння на рівні 96...98% та одночасно максимально унеможливити процеси самонагрівання та грибкового ураження насіння при довготривалому зберіганні через зведення до мінімуму його внутрішніх біологічних процесів (дихання, ферментація).

**Ключові слова:** посівне насіння гарбуза, теплове сушіння, теплоємність, теплота випаровування води, технічні параметри сушіння.

**Постановка проблеми.** Виробництво якісного насіння є питанням продовольчої безпеки будь-якої країни. Насіння рослин для людства є як окремим джерелом збалансованих поживних речовин, так і матеріалом для вирощування необхідних сільгоспкультур. Для гарного зберігання зібраного насіння воно повинне мати вологість, при якій внутрішні біологічні процеси (дихання, ферментація) зведені до мінімуму, а процеси самонагрівання та грибкового ураження максимально унеможливлені. В багатьох природних

зонах насіння одразу після збирання має значну вологість. До того ж, часто воно є недозрілим, і процес дозрівання може тривати 4...6 місяців. Для прискорення процесів зневоднення та дозрівання рекомендується додаткове сушіння насіння теплим повітрям. Від технологій теплового сушіння вимагається забезпечити збереження потенціалу врожайності насіння та його здатності до проростання (схожість).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Насіння за своїми фізико-хімічними властивостями

є колоїдним капілярно-пористим тілом, в якому переважає капілярно зв'язана волога. Схильність насіння до висушування залежить від виду і сорту рослин. Повільно сохне насіння бобів, гороху, кукурудзи. Швидше – дрібне насіння буряку, багаторічних трав. Вибране нами для дослідження насіння гарбуза має досить суттєві відмінності за фізико-механічними властивостями [1, с. 219–229] та унікальній хімічній склад з майже однаковим вмістом жирів, білків та вуглеводів [2, с. 30–33]. Воно гармонійно поєднує особливості насіння олійних (багато жирів), бобових (багато білку) та зернових (багато вуглеводів) культур.

Для правильного вибору технологічних параметрів процесу теплового сушіння насіння необхідне знання його теплофізичних властивостей. Відомий негативний вплив на насіння температур вищих за 55 °С, при яких відбувається коагуляція білку в зародку, що призводить до незворотного зниження його життєдіяльності. Тому при таких температурах насіння не повинно знаходитися більше 5 хвилин. Але теплове сушіння може і поліпшити якість насіння. Наприклад, прогрівання насіння ехінацеї пурпурної та чорнушки посівної протягом 3 діб при температурі 45 °С підвищило їх схожість від 72 % до 78 % та від 78 % до 86 % відповідно [3].

Підвищення температури значно пришвидшує процес сушіння, але коли швидкість випаровування води з поверхні насіння перевищує швидкість її переміщення всередині, утворюється перепад вологовмісту, який призводить до виникнення деформаційних напружень та розтріскування насіння. Проте, якщо тривалість сушіння буде значна, насіння може «запаритися». Тому тривалість сушіння при температурі 30...35 °С не повинна перевищувати 2...4 доби для насіння пшениці й гороху і 5...6 діб для насіння вівса та ячменя з початковою вологістю 22...24 % [3].

Для вибору технологічних параметрів процесу теплового сушіння посівного насіння гарбуза нам необхідне знання не лише його теплофізичних властивостей, але й впливу підвищених температур на його схожість. Але досі вивчалось сушіння в основному паренхіми гарбуза. В роботі [4, с. 422–428] було отримано змінювання в часі вологості гарбуза при тепловому конвективному сушінні. Результати показали, що сушіння гарбуза до чипсів займає 8 годин при 30 °С, і лише 2 години при збільшенні температури до 70 °С. Подібні результати було отримано в роботі [5, с. 345–352]. У роботі [6, с. 23–30] досліджували сушіння зовнішнім сонячним опроміненням,

опроміненням через сонячний тунель та за допомогою гарячого повітря ядра насіння гарбуза (без оболонки). До отриманих експериментальних результатів було застосовано автором деякі відомі моделі (як то модель дифузії Фіка), щоб дослідити переміщення вологи всередині насіння та визначити ефективні коефіцієнти дифузії.

**Постановка завдання.** Теплофізичні властивості посівного насіння гарбуза, особливості його сушіння та вплив підвищених температур на збереження здатності насіння гарбуза до проростання досі досліджено не було. Тому метою нашої роботи стало розроблення технології теплового сушіння посівного насіння гарбуза на основі дослідження: його теплофізичних властивостей (теплоємність та теплота випаровування вологи); енергоефективності процесу сушіння; тепломасообміну при сушінні; збереження здатності насіння до проростання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Насіння для дослідження брали з середини плодового тіла гарбуза сорту «Стофунтовий» безпосередньо перед дослідом.

Для визначення теплоємності і питомої теплоти випаровування води з насіння було застосовано створений в Інституті диференціальний мікрокалориметр випаровування ДМКИ-01 [7]. Завдяки використанню додатково розробленої калориметричної платформи з циліндричними комірками глибиною 36 мм, де перетворювач теплового потоку розміщений вздовж периметру стінок комірок, прилад дає можливість визначення також питомої теплоємності крупнодисперсного насіння гарбуза.

Визначення теплоємності здійснювали за стандартизованою методикою [8] методом покрокового сканування через кожні 5 °С. Теплоємність насіння гарбуза з початковою вологістю 0 та 60 % було визначено в діапазоні температур 30... 95 °С (рис. 1).

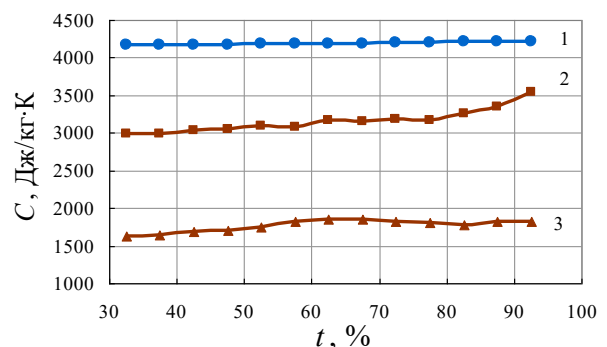


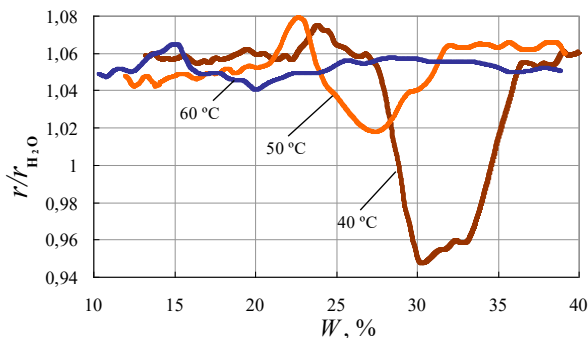
Рис. 1. Залежність від температури теплоємності: 1 – дистильованої води, 2 – насіння гарбуза з вологістю 60%, 3 – сухого насіння гарбуза



За отриманими експериментальними даними, з похибкою не більше 3 %, визначена формула для розрахунку теплоємності насіння гарбуза в діапазоні його відносної вологості  $W = 0 \dots 60$  % та температури  $t = 32,5 \dots 92,5$  °C:

$$c = 1632 + 1,78t + 23W, \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$$

Визначення теплоти випаровування води з насіння гарбуза здійснювали шляхом синхронного вимірювання зміни маси матеріалу та кількості теплоти, що витрачена на випаровування води під час ізотермічного конвективно-кондуктивного сушіння зразка всередині калориметру ДМКИ-01. Поточні значення питомої теплоти випаровування води зі зразка визначали після закінчення дослідів шляхом співвіднесення кількості витраченої в калориметрі теплоти до відповідної кількості випареної вологи за кожний малий проміжок часу. Дослідження було проведено при температурах конвективно-кондуктивного сушіння 40, 50 та 60 °C. Результати надані у координатах залежності питомих витрат теплоти на випаровування (приведених до табличних для чистої води) від відносної вологості насіння (рис. 2).



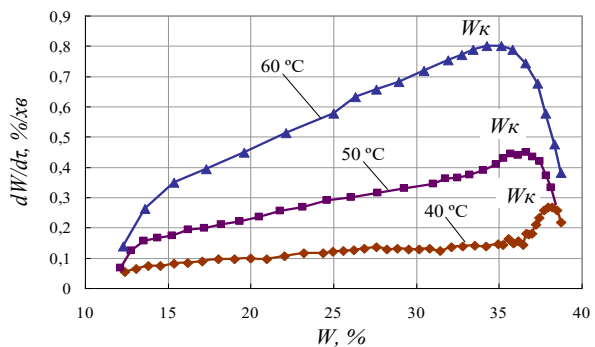
**Рис. 2.** Залежність від вологості матеріалу приведених питомих витрати теплоти на випаровування води з насіння гарбуза при різних температурах сушіння

Експериментально отримана питома теплота випаровування води з насіння гарбуза (рис. 2) перевищила табличні значення теплоти випаровування чистої води приблизно на 6 % ( $r/r_{\text{води}} \approx 1,06$ ) при всіх досліджених температурах сушіння. Це свідчить про видалення з насіння не лише вільної, але й зв'язаної вологи з самого початку процесу сушіння. Крім того, на кривих спостерігається деякий піковий екзотермічний тепловий ефект. При збільшенні температури сушіння величина цього піку зменшується, а його початок зсувається в бік меншої вологості (але настає раніш за часом сушіння).

Для визначення енергоефективності процесу сушіння та змін в тепломасообміні при сушінні було проведено дослід з сушіння невеликих об'ємів матеріалу в елементарному шарі на стенді конвективного сушіння. Насіння насипали на сітчастий піддон розміром 100x50x4мм та розміщували на штанзі терезів в сушильній камері стенду. Для вимірювання зміни температури всередину насінин було вставлено термопари. Вибір режиму сушіння (тривалість до 8 годин при температурі теплоносія 40...60 °C) було зроблено за аналізом наведених вище літературних даних. Розрахунок кінетичних та енергетичних характеристик процесу сушіння здійснювали за методиками класиків теорії сушіння О. В. Ликова та О.С. Гінзбурга [9, 10].

Сушіння насіння з початковою вологістю 39% на конвективному сушильному стенді при температурі теплоносія 40 °C зайняло 4 години. Підвищення температури теплоносія до 50 °C скоротило час сушіння в 2,28 рази, а до 60 °C – в 4,14 рази.

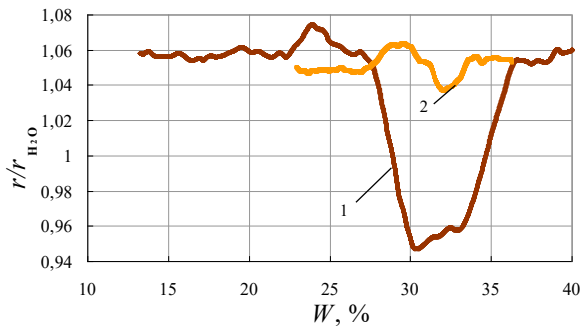
За кривими кінетики сушіння було визначено криві швидкості сушіння (рис. 3). З рисунку 3 бачимо, що після попереднього прогріву сушіння насіння відбувається в періоді падаючої швидкості сушіння. Це корелює з даними рис. 2, які свідчать про видалення зв'язаної вологи з насіння з самого початку процесу сушіння ( $r/r_{\text{води}} > 1$  з самого початку процесу сушіння). Підвищення температури теплоносія від 40 до 60 °C призвело до збільшення швидкості сушіння в 2,85 рази. При цьому критична точка максимальної швидкості сушіння  $W_k$  змістилася в область меншої вологості матеріалу.



**Рис. 3.** Вплив температури теплоносія на швидкість конвективного сушіння насіння гарбуза.  $W_N = 39\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм

Процес різкого спаду швидкості сушіння при 40 та 50 °C після критичної точки  $W_k$  з наступним

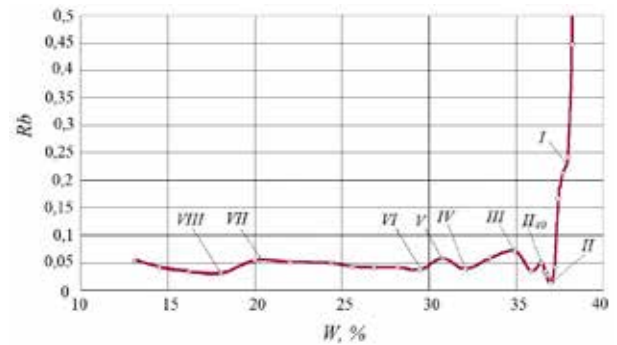
виходом на меншу швидкість сушіння є незвичним для досліджених досі рослинних матеріалів. За досягнутим ступенем зневоднення насіння, цій спад співпадає з початком пікового зниження теплових витрат на випаровування (рис. 2). Візуальні спостереження поточного стану насіння дозволили припустити, що цей ефект пов'язаний з деформуванням та руйнуванням верхньої тонкої плівки-принасінника, а додаткове дослідження витрат теплоти на випаровування води з очищеного від плівки-принасінника насіння (рис. 4) підтвердило це припущення. Подальший повільний спад швидкості сушіння, вочевидь, обумовлено початком більш утрудненого та повільного видалення вологи через тверду шкірку насінини – склеротесту. Спадання швидкості до нуля наприкінці сушіння свідчить про видалення сильно зв'язаної води з середини насінин.



**Рис. 4. Залежність від вологості матеріалу приведених питомих витрати теплоти на випаровування води з насіння гарбуза з плівкою-принасінником (1) та без неї (2) при температурі конвективно-кондуктивного сушіння 40 °С**

Енергоефективність процесу сушіння в кожному момент часу визначали за критерієм Ребіндера ( $Rb$ ), який показує відношення кількості теплоти, витраченої на нагрівання матеріалу  $c_t$ , до кількості теплоти, витраченої на випаровування вологи  $r_p$ , за окремий малий проміжок часу. Розрахунок проводили за отриманими експериментальними даними теплофізичних характеристик насіння та кінетики його сушіння. На рис. 5, як приклад, наведено залежність  $Rb = f(W)$  при температурі сушіння 40 °С. Залежності при інших температурах подібні за виглядом та близькі за значеннями.

Детальний розгляд енергоефективності процесу сушіння (рис. 6) вказує на його складність. Можна виокремити 8 етапів: *I* – йде процес початкового прогрівання насіння, який значно переважає над випаровуванням; *II* – переважає випаровування вологи з плівки-принасінника, та відбувається її деформування; *II*<sub>40</sub> – додатковий



**Рис. 5. Зміна критерію Ребіндера під час конвективного сушіння насіння гарбуза при температурі 40 °С.  $W_N = 39\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм**

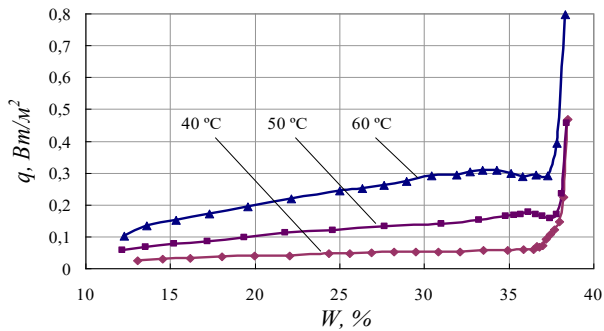
прогрів при переважанні випаровування вологи з плівки-принасінника; *III* – переважає прогрівання насіння після зневоднення плівки-принасінника; *IV* – різке полегшення процесу випаровування завдяки руйнуванню плівки-принасінника; *V* – переважає прогрівання наступних шарів насінин; *VI* – максимально активне випаровування вологи зі шкірки-склеротесту; *VII* – переважає прогрівання внутрішніх шарів насінин завдяки зневодненню шкірки-склеротесту; *VIII* – максимально активне випаровування вологи з внутрішніх шарів насінин, після якого прогрівання все більше переважає над випаровуванням, і процес подальшого сушіння стає занадто енерговитратним та недоцільним.

Знання залежності  $Rb = f(W)$  дозволило встановити зв'язок між тепло- і вологообміном під час сушіння шляхом розрахунку зміни теплового потоку при змінюванні вологості матеріалу за основним рівнянням кінетики процесу сушіння:

$$q_\tau = q_N \cdot \frac{1}{N} \left( \frac{dW^c}{d\tau} \right) \cdot (1 + Rb),$$

де  $q_N$  – тепловий потік в період постійної (початкової максимальної) швидкості сушіння;  $W^c$  – абсолютна (по сухому залишку) поточна вологість матеріалу;  $N$  – постійна (початкова максимальна) швидкість сушіння, розрахована за значенням відповідної її абсолютної вологості матеріалу.

На початку процесу сушіння, під час прогрівання насіння, спостерігали велике значення теплового потоку при всіх обраних температурах сушіння (рис. 6). В другому періоді сушіння відбулося зменшення теплового потоку разом із збільшенням кількості видаленої вологи. При цьому, на самому початку зменшення теплового потоку спостерігали короточасне його збільшення, яке можна пояснити ефектом деформування та руй-



**Рис. 6.** Зміна теплового потоку під час конвективного сушіння насіння гарбуза при різних температурах теплоносія.  $W_N = 39\%$ ,  $V = 1,5$  м/с,  $d = 10$  г/кг с. п.,  $\delta = 2$  мм

нування плівки-принасінника. Спроби досушити насіння до вологості меншої за 12% призвели до спадання майже до нуля теплового потоку, що свідчить про припинення тепломасообміну та недоцільність подальшого сушіння.

Перевірку здатності насіння гарбуза до проростання (схожості) після процесу теплового сушіння проводили шляхом лабораторного пророщування висушеного матеріалу в чашках Петрі.

Дослідження показало, що схожість насіння зменшується при збільшенні температури сушіння і становить: 98% після сушіння при температурі теплоносія 40 °С; 96% після сушіння при температурі 50 °С та 90% після сушіння при температурі 60 °С. Зауважимо, що додаткове дослідження насіння, яке було висушене при температурі теплоносія 80 °С, показало спадання до 0% його здатності до проростання, і тому застосування температур сушіння вищих за 60 °С було визнано недоцільними.

**Висновки.** Проведені дослідження та аналіз отриманих результатів дозволили підібрати найбільш раціональні режими конвективного сушіння посівного насіння гарбуза. Нами рекомендовано досушувати насіння до відносної вологості 12% при температурі теплоносія 40...50 °С. Це дозволить досить енергоефективно провести процес сушіння, забезпечити збереження схожості насіння на рівні 96...98% та одночасно максимально унеможливити процеси самонагрівання і грибового ураження насіння при зберіганні за рахунок зведення до мінімуму його внутрішніх біологічних процесів (дихання, ферментації).

#### Список літератури:

- Joshi D.C., Das S.K., Mukherejee R.K. Physical properties of pumpkin seeds. *Journal of Agricultural Engineering Research*. 1993. № 54. P. 219–229.
- Васильєва А.Г., Круглова И.А. Химический состав и потенциальная биологическая ценность семян тыквы различных сортов. *Известия вузов. Пищевая технология*. 2007. № 3. С. 30–33.
- Сушка семян URL: <https://www.agrodialog.com.ua/sushka-semyan.html> (дата звернення: 11.03.2022)
- Guiné, R. P., Pinho, S. F., Barroca M. J. Study of the convective drying of pumpkin. *Food and Bioprocess Processing*. 2011. № 89. P. 422–428.
- Hashim N., Daniel O., Rahaman E. A Preliminary Study: Kinetic model of drying process of pumpkins in a convective hot air dryer. *Agriculture and Agricultural Science Procedia*. 2014. № 2, P. 345–352.
- Sacilik K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin. *Journal of Food Engineering*. 2007. № 79. P. 23–30.
- Калориметричний пристрій для визначення питомої теплоти випаровування вологи і органічних рідин з матеріалів: пат. 84075 Україна: МПК G 01N25/26, G 01N25/28. № а200613266; заявл. 15.12.06; опубл. 10.09.08, Бюл. № 17. 10 с.
- ДСТУ ISO 11357-4:2010. Пластмаси. Диференціальна сканувальна калориметрія. Частина. 4. Визначення питомої теплоємності. [Чинний від 2012-01-01]. Київ, 2011. 8 с.
- Лыков А. В. Теория сушки. Москва, 1968. 472 с.
- Гинзбург А. С. Основы теории и техники сушки пищевых продуктов. Москва, 1973. 528 с.

#### Paziuk V.M., Dmytrenko N.V., Ivanov S.O. THERMOPHYSICAL QUALITY OF PUMPKIN SEEDS AND FEATURES OF ITS THERMAL DRYING

*The article examines the thermophysical properties of pumpkin seeds (heat capacity and heat of moisture evaporation), features of its thermal drying technology and the effect of elevated temperatures on maintaining the ability of seeds to germinate. The importance of the study is associated with a large value of seed quality for food security of the country and the need to create reliable modern technologies for its high-quality drying after collection. The research was performed by differential calorimetry, by drying small volumes of material on a stand of thermal convective drying and by laboratory germination of dried seed in Petri dishes. The formula of dependence of heat capacity of seeds on temperature and humidity of material and experimental dependence of heat of evaporation of moisture on change of humidity of seeds during drying at different temperatures is received. The heat of evaporation of moisture from pumpkin seeds from the very beginning*

*of drying was 6% higher than the tabular value of the heat of evaporation of pure water. This indicates the removal of not only free but also bound moisture from the seeds from the very beginning of the drying process. The results of calorimetric measurements are confirmed by the data obtained by drying the seeds on a convective stand. Calculation of kinetic curves of drying showed that after preheating the seeds drying occurs in the stage of falling of speed. The research and analysis of the obtained results allowed to select the most suitable modes of convective drying of pumpkin seeds. We recommend drying the seeds to a relative humidity of 12% at a heat carrier temperature of 40... 50 ° C. This will maintain seed germination at 96... 98% and, at the same time, block the processes of self-heating and fungal damage to seeds during long-term storage by minimizing its internal biological processes (respiration, fermentation).*

**Key words:** *pumpkin seed sowing, heat drying, heat capacity, heat of water evaporation, technical parameters of drying.*

# ТРАНСПОРТ

UDC 656.135.073.42:63

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/29>

**Gryshchuk O.K.**

National Transport University

**Petryk A.V.**

National Transport University

**Yerko Ya.V.**

National Transport University

## FEATURES OF CUSTOMS SERVICE OF FOREIGN TRADE CARGO FLOWS ON MOTOR TRANSPORT

*The article analyzes in detail the features of customs and logistics services for import, export and transit cargo flows. The methodology is substantiated and the prospects for the formation of the infrastructure of transport networks are determined on the example of the functioning of international transport systems. Features of performance of technological and production processes on motor transport for existing and innovative technologies are considered. The peculiarities of logistics-oriented operations are analyzed, the tasks on resource provision of customs-logistics terminals in the existing production structures are systematized.*

*It is noted that the peculiarities of customs services for foreign trade and transit goods flows by road should take into account the specifics of the implementation of the provisions of the Customs Convention on the International Carriage of Goods. Therefore, in order to ensure the reliable transportation of consolidated import and export consignments of goods, it is necessary to adhere to the technology of customs formalities specified in the legislative documents during customs control. In addition, the peculiarities of the functioning of customs and logistics systems in road transport should take into account the customs clearance of goods and commercial vehicles.*

*Emphasis is placed on the fact that an important indicator of the perfection of the customs and logistics system is the generalized total costs of servicing foreign trade flows. For import and export cargo flows, this indicator comprehensively takes into account both the infrastructure and the legal mechanism for customs formalities to optimize economic performance in customs and logistics systems.*

*By conducting multivariate calculations using the basic provisions of the theory of queuing in the work determined the optimal number of vehicles in the customs and logistics system. In the process of conducting a study of the infrastructural support of foreign trade flows in the system of servicing imported goods, new results were obtained for the formation of appropriate infrastructure in transport and logistics terminals.*

**Key words:** *transport and technological processes, customs and logistics systems, technological characteristics, transport and logistics terminals, infrastructure.*

**Formulation of the problem.** During the period of Ukraine's independence, the legislature has significantly improved the regulatory and legal documentation on customs issues, which indicates a significant attention of the state to these public relations. To some extent, this situation is explained by the fact that qualitative changes have taken place in Ukraine's international economic relations, the volume of export-import operations with goods moving across the customs border of Ukraine has increased. The growth of the movement of goods

is carried out using different modes of transport (water, air, rail, road).

The movements of goods across the customs border of Ukraine by these modes of transport have their own characteristics that affect the application of the bodies of revenues and fees of the relevant customs procedures. State legislation defines an exhaustive list of relevant operations as a set of customs formalities and the procedure for their implementation, in accordance with the purpose of movement of goods in international traffic [1, p. 21]. The term «customs

formalities» is interpreted as a set of actions to be performed by relevant persons and customs authorities, as well as an automated system of customs clearance in order to comply with the legislation of Ukraine on customs matters.

A systematic approach to the study of the peculiarities of customs services for imported goods in road transport involves analyzing the specifics of the implementation of the provisions of the Customs Convention on International Carriage of Goods using the Book of International Road Transport. Numerical characteristics of transport systems largely depend on the results of customs formalities for foreign trade flows [2, p. 178]. Thus, the optimization of structural parameters in transport and technological systems of international orientation requires scientific analysis of customs control and customs clearance of commercial vehicles that move goods across the customs border of Ukraine.

#### **Analysis of recent research and publications.**

In the literature the technology and sequence of customs formalities on motor transport are studied in detail [3, p. 365]. The content of such procedures in each case is determined by the purpose of movement (customs regime), means of service (mode of transport), methods of cargo and characteristics of transport and technological systems (contract of carriage) [4, p. 82]. However, the conclusion that the internal structure of customs formalities in relation to motor vehicles is quite close to the intertwining of stages and stages, indicates the closeness of the terms «customs formality» and «customs procedure».

The approved regulations contain fundamental provisions governing the procedure for customs formalities related to customs control and customs clearance of motor vehicles, goods (cargo) moving across the customs border of Ukraine. The sequence of actions of authorized officials during customs control and customs clearance of motor vehicles and goods is determined by a standard technological scheme, as the basis of the legal mechanism for customs formalities to ensure international road transport [5, p. 81].

As the complexity of customs and logistics systems becomes more responsible and the assessment of the efficiency of their work [6, p. 332]. Indicators of cost-effectiveness of individual operations for many structures are insufficient, because, focusing only on the transportation process, they do not take into account the impact on the final result of their production activities of the existing infrastructure [7, p. 11].

Therefore, the indicators of efficiency of customs and logistics support of the integrated transport and technological system should be understood as reason-

able numerical parameters that assess the degree of its adaptability to the tasks set before it [8, p. 48]. Such efficiency indicators should be generalized characteristics of the infrastructure of transport systems [9, p. 409].

**Presenting main material.** Customs formalities carried out during customs control and customs clearance of goods and commercial vehicles, which move goods across the customs border of Ukraine, have a unified nature [10, p. 67]. In this case, the subjects of taxation do not depend on the country of registration or the owner of the vehicle, the country from which the vehicle arrived, or the country to which it goes, except as provided by international treaties of Ukraine [11, p. 225].

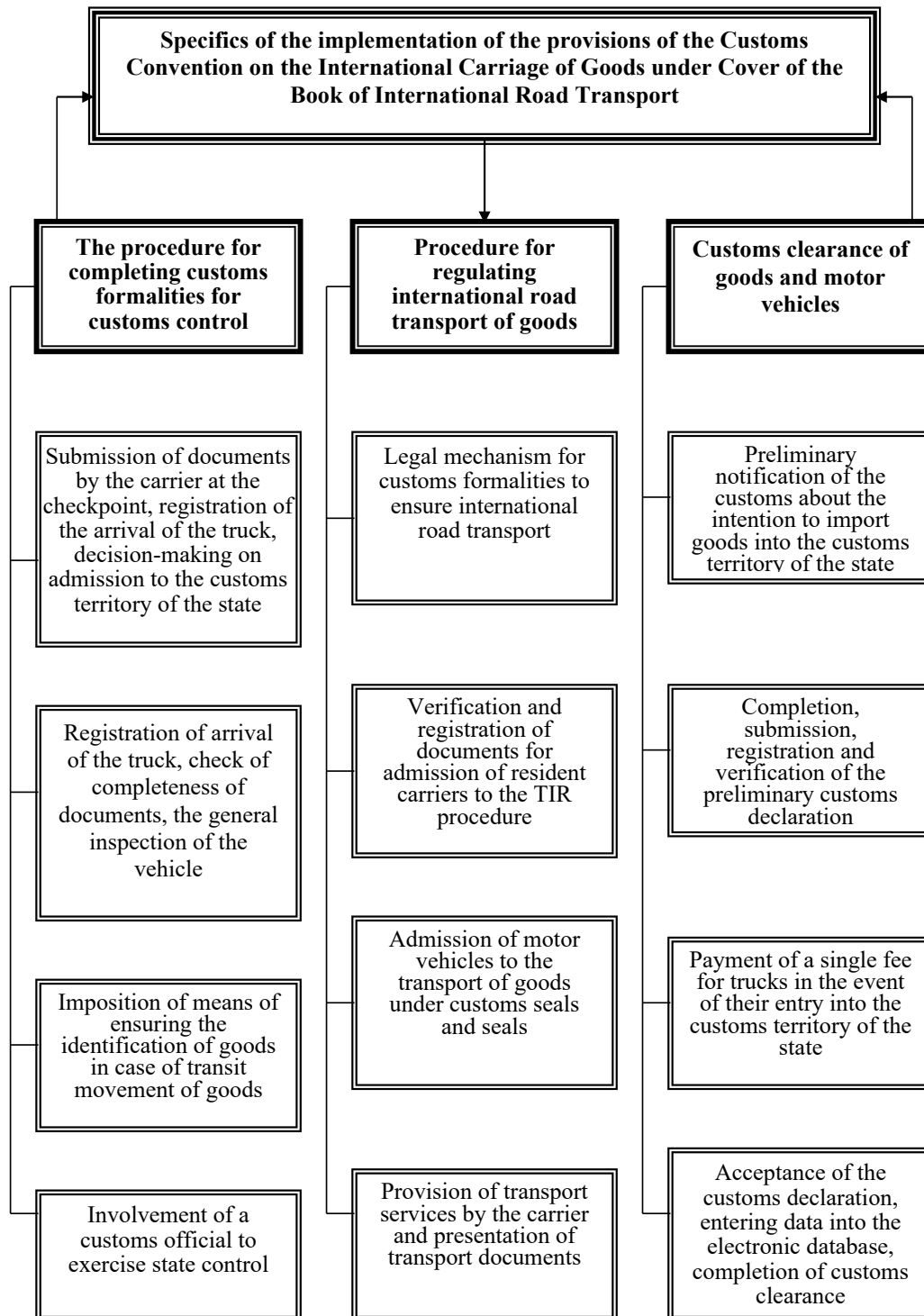
The specificity of international road transport is the implementation of checkpoints open to road traffic, control of international road transport, namely:

- control of the availability of permits for transportation;
- dimensional and weight control of vehicles;
- control over the observance by carriers of the rules of transportation of dangerous goods;
- control of payment (accrual) by non-resident carriers of payments for travel on highways of Ukraine;
- control of payment of fines by carriers or compliance with instructions of control bodies;
- keeping records of motor vehicles engaged in international transportation of passengers and goods by road.

Customs authorities perform customs formalities in customs control zones established in accordance with the provisions of the Customs Code. And in order to speed up the completion of customs formalities when moving commercial vehicles across the customs border of Ukraine, employees of water, air, road and rail transport assist customs officials in the performance of their duties. And the legal mechanism for international road transport consists of international agreements (multilateral, regional, bilateral) and national legislation [12, p. 198]. Legal relations with the movement of motor vehicles across the customs border of Ukraine are regulated not only by international agreements of Ukraine, but also by state national legislation (Fig. 1).

Based on the results of the analysis of the implementation of the provisions of the Customs Convention on the International Carriage of Goods using the TIR Carnet, it can be concluded that the customs formality – border control consists of the following actions:

- submission of documents by the carrier (driver) at the checkpoint;



**Fig. 1. Features of customs service of imported cargo flows on motor transport**

- registration of the arrival of the truck;
- checking the completeness of documents;
- general inspection of the truck;
- making a decision on admission or refusal of admission to the customs territory of Ukraine.

The purpose of customs clearance is to ensure compliance with the procedure established by the legislation of Ukraine for the movement of goods, com-

mercial vehicles across the customs border, as well as statistical accounting of imports into the customs territory of the state, export and transit through its territory.

Customs control of goods and vehicles and customs clearance is carried out in accordance with standard technological issues in customs matters. In order to increase the effectiveness of the implementation of the provisions of the Customs Convention



on the International Carriage of Goods, the customs authorities cooperate with participants in foreign economic activity.

And in order to speed up the completion of customs formalities during the transportation of goods in international traffic, enterprises and economic entities of various modes of transport assist customs structures in the performance of their official duties and create appropriate working conditions for them.

An important indicator of the perfection of the customs and logistics structure is the total cost of servicing foreign trade flows. This indicator comprehensively takes into account both the conditions of customs formalities for customs control and the organization of customs clearance of goods and motor vehicles, which directly affects the overall level of costs. The nature of changes in the indicators of customs and logistics services determines the main directions in the search for improving the infrastructure of the transport system.

The presence of a significant number of random influencing factors on the resulting economic indicators of customs and logistics services provides good reasons for creating mathematical models using the basic theoretical principles of queuing systems. At the same time, when servicing vehicles in the customs terminal, it is convenient to describe the presentation of cars for loading by the simplest flow, which is characterized by stationary and lack of aftereffects. This technology of transport processes is considered on the example of the operation of a multi-channel dynamic system with a finite number of degrees of freedom. The input flow  $\lambda$  of requirements is the arrival of empty cars for loading at the customs terminal for service mechanisms. The intensity  $\mu$  of the service flow of requirements by each channel is determined by the average number of loaded vehicles per unit time. The process of loading consolidated cargo in the terminal in the car is performed by service mechanisms according to the principle of non-priority service discipline FCFS (First Come First Served): «first come – first served». In accordance with these conditions, the car is at the end of the service queue, if all the mechanisms of the terminal are occupied and immediately begins to be serviced in the presence of at least one free channel.

The main task of the study of queuing systems is to determine the probabilities of states  $p_k$  that at time  $t$  the system will be in state  $k$ . In the steady state to determine the value of  $p_k$  there are relations

$$\begin{aligned} [(n-k)\lambda + k\mu] p_k &= (n-k+1)\lambda p_{k-1} + (k+1)\mu p_{k+1}, \\ &\text{at } 1 \leq k \leq m; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} [(n-k)\lambda + m\mu] p_k &= (n-k+1)\lambda p_{k-1} + m\mu p_{k+1}, \\ &\text{at } m+1 \leq k \leq n \end{aligned} \quad (2)$$

where  $n$  – the total number of cars in the system;  
 $m$  – number of service mechanisms.

The maximum probabilities of the system in the  $k$  state are determined depending on the probability  $p_0$  of the zero situations (no applications)

$$p_k = p_{k-1} \left( \frac{\rho}{k} \right) (n-k-1) p_0, \text{ where } 1 \leq k \leq m \quad (3)$$

$$p_k = p_{k-1} \left( \frac{\rho}{m} \right) (n-k-1) p_0, \text{ where } m+1 \leq k \leq n \quad (4)$$

$$p_0 = \left[ \sum_{k=0}^m \frac{n!}{k!(n-k)!} p^k + \sum_{k=m+1}^n \frac{n!}{m!(n-m)!m} \right]^{-1} \quad (5)$$

Rational management of material resources in customs and logistics systems is based on the principle that one of the tasks of the customs cargo terminal is to minimize production costs by rationally choosing the infrastructure of the facility. From this point of view, efficiency means the ability of the system to maintain an equilibrium state, which is to maintain certain parameters near a constant level.

The optimal way to achieve the minimum cost under the operational management of two types of costs  $x_1, x_2$  is determined by the geometric location of the points for which these costs are constant. The path of long-term development of the transport system shows the nature of changes in the cost mechanism.

In the theory of optimal management of material resources in general, such transport systems are considered, the behavior of which can be influenced or controlled by changing the control parameters. The latter are selected taking into account the restrictions specific to a certain class of systems. Therefore, the purpose of creating mathematical models based on the theory of optimal control is to develop methods for selecting numerical values of input parameters, provided that the optimum is achieved by a certain functional.

The tasks of this direction arise not only in the study of modern customs and logistics systems, which contain complex processes of cargo movement, and therefore not yet developed in detail, but also in the study of issues related to assessing the end results of transport systems in the international direction.

In mathematical models, the influence of these factors is characterized by numerical values of the time of rotation of the car on the route, the intensity of the requirements and the duration of their maintenance. In addition, in order to determine the economic performance of transport systems, the

developed mathematical models should take into account the numerical values of the cost of transport and loading and unloading operations and the costs associated with unproductive downtime of individual elements.

With such a question in the objective function of optimizing the structure of the customs and logistics system, the number of cars  $n$  is considered as a control variable. Its optimal value of  $n_{opt}$  is determined by minimizing the cost function  $F(n)$  per 1 ton of processed and transported goods

$$F(n) = \frac{P_k S_k}{\mu q} + S_m + \frac{1}{K_z \mu q} (C_k K_n + C_a A_n) \quad (6)$$

where  $P_k$  – hourly productivity of the service post at the customs terminal, ton/hour;

$S_k$  – hourly costs for the operation of the loading station in the terminal, €/hour;

$\mu$  – the intensity of service at the customs post cars with a capacity  $q$ , cars/hour;

$K_z$  – the average number of working service posts;

$S_m$  – cost of transportation of 1 ton of consolidated consignment of export-import cargoes by distance, €/ton;

$K_n$  – the average number of non-working service posts waiting for cars;

$A_n$  – the average number of cars in the expected maintenance;

$C_k, C_a$  – downtime costs for service stations and vehicles, respectively, €/hour.

Using the general solution of the system of equations (3 – 5) for the process of transport service in a closed system, the numerical value of  $K_z = A_z$  is defined as

$$K_z = \sum_{k=1}^{m-1} k p_k + m \sum_{k=m}^n p_k = \sum_{k=1}^{m-1} k p_k + m(1 - \sum_{k=0}^{m-1} p_k) \quad (7)$$

The number of posts in the terminal that are waiting for cars to be serviced by  $K_n$ , using mathematical dependencies (6, 7) is set as

$$K_n = \sum_{k=0}^{m-1} (m - k) p_k \quad (8)$$

The average required number of cars that are in line for service is

$$A_n = \sum_{k=m}^n (k - m) p_k \quad (9)$$

Expenses related to downtime of  $S_k$  service stations and  $C_a$  cars should be interpreted as fixed costs in determining the cost of transportation with additional charges (protection of temporary parking, food for drivers, cash for business trips, etc.).

That is why the task of analyzing the effectiveness of the transport and technological system in relation to the end result is to determine the existing opportunities for this system to achieve the goal in terms of uncertainty of environmental parameters.

In the study of reliability and cost-effectiveness of customs and logistics systems in the process of customs service of foreign trade flows there are conditions characterized by various random factors: changes in demand for transport services, the possibility of attracting additional vehicles, changing the numerical value of operating costs. As an example of optimizing the structure of customs and logistics systems, the determination of the total costs of servicing the imported cargo flow of packaged goods from the condition of delivery of wholesale consignments from the customs transport terminal to consumers is considered. If loading works are performed at three ( $m = 3$ ) posts of service and delivery of these goods at an average distance of  $l = 30$  km, the optimal value of vehicles with a capacity of  $q = 10$  tons is  $n = 26$  units (Fig. 2).

The increase in total costs in the absence of a sufficient number of vehicles is explained as an increase in  $K_n$  of the average number of non-working service stations waiting for cars and, accordingly, a decrease in  $K_z$  working. And since the product of  $C_k K_n$  is in the numerator, and the product of  $K_z \mu$  is in the denominator of the third component of the mathematical expression (6), the resulting indicator  $F(n)$  increases significantly.

The trend of increasing total costs with an excessive number of vehicles in the customs and logistics system indicates the emergence of forced downtime of cars waiting for service. In mathematical expression (6), the change in  $F(n)$  is explained by the effect of increasing the average number of  $A_n$  cars in the expected maintenance. Moreover, under  $n > n_{opt}$ , the growth rate of the  $C_a A_n$  component is significantly ahead of the rate of decrease of the  $C_k K_n$  component in the system.

The randomness of transport technology processes is especially common in long-term planning and forecasting of numerical values of customs and logistics systems, because it is impossible to accurately determine the optimization costs associated with the operation of transport systems, standards and trends for unforeseen reasons. That is why the use of mathematical modeling in these cases makes it possible to respond quickly to changes in influencing factors.

Using the above theoretical prerequisites to optimize the production structure of customs logistics systems, it became possible to analyze the impact of

hourly productivity  $P_k$  service post at the customs terminal on the resulting indicator  $F(n)$  of total costs (Table 1).

The results of comparing the total costs  $F(n)$  for the three variants of the numerical value of the indicator  $P_k$  shows that with increasing productivity of service stations, the optimal cost value tends to decrease (from  $F(n) = 9,68$  €/ton for  $P_k = 30$  t/hour to  $F(n) = 9,408$  €/ton for  $P_k = 50$  ton/hour). In addition, the current cost-effectiveness of customs and logistics services is also significantly improved with increasing productivity of service stations. This situation is

explained by the fact that with increasing  $P_k$  increases the numerical value of the optimal number of  $n_{opt}$  vehicles, and accordingly increases the average number of vehicles per service post.

These circumstances also explain the «sensitivity» of customs and logistics structures to changes in the numerical value of cars in the system. For example, the absence of six cars in the system increases the total loss  $F(n)$  from 5,1% for  $P_k = 30$  ton/hour to 1,4% for  $P_k = 50$  ton/hour. The same trend is observed with an excessive number of cars. Thus, the presence of 12 «additional» vehicles in the system causes an increase

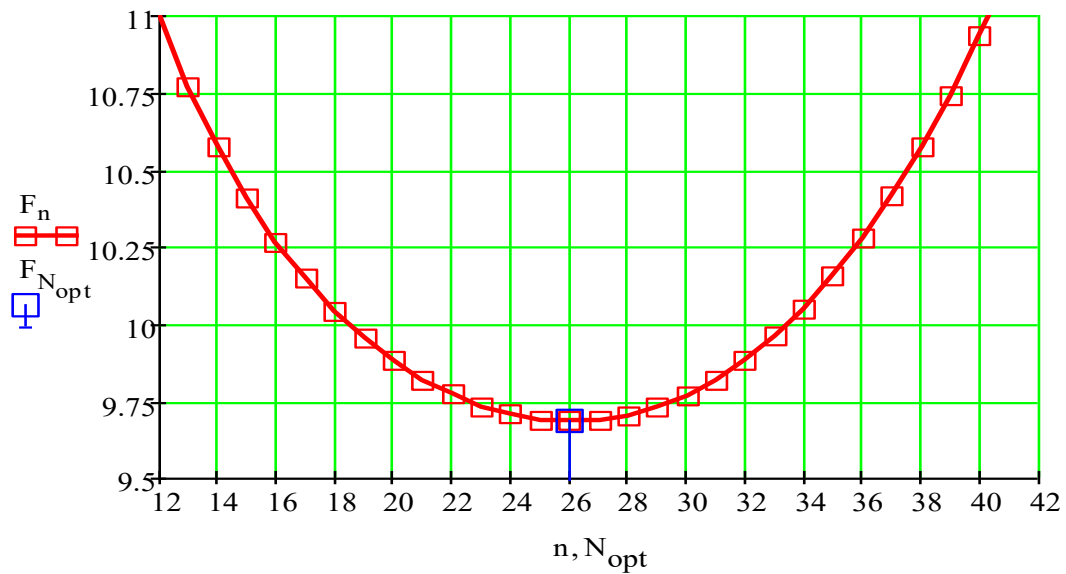


Fig. 2. Determining the optimal number of vehicles when servicing the imported batch of packaged construction cargo at the customs terminal

Table 1

Change in the total costs of the customs and logistics system for the service of goods in the «import» mode, subject to different productivity of service stations

Number of vehicles in the system	Hourly productivity of the service post at the customs terminal, ton/hour					
	$P_k = 30$ ton/hour		$P_k = 40$ ton/hour		$P_k = 50$ ton/hour	
	F(n), €/ton	$\Delta F(n)$ , €/ton	F(n), €/ton	$\Delta F(n)$ , €/ton	F(n), €/ton	$\Delta F(n)$ , €/ton
$n_{opt}$	9,68	–	9,51	–	9,40	–
$n_{opt} - 3$	9,74	0,06	9,53	0,02	9,42	0,02
$n_{opt} - 6$	9,90	0,22	9,59	0,08	9,46	0,06
$n_{opt} - 9$	10,17	0,49	9,71	0,20	9,53	0,13
$n_{opt} - 12$	10,60	0,92	9,89	0,38	9,63	0,23
$n_{opt} - 15$	11,29	1,61	10,14	0,63	9,77	0,37
$n_{opt} + 3$	9,73	0,05	9,54	0,03	9,41	0,01
$n_{opt} + 6$	9,88	0,20	9,63	0,12	9,46	0,06
$n_{opt} + 9$	10,16	0,48	9,78	0,27	9,54	0,14
$n_{opt} + 12$	10,57	0,89	10,01	0,50	9,66	0,26
$n_{opt} + 15$	11,14	1,46	10,32	0,81	9,84	0,44

in  $F(n)$  from 9,1% for  $P_k = 30$  ton/hour to 2,8% in the case of  $P_k = 50$  ton/hour. In addition, with high productivity  $P_k$  of key elements of the customs and logistics system increases the stability of its work, as evidenced by the rate of change of total costs  $\Delta F(n) = F(n) - F(n_{opt})$  in the transport and technological cycle.

**Conclusions.** In the process of conducting a study of customs and logistics support of foreign trade flows in the system of servicing imported goods, new results were obtained for the formation of appropriate infrastructure in customs terminals. By creating appropriate mathematical models in the work, the value of the optimal number of  $n_{opt}$  vehicles is calculated. On the basis of the main provisions of the theory of queuing the regularities of determining the resulting indicators of the functioning of production formations of inter-

national orientation are considered. It is established that with increasing productivity of service posts, the optimal values of total customs and logistics costs decrease. By conducting multivariate calculations, the regularity of the behavior of customs and logistics structures to changes in the numerical value of cars in the system is substantiated.

The study can be useful to improve the efficiency of customs and logistics services for foreign trade flows in international production structures. However, when performing multivariate calculations, in addition to the impact of resource provision for foreign trade, the peculiarities of servicing packaged goods by road and the performance characteristics of structural elements of the customs and logistics system must be taken into account.

#### References:

1. Apfelstädt A., Dashkovskiy S., Nieberding B. Modeling, Optimization and Solving Strategies for Matching Problems in Cooperative Full Truckload Networks, *IFAC-Papers On Line*. 2016. Vol. 49 (2). P. 18-23.
2. Danchuk V., Bakulich O., Svatko V. Identifying optimal location and necessary quantity of warehouses in logistic system using a radiation therapy method, *Transport*. 2019. Vol. 34, № 2. P. 175-186.
3. Taji T., Tanigawa S-I., Kamiyama N., Katoh N., Takizawa A. Finding an optimal location of line facility using evolutionary algorithm and integer program, *Journal of Computational Science and Technology*. 2008. № 2(3). P. 362-370.
4. Beloglazov A., Banerjee D., Hartman A., Buyya R. Improving Productivity in Design and Development of Information Technology Service Delivery Simulation Models, *Journal of Service Research*. 2014. Vol. 18 (1). P. 75-89
5. Prokudin, G.; Remekh, K.; Maidanyk, K. The efficiency of the runsystem application in international freight transportation, *Politechnika Rzeszowska*. 2017. № 10. P 79-86.
6. Sonmez A.D., Lim G.J. A decomposition approach for facility location and relocation problem with uncertain number of future facilities, *European Journal of Operational Research*. 2012. Vol. 218, № 2. P. 327-338.
7. Shin S., Roh, H.-S., Hur, S. Characteristics Analysis of Freight Mode Choice Model According to the Introduction of a New Freight Transport System, *Sustainability*. 2019. Vol. 11(4), 1209 p.
8. Vorkut T., Volynets L., Bilonog O., Sopotsko O., Levchenko I. The model to optimize deliveries of perishable food products in supply chains, *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019, № 5. P. 43-50.
9. Crainic T., Perboli G., Rosano M. Simulation of intermodal freight transportation systems: a taxonomy, *European Journal of Operational Research*. 2018. Vol. 270, № 2, P 401-418.
10. Kulbovskiy I., Bakalinsky O., Sorochynska O., Kharuta V., Holub H., Skok P. Implementation of innovative technology for evaluating high-speed rail passenger transportation, *EUREKA: Physics and Engineering*. 2019, № 6. P. 63-72.
11. Ritzinger U., Puchinger J., Hartl R. A survey on dynamic and stochastic vehicle routing problems, *International Journal of Production Research*. 2015. Vol. 54, № 1. P. 215-231.
12. Melo, M.T., Nickel, S., Saldanha da Gama, F. Dynamic multi-commodity capacitated facility location: a mathematical modelling framework for strategic supply chain planning, *Computers & Operations Research*. 2006. Vol. 33(1). P. 181-208.

#### Гришук О.К., Петрик А.В., Єрко Я.В. ОСОБЛИВОСТІ МИТНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЗОВНІШНЬОТОРГОВЕЛЬНИХ ВАНТАЖОПОТОКІВ НА АВТОМОБІЛЬНОМУ ТРАНСПОРТІ

У статті детально проаналізовано особливості митно-логістичного обслуговування імпорتنних, експортних та транзитних вантажопотоків. Обґрунтовано методологію та визначено перспективи формування інфраструктури транспортних мереж на прикладі функціонування транспортних систем міжнародного спрямування. Розглянуто особливості виконання технологічно-виробничих процесів на автомобільному транспорті для існуючих та інноваційних технологій. Проаналізовано особливості

*проведення логістико-орієнтованих операцій, систематизовані задачі щодо ресурсного забезпечення митно-логістичних терміналів в існуючих виробничих структурах.*

*Зазначено, що особливості митного обслуговування зовнішньоторговельних та транзитних товаропотоків на автомобільному транспорті повинні враховувати специфіку реалізації положень Митної конвенції про міжнародне перевезення вантажів. Тому для забезпечення надійного перевезення консолідованих імпорتنих та експортних партій товарів необхідно дотримуватись визначеної законодавчими документами технології виконання митних формальностей при здійсненні митного контролю. Крім того, особливості функціонування митно-логістичних систем на автомобільному транспорті повинні враховувати проведення митного оформлення товарів і транспортних засобів комерційного призначення.*

*Акцентовано увагу на тому, що важливим показником досконалості митно-логістичної системи є узагальнені сумарні витрати на обслуговування зовнішньоторговельних вантажопотоків. Для імпорتنих та експортних вантажопотоків зазначений показник комплексно враховує як інфраструктурне забезпечення так і правовий механізм виконання митних формальностей для оптимізації економічних показників в митно-логістичних системах.*

*Шляхом проведення багатоваріантних розрахунків з використанням основних положень теорії масового обслуговування в роботі визначена оптимальна кількість транспортних засобів в митно-логістичній системі. В процесі проведення дослідження інфраструктурного забезпечення зовнішньоторговельних вантажопотоків в системі обслуговування імпорتنих товарів отримано нові результати для формування відповідної інфраструктури в транспортно-логістичних терміналах.*

**Ключові слова:** *транспортно-технологічні процеси, митно-логістичні системи, технологічні характеристики, транспортно-логістичні термінали, інфраструктурне забезпечення.*

УДК 629.331 УДК 656.073.7  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/30>

**Колодницька Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## МОДЕЛЮВАННЯ ВИТРАТИ ПАЛИВА ДЛЯ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ З ВРАХУВАННЯМ ТРАНСПОРТНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Зменшення витрати палива і шкідливих викидів від автомобільного транспорту – одна із ключових проблем сьогодення. Ще одна проблема, яка потребує негайного вирішення – це зменшення залежності від російської нафти. Одним із самих небезпечних палив, використання якого обмежується в Європі, є дизельне паливо, яке канцерогенне і має високі викиди сажі та оксидів азоту. Для автомобілів, що використовують альтернативний вид палива потрібні моделі, що дають можливість розрахувати витрату палива, а також шкідливі викиди. В Європі найбільш популярним паливом для заміни дизельного палива є біодизель (біодизельне паливо, дизельне біопаливо). Одним із недоліків біодизеля є велика в'язкість палива, що впливає на його розпилення, а також вищі викиди оксидів азоту. Зараз в якості заміни дизельного палива набирає популярності відновлювальне паливо (*renewable diesel*), що має меншу в'язкість, ніж біодизель. В роботі виконано аналіз моделей для підрахунку витрати палива та викидів від автомобільного транспорту. Найбільш перспективною моделлю для розрахунку витрати палива вважається СМЕМ (*Comprehensive Modal Emissions Model*, Комплексна модальна модель викидів), що розроблена в США. Модель СМЕМ складається з шести основних модулів, які використовують такі вхідні дані: потужність двигуна, швидкість двигуна, співвідношення повітря/палива, використання палива та характеристики каталізатора.

В даній роботі було проаналізовано витрата палива та шкідливі викиди, що підраховані у програмі СМЕМ для різних типів автомобілів для вісьми різних циклів за різними категоріями. Показана залежність викидів оксидів азоту транспортних засобів від витрати палива, що підраховані за допомогою СМЕМ. Було показано, що значення викидів оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з ТВС групуються подібним чином для однакових циклів. Викиди NOx для розглянутих циклів показують лінійну залежність від витрати палива тільки для однієї категорії автомобілів: Tier 1 >50К миль, мала потужність. Проаналізовано можливість використання моделі СМЕМ для моделювання витрати дизельного біопалива.

Одна із переваг СМЕМ це можливість взаємодії з транспортними моделями та базою даних з перевезень. Проаналізовано використання транспортних технологій (програма VISSIM) для покращення моделювання витрати палива. Використання нової версії VISSIM (2022 р.) разом з базами даних українських доріг дасть можливість покращити точність прогнозування як витрати палива, так і викидів. Темою подальших досліджень можуть стати експерименти з використанням суміші біодизеля і відновлювального палива з застосуванням методу нейронних мереж для моделювання витрати палива автомобільних транспортних засобів.

**Ключові слова:** СМЕМ, витрата палива, транспортні технології, дизельне біопаливо, шкідливі викиди, оксиди азоту, VISSIM.

### Постановка проблеми.

Зменшення витрати палива і шкідливих викидів від автомобільного транспорту – одна із ключових проблем сьогодення. Ще одна проблема, яка потребує негайного вирішення – це зменшення залежності від російської нафти. Одним із самих небезпечних палив, використання якого обмежується в Європі, є дизельне паливо, яке канцерогенне і має високі викиди сажі та оксидів азоту. Для автомобілів, що використовують альтернативний вид палива потрібні моделі, що дають можливість розрахувати витрату палива, а також

шкідливі викиди. В Європі найбільш популярним паливом для заміни дизельного палива був біодизель (біодизельне паливо, дизельне біопаливо). Одним із недоліків біодизеля є велика в'язкість палива, що впливає на його розпилення, а також вищі викиди оксидів азоту. Зараз в якості заміни дизельного палива набирає популярності відновлювальне паливо (*renewable diesel*). Дизельне біопаливо має більшу густину і в'язкість, ніж дизельне паливо, але меншу теплоту згоряння. Відновлювальне паливо має меншу густину, ніж дизельне паливо і меншу в'язкість, ніж біодизель.

Як правило, витрату палива і викиди від двигунів автомобільного транспорту вимірюють експериментально. Але застосування нових альтернативних палив потребує використання моделювання для швидкого вибору найбільш оптимального палива. Моделювання викидів біодизельного палива досить широко досліджено, але моделювання витрати альтернативних палив досліджено ще недостатньо. Причому, для підвищення точності моделювання витрати палива в реальних умовах руху транспорту потрібно врахування зупинок транспорту і режиму роботи світлофорів, що є предметом вивчення транспортних технологій.

**Метою статті є** аналіз моделей витрати палива в застосуванні до дизельних біопалив з врахуванням транспортних технологій.

#### **Аналіз останніх досліджень.**

Найбільш детальна інформація щодо моделей витрати палива приведена в роботі [1], де моделі витрати палива розкладені в три віртуальні ящики: білий чорний і сірий. Самою популярною моделлю чорного ящика є комплексна модальна модель викидів (СМЕМ), яка широко використовується в моделюванні руху ТЗ. Найбільш популярною моделлю витрати палива в Україні є модель проф. М.Я. Говорущенко. Застосування цієї моделі до дизельного біопалива дає гарні результати і описано в [2]. На жаль, моделі Говорущенко не враховують витрату палива автомобілем в реальних умовах міста для реальних транспортних засобів (ТЗ), але ця проблема вирішена використанням програми СМЕМ [3,4]. Метод нейронних мереж використовувався в [5] для підрахунку витрати палива автомобільного транспорту. Властивості різних альтернативних палив і їх сумішей, а також моделювання випаровування палив, включаючи біодизельне паливо, детально описано в [6]. Моделювання шкідливих викидів від використання біодизельного палива описано в [2]. Викиди оксидів азоту від роботи дизельного двигуна на біопаливі, як для стаціонарного двигуна, так і автомобільного двигуна описані в роботі [7]. Моделювання розпилювання дизельного біопалива детально описано в [8], але вплив параметрів розпилювання палива на його витрату все ще залишається недослідженим. Моделювання затримки займання для біодизельного палива описано в [9], що впливає у великій мірі на викиди оксидів азоту. Робота [10] присвячена аналізу моделей витрати палива. В керівництві для користувача [11] детально описана версія 3.01 програми СМЕМ для під-

рахунку витрати палива ТЗ, які використовують як бензин так і дизельне паливо. У дослідженнях [12] програма СМЕМ була застосована для розрахунку миттєвих даних про витрату палива та викиди транспортних засобів. Були також підраховані коефіцієнти витрати палива та викидів на основі аналізу миттєвих даних з врахуванням різних типів доріг і погодних умов. Після цього нейронні мережі і нелінійні методи регресії були застосовані для вивчення і прогнозування витрати палива і викидів. Нарешті, для аналізу продуктивності були зіставлені та оцінені результати, передбачені методом нейронних мереж та звичайним нелінійним методом регресії.

### **1. Моделі витрати палива.**

**1.1. Моделі витрати палива «Білий ящик» (White-box fuel consumption models).** Ці моделі побудовані на основі фізичних або хімічних процесів в двигуні, тобто з використанням математичних формул для описання процесів впуску двигуна, стиснення, згоряння і вихлопу газів. Основними моделями цього типу є *метод балансу вуглецю* та *феноменологічна модель середнього значення*. Відома модель витрати палива японського вченого Neuwold, який розвинув *феноменологічну модель* для знаходження середнього значення витрати палива. Застосування цієї моделі до дизельного біопалива можна знайти в [2].

Основним принципом *методу балансу вуглецю* є закон збереження маси [1]. Для автомобілів з дизельним паливом витрата палива може бути знайдена:

$$Q = 0.1155 / \rho_f (0.886HC + 0.429CO + 0.273CO_2), \quad (1)$$

де  $Q$  (л/100 км) – витрата палива; HC (г/км) – викиди вуглеводнів; CO (г/км) – викиди монооксиду вуглецю; CO<sub>2</sub> (г/км) – викиди вуглекислого газу;  $\rho_f$  (кг/л) – густина палива за 288 К.

Біодизельне паливо має більшу густину у порівнянні з дизельним паливом і, як правило, вищі викиди оксиду азоту і менші викиди сажі. Експериментальні дослідження показують, що біодизельне паливо має трішки більшу витрату палива, ніж дизельне паливо.

**1.2. Моделі витрати палива «Чорний ящик» (Black-box fuel consumption models).** У цих моделях весь автомобіль або його двигун вважається чорним ящиком. Ці моделі, як правило, засновані на експериментальних даних, не містять багато фізичного пояснення, що робить їх чисто математичними моделями. Виходячи з вхідних даних, існує три типи моделей: (1) моделі витрат палива на основі двигуна; (2) моделі витрат палива на



базі ТЗ; (3) модальні моделі витрати палива. Прикладом моделі (2) може бути модель СМЕМ.

## 2. Модель СМЕМ

Модель СМЕМ (Comprehensive Modal Emissions Model, Комплексна модальна модель викидів) розроблена Каліфорнійським та Мічиганським університетами сумісно з Національною лабораторією Лоуренса Берклі (Lawrence Berkeley). Третя версія СМЕМ [4] включає в себе розрахунок 28 легкових і 3 вантажних автомобілів. На даний момент це найбільш доступна, детальна і найкраще перевірена модель для оцінки викидів вихлопних газів ТЗ з різними швидкостями і прискореннями. Модель СМЕМ складається з шести основних модулів, які використовують такі вхідні дані: потужність двигуна, швидкість двигуна, співвідношення повітря/палива, використання палива та характеристики каталізатора. Дані для моделювання були зібрані за допомогою експериментальних досліджень, використовуючи 300 реальних автомобілів.

**2.1. Модель витрати палива в програмі СМЕМ.** У СМЕМ викиди  $Q$  з вихлопної труби автомобіля (tailpipe emissions) розраховуються як добуток трьох компонентів: паливної швидкості, індексу викидів двигуна та залежної від часу частки проходження каталізатора (catalyst pass fraction, CPF):

$$Q = FR \times EI \times CPF, \text{ (г/с)}, \quad (1)$$

де  $FR$  – (fuel use rate) швидкість використання палива, г/с;  $EI$  (індекс викидів двигуна) – відношення маси викидів двигуна до маси спожитого палива ( $g_{\text{emission}} / g_{\text{fuel}}$ );  $CPF$  – частка проходження каталізатора, яка визначається як відношення викидів з вихлопної труби до викидів двигуна.

Специфіка програми СМЕМ заключається в розробці концепції так названого *композитного* ТЗ [3, таблиця 4.1, стор. 117]. *Композитний* ТЗ (у кожній категорії) визначається на основі зваженого середнього показника викидів усіх ТЗ, протестованих у цій категорії. Загальні параметри моделюються, як частина моделі викидів композитного ТЗ.

## 2.2. Витрата палива для дизельного палива.

Для дизельного палива швидкість використання палива можна підрахувати наступним чином [3, с. 156], [10, с. 48]:

$$FR = \left( kNV + \frac{P}{\eta} \right) \frac{1}{43.2} \left( 1 + b_1 (N - N_0)^2 \right), \quad (2)$$

$$K = k_o \left( 1 + C(N - N_0) \right),$$

$$N_0 = \sqrt{3.0/V},$$

де  $FR$  – витрата палива (г/с);  $K$  – коефіцієнт тертя двигуна;  $N$  – швидкість обертів двигуна (об/с);  $V$  – робочий об'єм двигуна (літр);  $P$  – потужність двигуна (кВт);  $\eta$  – коефіцієнт корисної дії.

В програмі СМЕМ (версія 3.01) за змовчуванням прийняті наступні параметри [10, с. 48]:  $\eta \approx 0,45$  – індикаторний ККД двигуна;  $b_1 \approx 10^{-4}$ ;  $C \approx 0,00125$ ;  $43,2$  кДж/г – нижча теплота згоряння дизельного палива. Для дизельного біопалива у формулу (2) має бути включена нижча теплота згоряння для біопалива, що залежить від типу біопалива.

В роботі [3, стор. 152- 153, табл. 4.4] приведені значення коефіцієнтів  $k_o$  для кожної з категорій ТЗ, що представляє втрату енергії, що пов'язана з тертям двигуна на одиницю оберту двигуна і робочий об'єм двигуна. Для ТЗ, в яких використовуються більш «старі» технології (категорії 2, 3 і 13); для автомобілів з високим рівнем викидів та для ТЗ з новішими технологіями (категорії 4, 8, 15 і 17) значення коефіцієнтів  $k_o$  змінюються в таких межах  $k_o \approx 0,25$ ;  $k_o \sim 0,23 - 0,27$ ;  $k_o \sim 0,20 - 0,22$  кДж/(об/с×л), відповідно.

**2.3. Моделювання шкідливих викидів від роботи двигуна.** Викиди  $NO_x$  двигуна дуже чутливі до піку температур, що виникають в циліндрі. У зв'язку з цим існує гранична витрата палива (fuel rate threshold), нижче якої викиди дуже низькі. Викиди двигунів, як правило, також значно збільшуються під час холодного старту, особливо викиди  $CO$  та  $HC$ .

*Шкідливі викиди від роботи дизельного двигуна.* Шкідливі викиди від роботи дизельного двигуна в моделі СМЕМ можна визначити в залежності від  $FR$  [3, стор. 156-157]:

$$CO = a_{CO}FR + C_0, \text{ (г/с)}; \quad (3)$$

$$HC = a_{HC}FR + r_{HC}, \text{ (г/с)}; \quad (4)$$

$$NO_x = a_{NO}FR + r_{NO}, \text{ (г/с)}; \quad (5)$$

де  $a_{CO}$ ,  $C_0$ ,  $a_{NO}$ ,  $r_{NO}$ ,  $a_{HC}$ ,  $r_{HC}$  – коефіцієнти.

Для визначення вищеприведених коефіцієнтів був проведений регресійний аналіз викидів дизельного палива в залежності від  $FR$  для дизельних вантажівок з використанням двох циклів FTP та MEC01. Характеристики циклів FTP і MEC01 приведені в [3, стор. 106]. Для вантажівки Ford F-250 PU в роботі [3, с. 158] було знайдено наступні значення коефіцієнтів:  $a_{NO} = 0,0081$ ,  $r_{NO} = 0,0087$  з точністю  $R2 = 0,7266$ . Середні значення коефіцієнтів для дев'яти вантажівок складають:  $a_{NO} = 0,0314$ ,  $r_{NO} = 0,0032$ ,  $R2 = 0,8274$ .

#### 2.4. Перевірка моделі СМЕМ.

Модель СМЕМ була перевірена з використанням дизельного палива для вантажівок легкої і середньої ваги (категорія 40) з модальним циклом викидів (MEC01). Характеристики шести вантажівок марки Ford з двигуном Navistar V8, що використовувались для моделювання витрати палива та викидів в програмі СМЕМ, показані в таблиці 1 [3, с. 154].

В таблиці 1 використані такі позначення: HP – номінальна потужність двигуна (rated engine power), к.с.; Np – швидкість двигуна за номінальної потужності, об/хв; Tmax – максимальний крутний момент двигуна; Nm – швидкість двигуна за максимального крутного моменту, об/хв; Trlhp – коефіцієнт пробігу (coastdown coefficient); відношення N/U – (об/хв)/(миль/год) для верхньої передачі.

В таблиці 2 приведені вимірні значення димності (ODOM), а також викиди вуглеводнів HC, CO, NOx та вимірня економія палива (MPG, miles per gallon,) шести автомобілів марки FORD [3, стор.154].

MPG є основним показником паливної економичності автомобіля: чим вище MPG автомобіля, тим він більш економічний. MPG представляє відстань, що виміряна в милях, яку автомобіль може проїхати на галоні палива.

Для композитного ТЗ категорії 40 було одержано  $V = 6,6$  л;  $Trlhp = 20,7$  кс;  $k_o = 0,135$  [3, с. 153]. Для вантажівки FORD F-250 PU для дизельного палива, використовуючи рівняння (2), одержуємо  $FR = 11,932$  г/с. За рівнянням (5) розраховуємо

викиди оксидів азоту, що складають 0,111 г/с для цього ж ТЗ.

В наступному підрозділі наведені характеристики деяких циклів і описана інтеграція моделей викидів і моделей транспортування.

#### 2.5. Інтеграція моделей транспортування і моделей викидів в СМЕМ

Одна із переваг СМЕМ це можливість взаємодії з транспортними моделями та базою даних з перевезень. Для транспортного руху на автостраді в [3] було проаналізовано шість циклів водіння: від високошвидкісного водіння (LOS A+), де ТЗ мало або взагалі не взаємодіють з іншими ТЗ до водіння в так названих «умовах ближнього блокування» (LOS F). Довжина циклу коливалася від 4 до 12 хвилин, і цикли були побудовані таким чином, щоб оптимально відповідати спостережуваному прискоренню та іншим характеристикам. Характеристики циклу включають також максимальну питому енергію:  $K_{max} = 2Ua$ , що представляє собою подвоєний добуток швидкості ТЗ на його прискорення.

Загальні характеристики деяких циклів наведені в таблиці 3.

В таблиці 4 наведено результати розрахунків витрати палива та викидів за допомогою програми СМЕМ [2] для автостради, цикл LOS A+ (див.Табл. 3).

В даній роботі були проаналізовані витрата палива та шкідливі викиди, що підраховані у програмі СМЕМ для різних типів автомобілів для циклу автострада LOS A+ та інших циклів, що

Таблиця 1

Експериментальні дані автомобілів марки Ford

Марка	Об'єм, л	*Вага ТЗ	HP, к.с.	Np, об/хв	Tmax	Nm, об/хв	Trlhp	N/V
F-350 4x4	7.3	7000	210	3000	425	2000	21.9	31.3
F-250 TB PU	6.9	6600	180	3300	345	1400	21.0	31.3
F-250 PU	6.9	6600	180	3300	345	1400	18.0	31.3
F-350 4x4	7.3	7600	210	3000	425	2000	21.9	31.3
F-350 4x2	6.9	7500	180	3300	345	1400	21.0	31.3
F-350 4x2	6.9	6600	180	3300	345	1400	18.0	31.3

\*Вага ТЗ показана у фунтах (lb)

Таблиця 2

Вимірні характеристики автомобілів марки FORD

Марка автомобіля	ODOM (миля)	HC (г/милю)	CO (г/милю)	NOx (г/милю)	MPG (миля/галон)
F-350 4x4	37533	2.01	0.96	7.01	18.1
F-250 TB PU	81898	1.35	0.52	6.49	16.4
F-250 PU	61283	1.70	0.64	4.20	16.5
F-350 4x4	39844	1.27	0.55	4.57	17.1
F-350 4x2	72684	1.06	0.65	7.21	14.1
F-350 4x2	72426	2.38	0.95	6.63	16.1

Загальні характеристики циклів

N	Цикл	Середня швидкість миль/год	Максимальна швидкість миль/год	Макс. прискорення (миль/год)/с	Подовженність (с)	Довжина (мілі)	$K_{max}$ (миль/год) <sup>2</sup> / с
1	LOS A+	63.2	74.7	2.7	610	10.72	357
2	LOS A-C	59.7	73.1	3.4	516	8.55	307
3	LOS D	52.9	70.6	2.3	406	5.96	233
4	LOS E	30.5	63.0	5.3	456	3.86	227
5	LOS F	18.6	49.9	6.9	442	2.29	215
6	LOS F-	13.1	35.7	3.8	390	1.42	99
7	ART EF	11.5	39.9	5.8	504	1.62	180
8	LOCAL	12.8	38.3	3.7	525	1.87	132

Таблиця 4

Витрата палива та викиди ТЗ для циклу: автострада LOS A+.

N	Автострада, цикл LOS A+		Грам/мілі			
	Категорія автомобіля		Витрата палива	CO	CH	NOx
	<i>Легкові автомобілі</i>					
8	Tier 1, >50K* миль, мала потужність/вага		84.0	4.88	0.07	0.11
9	Tier 1, >50K миль, велика потужність/вага		79.5	3.40	0.06	0.28
10	Tier 1, < 50K миль, мала потужність/ вага		82.4	4.08	0.06	0.21
11	Tier 1, < 50K миль, велика потужність/ вага		91.7	3.95	0.05	0.15
24	Tier 1, >100K мілі		95.9	6.84	0.19	0.21
	<i>Вантажівки</i>					
25	Бензиновий двигун, **LDT(> 8500 GVW)		186.2	4.92	0.16	2.38
40	Дизельний двигун, LDT (> 8500 GVW)		114.2	0.97	0.42	3.79
	<i>ТЗ з високим рівнем викидів</i>					
19	Бідна суміш		111.1	9.83	0.64	2.45
20	Багата суміш		97.2	24.39	1.73	1.38
21	Неповне згорання		105.9	27.75	2.55	0.61
22	Неякісний каталізатор		116.6	21.15	3.19	2.62
23	Дуже багата суміш		123.0	106.60	3.48	0.53

\*50K миль = пробіг 50000 миль; \*\* LDT (light duty truck) – вантажівка з малою вантажопідйомністю; GVW (Gross Vehicle Weight) – значення, вказане виробником, як максимальна вантажопід'ємність ТЗ.

показані в табл. 3 за категоріями, які відображені в табл. 4. На рис. 1 показані викиди оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з TWC (three-way catalytic converters, трикомпонентний каталітичний нейтралізатор) для циклів 2 – 6 (див. табл. 3) та з Tier 1 (>50K миль, низька потужність/вага) у порівнянні з локальним циклом (категорії 8, 9, 10, 11, 24). Як видно з рис. 1, значення викидів оксидів азоту в залежності від витрати палива для легкових автомобілів з TWC групуються подібним чином для однакових циклів. Аналіз показав, що викиди NOx для розглянутих циклів показують лінійну залежність від витрати палива тільки для однієї категорії автомобілів: Tier 1 >50K миль, мала потужність/вага (Tier 1, >50 K, low).

Автори [11] вважають, що формування викидів NOx в дизельних двигунах залежить в осно-

вному від наявності достатньої кількості кисню і високої температури. Відомо, що при випробуваннях автомобілів з дизельними двигунами на викиди NOx, ряд автомобільних компаній, наприклад, Volkswagen, використовували спеціальні комп'ютерні програми, для того щоб уникнути відображення великих викидів оксидів азоту. Цей обман був виявлений в 2018 році, що привело до великих штрафів не тільки цій компанії, а також іншим, що використовували подібні методи. Через те саме викидам азоту приділено найбільше уваги в даній роботі, і формули (2) та (5), які використовуються в програмі СМЕМ потребують додаткових досліджень і порівняння з іншими моделями.

### 3. Розрахунки викидів оксидів азоту

Моделювання викидів оксидів азоту – одна із самих актуальних задач сьогодення, особливо в застосуванні до біопалива. В роботі [7, с. В64]

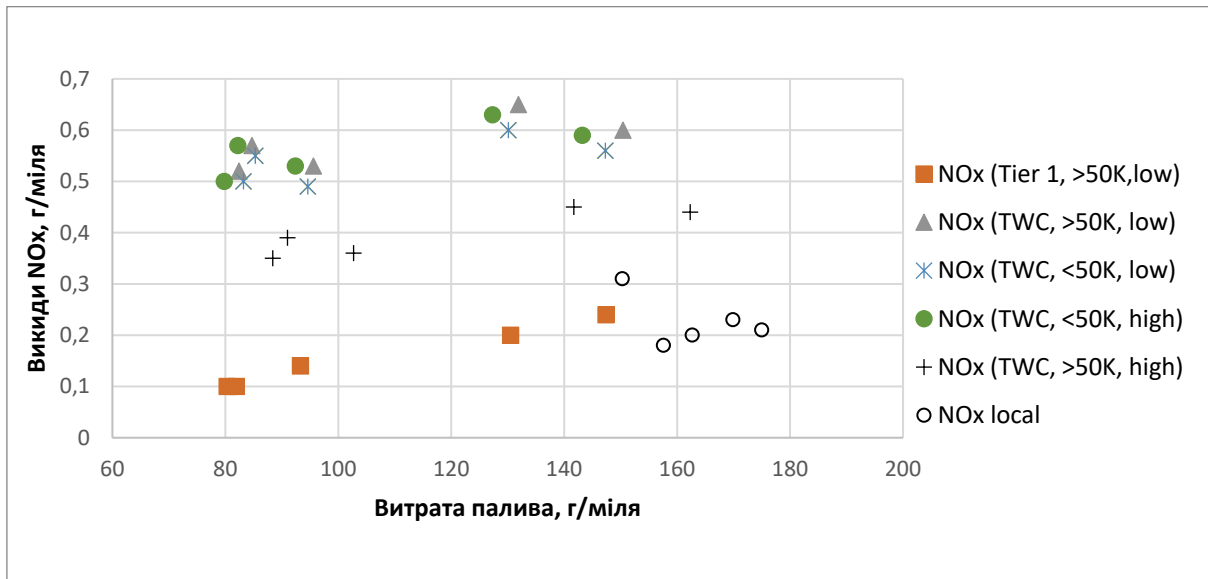


Рис. 1. Залежність викидів оксиду азоту від витрати палива для легкових автомобілів з TWC та Tier 1 (>50К миль, низька потужність/вага) для циклів 2-6, що показані в табл. 3, у порівнянні з локальним циклом LOCAL (NOx local)

викиди оксидів азоту для дизельного палива та біопалива на холостому ході представлені наступними рівняннями.

Для стаціонарного двигуна (ppm):

$$NEI = 20956.69 \times \rho_f \cdot \exp(0.948 \cdot ID - 18.83) \cdot \exp(4626.44 / T_f), \quad (8)$$

де  $\rho_f$  – густина палива [кг/м<sup>3</sup>];  $ID$  – затримка займання палива [мс];  $T_f$  – температура полум'я [K].

Для автомобільного двигуна (ppm):

$$NEI = 20956.69 \times \rho_f \cdot \exp(2.9 \cdot ID - 19.627) \cdot \exp(4626.44 / T_f) \quad (9)$$

В формулах (11) та (12) викиди від двигунів представлені в мільйонних долях (part per million, ppm).

Ще одна проблема, яка не враховується в вищеприказаних моделях це врахування зупинок ТЗ під час руху.

#### 4. Моделювання витрати палива ТЗ з врахуванням роботи світлофорів.

Одним із способів зменшення руху транспорту на міських вулицях є оптимізація часу сигналу світлофора. Формула, що використовується для розрахунку витрати палива у програмах VISSIM та TRANSYT-7F [4]:

$$F = TT \times k_1 + TD \times k_2 + ST \times k_3 \quad (\text{галони}) \quad (10)$$

де  $F$  – витрата палива (галони);  $TT$  (total travel) – кількість ТЗ, помножене на відстань (veh×mi);  $TD$  (total delay) – загальна затримка сигналу (год);  $ST$  (stop) – загальна кількість зупинок ТЗ (ТЗ / год);  $k_1$ ,  $k_2$  та  $k_3$  – коефіцієнти.

Коефіцієнти можна підрахувати за наступними залежностями:

$$k_1 = 0.075283 - 0.0015892U + 0.000015066U^2;$$

$$k_2 = 0.7329; \quad k_3 = 0.0000061411U^2,$$

де  $U$  – швидкість ТЗ (миль / год).

В цілому, як відмічено в [4], витрата палива, що визначається за допомогою програми VISSIM, має великі похибки у порівнянні з витратою палива у SMEM. Витрата палива, що підрахована у VISSIM, повинна бути нижчою, ніж у SMEM, оскільки VISSIM рахує витрату палива у межах вузлів навколо перехресть. Дослідження показали, що витрата палива розрахована за допомогою VISSIM, має більші значення, ніж у програмі SMEM. В останній версії VISSIM (2022 р.) була впроваджена нова програма для аналізу викидів, розробником якої є компанія Bosch. Прогнозування викидів з використанням Bosch достатньо точне тільки для європейських країн, характеристики доріг яких є в базі даних. Так, викиди NOx для цих країн прогнозуються з точністю > 85%, викиди CO<sub>2</sub> прогнозуються з точністю більше, ніж 98% у тесті з реальним автомобілем.

На жаль, наші дослідження показують, що навіть нові версії програми з використанням транспортних технологій не дають можливість точно підрахувати викиди та витрату палива для доріг України, оскільки ці дороги не входять в базу даних, яка використовується у програмі VISSIM.

#### Висновки та перспективи подальших досліджень.

В роботі виконано аналіз моделей для підрахунку витрати палива та викидів від автомобіль-

них ТЗ. Проаналізовано можливість використання моделі CMEM для моделювання витрати дизельного біопалива. Показана залежність викидів оксидів азоту ТЗ від витрати палива. Проаналізовано використання транспортних технологій (програма VISSIM) для покращення моделювання витрати палива. Використання нової версії VISSIM разом з базами даних українських доріг дасть можливість

покращити точність прогнозування як витрати палива, так і викидів. На жаль, не вдалося виконати експериментальні дослідження з використанням суміші біодизеля і відновлювального палива як альтернативного палива з застосуванням методу нейронних мереж для моделювання витрати палива сумісно з Coventry University, UK. Але це може бути темою досліджень у майбутньому.

#### Список літератури:

1. Zhou M., Jin H., & Wang W. A review of vehicle fuel consumption models to evaluate eco-driving and eco-routing. *Transportation Research Part D: Transport And Environment*. 2016. № 49. P. 203-218.
2. Колодницька Р.В. Процеси випаровування та згоряння дизельного біопалива у двигунах внутрішнього згоряння: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2018. 192 с.
3. Barth M., An F., Younglove T., Scora G., Levine C., Ross M., and Wenzel T. The Development of a Comprehensive Modal Emissions Model. Final report to the National Cooperative Highway Research Program, April 2000. 435 p. URL: [https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp\\_w122.pdf](https://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/nchrp/nchrp_w122.pdf) (дата звернення: 12.12.2021).
4. Stevanovic A., Stevanovic J., Zhang, K., *et al.*, Optimizing traffic control to reduce fuel consumption and vehicular emissions. *Transp. Res. Rec.* 2009. № 2128. P. 105–113.
5. Kanarachos S., Mathew J., Fitzpatrick M.E. Instantaneous vehicle fuel consumption estimation using smartphones and recurrent neural networks. *Expert Systems with Applications*. 2019. № 120. P. 436–447.
6. Al Qubeissi M., Sazhin S. S., Al-Esawi N., Kolodnytska R., Khanal B., Ghaleeh M. and Elwardany A. Heating and Evaporation of Droplets of Multicomponent and Blended Fuels: A Review of Recent Modeling Approaches. *Energy & Fuels*. 2021. № 35 (22). P. 18220-18256.
7. Kolodnytska R., Kravchenko O., Gerlici J. & Kravchenko K. The Effects of Biodiesel on NOx Emissions for Automotive Transport. *Communications -Scientific Letters of the University of Zilina*. 2022. № 24(1). С. B59-B66. 114-117.
8. Колодницька Р.В. Розпилювання дизельного палива та біопалива у двигунах внутрішнього згоряння: монографія. Житомир: ЖДТУ, 2017. 210 с.
9. Колодницька Р.В. Моделювання затримки займання дизельного біопалива. *Технічна інженерія*. 2020. № 2 (86). С. 13–17.
10. Колодницька Р.В. Моделювання витрати дизельного біопалива для автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту: матеріали XIV Міжнародної науково-практичної конференції (Вінниця, 25 – 27 жовтня 2021 р.)*. Вінниця. 2021. С.
11. Scora G. and Barth M. Comprehensive modal emissions model (CMEM), version 3.01, user's guide. Univ. California, Riverside, CA, USA, Tech. Rep., 2006. URL:[https://www.cert.ucr.edu/sites/g/files/rcwecm1251/files/2019-07/CMEM\\_User\\_Guide\\_v3.01d.pdf](https://www.cert.ucr.edu/sites/g/files/rcwecm1251/files/2019-07/CMEM_User_Guide_v3.01d.pdf) (дата звернення: 15.01.2022).
12. Shang R., Zhang Y, Shen Z-J. M., Zhang Y. Analyzing the Effects of Road Type and Rainy Weather on Fuel Consumption and Emissions: A Mesoscopic Model Based on Big Traffic Data. *IEEE Access*. VOLUME 9, 2021. P. 62298-62315.

#### **Kolodnytska R.V. MODELING OF FUEL CONSUMPTION FOR ROAD TRANSPORT, TAKING INTO ACCOUNT TRANSPORT TECHNOLOGIES**

*Reducing fuel consumption and harmful emissions from road transport is one of the key problems of our day. Another problem that needs to be resolved immediately is the reduction of dependence on russian oil. One of the most dangerous fuels, the use of which is limited in Europe, is diesel fuel, which is carcinogenic and has high emissions of soot and nitrogen oxides. For cars that using an alternative fuel, models are needed that make it possible to calculate fuel consumption, as well as harmful emissions. In Europe, the most popular fuel for replacing diesel fuel is biodiesel (biodiesel fuel, diesel biofuel). The most promising model for calculating fuel consumption and emissions from automotive vehicles is SMEM (Comprehensive Modal Emissions Model), developed in the United States, is considered to be the most promising model for calculating fuel consumption. The CMEM model consists of six main modules that use the following input data: engine power, engine speed, air/fuel ratio, fuel use and catalyst characteristics.*

*This paper analyzed fuel consumption and harmful emissions calculated in the CMEM program for different types of cars in different categories using different cycles. Nitrogen oxide emission values have been shown to be grouped similarly for the same cycles depending on fuel consumption for passenger cars with TWC (three-*

way catalytic converters). *NOx emissions for the cycles show a linear dependence on fuel consumption for only one category of car: Tier 1, distance more than 50K miles, low power or weight. The possibility of using CMEM model for modeling the consumption of diesel biofuels is analyzed.*

*One of the advantages of SMEM program is the ability to interact with transport models and a database for transportation. The use of the new version of VISSIM (2022 y.) together with the databases of Ukrainian roads will make it possible to improve the accuracy of forecasting both fuel consumption and emissions. The topic of further research may be experiments using a mixture of biodiesel fuel and renewable fuel with the using of the neural network method to simulate fuel consumption for automotive transport.*

**Key words:** *SMEM, fuel consumption, transport technologies, diesel biofuels, harmful emissions, nitrogen oxides, VISSIM.*

**Коскіна Ю.О.**

Одеський національний морський університет

## ТЕОРЕТИКО-ІГРОВА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ ВИБОРУ ФРАХТОВОЇ СТРАТЕГІЇ ПРИ ФОРМУВАННІ РЕСУРСІВ ФЛОТУ

Основним виробничим ресурсом судноплавної компанії є наявний флот та часові параметри його експлуатації. Метою його експлуатації, яку ставить перед собою судноплавна компанія, є отримання максимального прибутку. Враховуючи основне призначення торговельного флоту – транспортне обслуговування вантажопотоків – отримання прибутку залежить від наявної вантажної бази, оцінити параметри якої у довгостроковій перспективі є вкрай складним завданням, яке за фактом зводиться до прогнозів розвитку товарних ринків. Наразі рішення щодо формування структури ресурсів флоту ухвалюються одночасно та на порівняно тривалі періоди часу.

У статті виділено основні параметри вантажопотоків, які співвіднесено із ресурсами судноплавної компанії за флотом: кількість вантажу – загальна чиста вантажопідіймальність наявного тоннажа, терміни виконання перевезення – експлуатаційний період, відстань перевезення – тривалість виконання одного рейсу з перевезення партії вантажу. Надалі вони фіксуються у договорах перевезення вантажів, які укладаються на тривалі терміни (фрахтових контрактах).

Задачу управління ресурсами судноплавної компанії у статті подано із використанням теорії ігор. За такого підходу стратегіями судноплавної компанії є можливі варіанти комерційної експлуатації флоту, які зводяться до поповнення, зменшення чи незмінності основного ресурсу. У практичній діяльності вони реалізуються орендними операціями з суднами: часткове передання суден у оренду або ж залучення суден у оренду; експлуатація наявного флоту без кількісних змін його структури. Вантажопотоки подано як зовнішнє середовище, стратегіями якого розглянуто можливі комбінації визначених параметрів вантажопотоків, що представляють інтерес для судновласника як такі, що пов'язані із його ресурсами. Виграшем гри покладено прибуток судноплавної компанії від комерційної експлуатації флоту. Наведено критерії прийняття рішень залежно від наявності/відсутності даних щодо вірогідних станів природи, якими у свою чергу визначаються ситуації невизначеності або ризику, у яких судноплавною компанією має ухвалюватися рішення щодо формування ресурсів флоту.

**Ключові слова:** ресурси флоту, судноплавна компанія, комерційна експлуатація флоту, фрахтування, теорія ігор.

**Постановка проблеми.** Однією з основних задач судноплавної компанії у рамках довгострокового планування організації своєї роботи є визначення необхідної структури флоту. Зміни структури основного ресурсу морського перевізника здійснюється за рахунок залучення (фрахтування) суден на умовах оренди чи часткове надання наявних ресурсів у оренду з метою отримання певного доходу. При цьому основний ризик полягає у тому, що фактичний обсяг доступної транспортної роботи може виявитися нижчим за запланований, а виробничий ресурс вже вичерпано. Тому рішення щодо цього питання мають ухвалюватися на базі ретельного визначення «стратегій» відносно ресурсів та можливого попиту на транспортне обслуговування.

**Аналіз літератури.** Вітчизняна наукова школа експлуатації морського торговельного флоту базується на фундаментальних працях Бакаєва В.Г. [1], Союзова А.А. [2], Немчікова В.І.

[3], Панаріна П.Я. [4]. У роботах згаданих авторів задача планування управління ресурсами флоту розглядається та вирішується у контексті закріплення наявного тоннажа за визначеними напрямками вантажоперевезень, а за мету такого розподілу покладено своєчасне виконання запланованого обсягу перевезень. У [2, с. 245] зазначається, що «В процессе разработки плана наличия и использования флота ... производится сопоставление провозной способности и установленных плановых объемов перевозок...». Такий підхід ґрунтується на використанні чіткої та достовірної інформації про обсяги перевезень на певний (як правило, тривалий) період часу. Аналогічні тези та підходи, виходячи з яких вирішувались поставлені завдання, можна знайти і у подальших дослідженнях [наприклад, 5]. Такий підхід цілком справедливий та доречний за умови наявності чіткої та достовірної інформації щодо обсягів перевезень у визначеному часовому



розрізі. Слід наразі зазначити, що характерною ознакою трампового судноплавства є відсутність точних відомостей щодо запланованих обсягів перевезень, у той час, як рішення щодо формування ресурсів тоннажа приймаються на доволі тривалі терміни. У цьому аспекті цікавими є дослідження, результати яких викладено у [6], де автором запропоновано комплексний підхід до вирішення проблеми стійкості судноплавних компаній за рахунок створення стратегій поведінки на різних рівнях управління, розглянуто питання їх побудови та оцінка їх ефективності. На результативності діяльності судноплавних компаній залежно від ефективності системи управління роботою суден наголошено у [7], при цьому автором проведено ретроспективний аналіз розвитку наукової думки та сформульовано власне визначення поняття «управління роботою флоту». Дослідження [8] розглядає ресурси флоту судноплавної компанії як кількість суден та пропонує стохастичну модель управління ними протягом річного періоду, де у першій частині року вже відомі обсяги перевезень за укладеними контрактами, а вантажна база другої частини року характеризується невизначеністю. Задачу формування оптимальної структури флоту в умовах невизначеності вантажопотоків розглянуто у [9] та подано як вибір кількості суден кожного типу, які мають бути придбані з урахуванням мінімізації експлуатаційних витрат з флоту судноплавної компанії.

**Постановка завдання.** Ґрунтуючись на традиційних для вітчизняної наукової школи показниках виробничих ресурсів судноплавної компанії, основним завданням покладено формулювання та подання принципового вирішення задачі формування структури флоту на стратегічному рівні організації та управління його роботою.

**Основний матеріал.** Оперуючи флотом, судновласник виходить із необхідності отримання прибутку від ефективного розподілу ресурсів тоннажа за можливими варіантами його комерційної експлуатації. Оскільки основне призначення морського транспорту полягає у забезпеченні транспортного обслуговування товарів світової торгівлі, саме вантажопотоки формують основу для експлуатації торговельного флоту. Судновласник наразі не має можливості впливати на формування їх структури – це сфера інтересів та комерційної діяльності суб'єктів товарних ринків. Відтак, вантажопотоки мають характер зовнішнього середовища, у межах якого судновласник вимушений оцінювати перспективи використання

флоту та ухвалювати рішення щодо структури тоннажа з метою забезпечення ефективності його експлуатації.

З цієї точки зору принципово важливими для судновласника параметрами вантажопотоків є: кількість вантажу  $q_n$ ,  $n = \overline{1, N}$ ; середня відстань перевезення  $L$ ; період часу  $T$ , за який кількість вантажу має бути перевезена. Фактично названі позиції формують договірні умови довгострокової роботи суден на транспортному обслуговуванні вантажопотоків, знаходячи відображення в умовах довгострокових фрахтових контрактів у вигляді кількості вантажу як судової партії, портів завантаження та розвантаження (чітко визначених або вказаних як розташованих на ренджі), термінів подання судна у порт завантаження.

Загальним показником, яким оцінюється флот судновласника, є його сумарна чиста вантажопід

діймальність  $\sum_{v=1}^V D_{c_v}$ . Наразі виробничі потуж-

ності флоту оцінюються його ресурсами не лише за вантажопідіймальністю (яка дозволяє оцінити

можливості перевезення певної кількості вантажу), а й експлуатаційним періодом роботи флоту

$\sum_{v=1}^V T_{e_v}$ . Саме виходячи з нього оцінюються мож-

ливості флоту виконати необхідну перевізну

роботу протягом відповідного часового інтервалу. Відтак, виробничі потужності флоту судновлас-

ника оцінюються показником, який у експлуатаційній практиці отримав назву ресурси флоту за

тоннаже-добами  $\sum_{v=1}^V D_{c_v} T_{e_v}$ .

Змістовно сумарна вантажопідіймальність

флоту  $\sum_{v=1}^V D_{c_v}$  відповідає такому параметру ван-

тажопотока, як кількість вантажу  $Q$  із необхідним розподілом на певну кількість судових партій, а період експлуатації суден на перевезеннях

вантажів  $\sum_{v=1}^V T_{e_v}$  корелює із відстанню перевезення (через тривалість виконання одного рейсу) та термінами поставки товару за умовами контракту  $T$  (рис. 1).

Оскільки параметри вантажопотоків не мають цілеспрямованих проти інтересів судновласника власних інтересів, у той час як дії судновласника щодо експлуатації флоту спрямовані на отримання певного результату та реалізуються ухваленням усвідомлених рішень, задачу формування

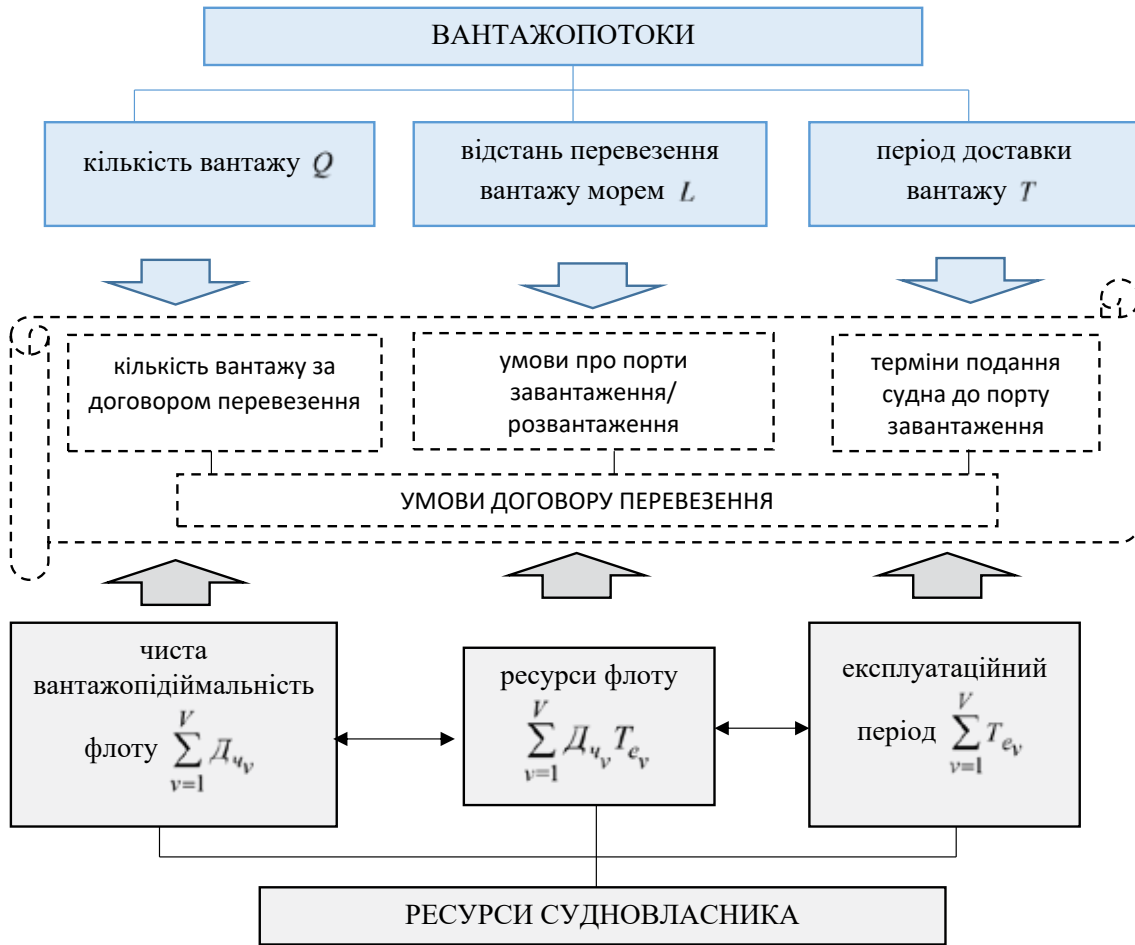


Рис. 1. Структурно-логічна схема параметрів вантажопотоків і ресурсів судновласника

ресурсів флоту можна розглядати як «гру з природою» [10, 11].

Під природою при цьому у такій постановці задачі покладаються вантажопотоки, які транспортуватимуться морськими суднами, а стратегіями (станами) природи – комбінації названих вище параметрів вантажопотоків, якими визначаються особливості та вимоги перевезення вантажу морем.

Загальна величина інтегрального вантажопотоку  $Q = \sum_{n=1}^N q_n$ , який складається з  $N$  вантажопотоків, кожен з яких  $q_n, n = \overline{1, N}$  перевозиться на середню відстань  $L_n$  за період часу  $T$  (покладемо однаковим та таким, що відповідає періоду часу, що розглядається). Окрім цього, покладемо, що, виходячи з досвіду попередніх часових періодів та прогнозів перспектив розвитку вантажопотоків, є можливість оцінити  $p_k, k = \overline{1, K}$  можливих станів «природи» – характеристик можливої транспортної роботи, пов'язаної із вантажопотоками, що розглядаються:

$$\sum_{k=1}^K p_k = 1, \quad (1)$$

$$p_k = P(Q = Q_k), \quad k = \overline{1, K}. \quad (2)$$

Кожний стан «природи»  $B_k$  характеризується таким набором:

$$B_1 = \left\{ Q_1 = \sum_{n=1}^N q_n^1, L_1, T_1 \right\}, \quad (3)$$

$$B_2 = \left\{ Q_2 = \sum_{n=1}^N q_n^2, L_2, T_2 \right\}, \quad (4)$$

$$B_k = \left\{ Q_k = \sum_{n=1}^N q_n^k, L_k, T_k \right\}, \quad (5)$$

$$B_K = \left\{ Q_K = \sum_{n=1}^N q_n, L_K, T_K \right\}. \quad (6)$$

Стратегіями судновласника є можливі варіанти експлуатації флоту:

– експлуатація та оперування наявними ресурсами флоту:

$$A_1 = \sum_{v=1}^V D_{qv} T_{ev} \quad (7)$$

– наявні ресурси флоту поповнити додатковими ресурсами за рахунок залучення флоту у оренду:

$$A_2 = \sum_{v=1}^V D_{qv} T_{ev} + \sum_{v_{op}=1}^{V_{op}} D_{qv_{op}} T_{ev_{op}} ; \quad (8)$$

– частково наявні ресурси флоту надати у оренду:

$$A_3 = \sum_{v=1}^V D_{qv} T_{ev} - \sum_{v'=1}^{V'} D_{qv'} T_{ev'} . \quad (9)$$

Залежно від вибору судновласником тієї чи іншої стратегії за різних стратегій зовнішнього середовища формуватиметься його вигравш у вигляді прибутку від експлуатації флоту.

За використання наявних ресурсів тоннажа на транспортному обслуговуванні певних вантажопотоків такий прибуток визначатиметься як

$$\Pi_{1k} = f(L_k) \cdot Q_k - \sum_{v=1}^V R(L_k, D_{qv}), T_{ev} = T_k, \quad (10)$$

де  $f(L_k)$  – фрахтова ставка, яка залежить від відстані перевезення вантажу за стану «природи»  $k$ , дол/т;  $Q_k$  – вантажопоток до освоєння морськими суднами за стану «природи»  $k$ , т;  $R(L_k)$  – витрати судновласника при експлуатації флоту на відстані перевезення  $L_k$ , дол.

При цьому експлуатаційний період роботи флоту  $T_{ev}$  має відповідати часу перевезення вантажу морем  $T_k$ .

Друга стратегія судновласника, яка полягає у оренді на час додаткових ресурсів тоннажа, забезпечить йому отримання прибутку, який можна визначити як:

$$\Pi_{2k} = f(L_k) \cdot Q_k - \sum_{v=1}^V R(L_k, D_{qv}) - \sum_{v_{op}=1}^{V_{op}} R_{op}(T_{op}, D_{qv_{op}}) - g \sum_{v_{op}=1}^{V_{op}} R(L_k) D_{qv_{op}}, \quad (11)$$

де  $R_{op}(T_{op})$  – витрати на сплату оренди, які залежать від періоду оренди  $T_{op}$ , дол.

При цьому:

$$T_{op} = T_{ev_{op}} \leq T_k - T_{ev}, \quad (12)$$

$$T_{ev} = T_k, T_{op} = T_{ev_{op}} \leq T_k - T_{ev}, \quad (13)$$

де  $\gamma$  – параметр, який визначає використання додатково орендованих ресурсів флоту в системах доставки вантажів:

$$\gamma = \begin{cases} 1, & \text{якщо орендовані ресурси флоту залучаються до системи доставки} \\ 0, & \text{у протилежному випадку} \end{cases}$$

Третя стратегія судновласника з використання наявних ресурсів флоту характеризується частковим відфрахтуванням на орендних умовах, що фактично означає вилучення цих ресурсів з транспортного обслуговування вантажопотоків. Втім, вони формують додатковий прибуток судновласника за рахунок орендних платежів. Таким чином, за цієї стратегії судновласника його прибуток визначатиметься як

$$\Pi_{3k} = f(L_k) \cdot Q_k - \sum_{v=1}^V R(L_k, D_{qv}) + f_{op} \cdot T_{op} \sum_{v'=1}^{V'} D_{qv'} - \sum_{v'=1}^{V'} R(T_{ev'}, D_{qv'}), \quad (14)$$

де  $f_{op}$  – орендна ставка, дол/добу;  $T_{op}$  – період оренди, діб;  $\sum_{v'=1}^{V'} R(T_{ev'}, D_{qv'})$  – експлуатаційні витрати, пов'язані із виконанням рейсів, дол.

За цієї стратегії наведена раніше рівність (13) щодо відповідності експлуатаційного періоду роботи флоту термінам доставки вантажу, які висуваються до роботи флоту, набуває вигляду нерівності:

$$T_{ev} \geq T_k. \quad (15)$$

Перед судновласником стоїть задача максимізувати прибуток у середньому незалежно від стану природи, тобто:

$$\bar{\Pi} \rightarrow \max. \quad (16)$$

Методи прийняття рішень в іграх з природою, як відомо, залежать від того, чи відомі вірогідності станів (стратегій) природи, тобто має місце ситуація невизначеності чи ризику. Для кожної з них відомі певні критерії.

За наявності прогнозних даних щодо стану природи (фактично – стратегій  $B_1, B_2, \dots, B_K$ ), коли вірогідність тієї чи іншої стратегії визначено як  $P_j$ , оптимальна чиста стратегія визначається максимальним математичним очікуванням за критерієм Байєса-Лапласа:

$$BL = \max_{i=1,2,3} (M(A_i)) = \max_{i=1,2,3} (\Pi_{i1} \cdot p_1 + \Pi_{i2} \cdot p_2 + \dots + \Pi_{iK} \cdot p_K). \quad (17)$$

За відсутності достовірної прогнозної інформації щодо параметрів вантажопотоків, можна, відповідно до принципу недостатнього обгрун-

тування Лапласа, покласти рівновірогідними усі можливі варіанти стану їх параметрів:

$$p_1 = p_2 = \dots = p_K = \frac{1}{K}. \quad (18)$$

За цим критерієм оптимальною вважається стратегія перевізника, яка забезпечить йому максимальний середній вигравш за умови рівності усіх вірогідних станів зовнішнього середовища (максимальний середній вигравш за усіма стратегіями):

$$L = \max_{i=1,2,3} \left( \frac{1}{P} \sum_{k=1}^K \Pi_{ik} \right). \quad (19)$$

У ситуаціях відсутності достовірної інформації про структуру вантажопотоків судновласник, виходячи з власних переваг та готовності прийняття певних ризиків, може виходити з розрахунку на декілька можливих варіантів. Так, якщо перевізник покладе вважати, що зовнішнє середовище буде найбільш добросприятливим для нього, доцільним буде скористатися при виборі власної стратегії так званим «критерієм крайнього оптимізму»:

$$O = \max_{i=1,2,3} \max_{k=1,K} \Pi_{ik}. \quad (20)$$

Якщо перевізник надає перевагу можливості «застрахуватися» від певних ризиків, тобто у певному розумінні вважатиме, що ситуація із вантажопотоками гратиме проти нього, і, відповідно, намагатиметься максимізувати свій прибуток навіть за найбільш недобросприятливої ситуації, більш прийнятним буде використання критерія Вальда. Оптимальною вважатиметься стратегія, яка забезпечуватиме вигравш не менший за нижню ціну гри з природою:

$$W = \max_{i=1,2,3} \min_{k=1,K} \Pi_{ik}. \quad (21)$$

Зазначимо, що обрана із використанням цього критерію стратегія повністю виключає ризик: судновласник не може зіткнутися із варіантом стану зовнішнього середовища гіршим за той, на який він розраховував.

Критерієм мінімаксного ризику є також і критерій Севіджа, який, так само, як і критерій Вальда, вважається критерієм крайнього песимізму, адже судновласник, обираючи свою стратегію, виходить з найбільш недобросприятливого стану зовнішнього середовища. Наразі, на відміну від критерія Вальда, при ухваленні рішення керуються не матрицею вигравшів, а матрицею ризиків. Згідно до критерія Севіджа, оптимальною вважається стратегія, за якої мінімізується величина максимального ризику:

$$S = \min_{i=1,2,3} \max_{k=1,K} r_{ik}. \quad (22)$$

Ризиком судновласника при використанні стратегії  $A_i$  за стану зовнішнього середовища  $B_k$  є різниця між доходом, який він би отримав, якщо б точно знав стан природи, та тим доходом, який він отримує за того ж стану природи, обираючи стратегію  $A_i$ :

$$r_{iq} = \max(d_{iq}) - d_{iq}. \quad (23)$$

Критерій песимізма-оптимізма Гурвіца рекомендує при виборі стратегії орієнтуватися на середній результат:

$$H = \max_{i=1,2,3} \left( \xi \cdot \min_{k=1,K} \Pi_{ik} + (1-\xi) \max_{k=1,K} \Pi_{ik} \right), \quad (24)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт оптимізма, який обирається суб'єктивно та фактично відображує схильність судновласника до оптимізму чи песимізму:  $0 \leq \xi \leq 1$ .

**Висновки.** У запропонованій постановці подана задача вирішується судновласником, виходячи з власних переваг та схильності до ризиків – саме ними він керується, обираючи той чи інший з поданих вище критеріїв. Вибір його заснований також на ситуації наявності чи відсутності інформації про стратегії зовнішнього середовища – параметрів вантажопотоків. Наразі подана постановка задачі та окремі запропоновані критерії її вирішення дозволяють судновласнику вирішувати задачу оперування ресурсами флоту на перспективному рівні організації його роботи.

#### Список літератури:

1. Бакаев В.Г. Эксплуатация морского флота. Москва : Транспорт, 1965. – 560 с.
2. Организация и планирование работы морского флота. Под ред. Союзова А.А. Москва : Транспорт, 1979. 416 с.
3. Немчиков В.И. Организация работы и управление морским транспортом. Москва : Транспорт, 1982. 343 с.
4. Панарин П.Я. Управление работой морского флота. Одесса : Изд-во ОГМУ, 2001. 213 с.
5. Шибаев А.Г., Кириллова Е.В., Кириллов Ю.И. Управление работой флота (Основы теории и практики). Одесса : Феникс, 2012. 187 с.
6. Капитанов В.П. Бизнес-процессы судоходной компании и процесс управления : монография. Одесса : КУПРИЕНКО СВ, 2017. 120 С.

7. Киринос Д.А. Основные принципы управления работой флота морской судоходной компании в современных рыночных условиях. *Научное обозрение. Технические науки*. 2020. № 5. С. 58-64.

8. Wang X., Fagerholt K., Wallace S. Planning for charters: a stochastic maritime fleet composition and deployment problem. *Omega, Elsevier*. 2017. vol. 79(C). P. 54-66.

9. Loxton R., Lin Q., Teo L.R. A stochastic fleet composition problem. *Computers and Operations Research*. 2012. № 39 (12). P. 3177-3184.

10. Кремлев А.Г. Основные понятия теории игр. Екатеринбург : Изд-во государственного Уральского университета, 2016. 144 с.

11. Силкина Г.Ю. Теория принятия решений и управление рисками. Модели конфликтов, неопределенности, риска: учеб. пособие. СПб. : Изд-во СПбГПУ, 2003. 72 с.

#### **Koskina Yu.O. GAME-THEORY BASED SETTING OF THE PROBLEM OF CHOOSING THE CHARTERING STRATEGY FOR FORMING THE RESOURCES OF FLEET**

*The main production resource of the shipping company is the existing fleet and time parameters of its operating. The purpose of fleet operating, which is set by the shipping company, is to obtain the maximum possible profit. Given the main purpose of the merchant fleet – transport service of cargo traffic – profit depends on the existing cargo base, to estimate the parameters of which in the long run is an extremely difficult task, which in fact is reduced to forecasts of the commodity markets. But, the decisions on forming of the structure of fleet resources are made simultaneously and for relatively long time periods.*

*The main parameters of cargo traffic, which are correlated with the fleet resources of the shipping company are as following: the cargo quantity – the total loading capacity of the available fleet, terms of transportation – operating period, distance of transportation – duration of one voyage to carry a lot of cargo. Afterward, they are fixed in the contracts of carriage of goods, which are concluded for long periods (freight contracts).*

*The task of managing the resources of a shipping company is presented in the paper with game theory. Under this approach, the company's shipping strategies are possible options for commercial operating of the fleet, which are reduced to the adjunction, reduction or invariability of the main resource. In practice, they are realized by rent operations with vessels: partial transfer of vessels for rent or involvement of vessels for rent; operating of the existing fleet without quantitative changes in its structure. Cargo turnovers are presented as an external environment, the strategies of which are possible combinations of certain cargo turnover parameters which are of shipowners interest as related to his resources. The winnings of the game are the profit of the shipping company from the commercial operating of the fleet. The criteria for decision-making are given depending on the presence/absence of the data on probabilistic states of nature, which in turn determine the situations of uncertainty or risk in which the shipping company have to make decisions on the forming of fleet resources.*

**Key words:** resources of fleet, shipping company, commercial operating of the fleet, chartering, game theory.

УДК 656.072, 656.078  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/32>

**Півторак Г.В.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Гіць І.І.**

Національний університет «Львівська політехніка»

**Жила М.П.**

Національний університет «Львівська політехніка»

## ОЦІНКА РОЗПОДІЛУ ПАСАЖИРОПОТОКІВ В ТРАНСПОРТНО-ПЕРЕСАДОЧНОМУ ВУЗЛІ

*Транспортно-пересадкові вузли (ТПВ) є важливим елементом міської транспортної системи, місцем взаємодії міського та позаміського транспорту. Вивчення характеристик розподілу пасажирів між зонами ТПВ та того, яким видом переміщень користуються пасажирів при русі в напрямках «місто-ТПВ» та «ТПВ-місто», дозволить оптимізувати пропускну здатність вузла, покращити рівень обслуговування пасажирів та функціонування транспортної системи міста загалом.*

*ТПВ «Головний залізничний вокзал» у Львові поєднує в собі зони позаміського залізничного та автобусного транспорту, зупинки міських трамвайних та автобусних маршрутів, місця стоянки таксі та паркування приватних автомобілів. На основі збору даних, проведеного в робочі дні тижня, отримано інформацію про обсяги переміщень між окремими зонами ТПВ та розподіл прибуттів пасажирів з міської території у ТПВ і навпаки між режимами переміщення (громадський транспорт, таксі, власний транспорт та піший рух). Визначено вплив інтенсивності прибуття та відправки позаміських залізничних і автобусних маршрутів, а також частоти руху маршрутів міського громадського транспорту, на обсяги пасажиропотоків у ТПВ. В програмному середовищі PTV Visum проведено моделювання добового пасажиропотоку у ТПВ та отримано матриці кореспонденцій між зонами вузла з розподілом за годинами доби. Функція корисності переміщень між окремими зонами враховує альтернативи та характеристики подальших варіантів переміщення.*

*Отримані результати можна використати для оптимізації функціонування транспортно-пересадкового вузла: виявлення «вузьких» місць та збільшення їх пропускну здатності, коригування часу відправки/прибуття позаміських автобусних маршрутів з врахуванням розкладів руху залізничного транспорту, оптимізації частоти руху транспортних засобів на міських маршрутах громадського транспорту, що обслуговують ТПВ.*

**Ключові слова:** транспортно-пересадковий вузол, пасажиропотік, розподіл переміщень, моделювання, PTV Visum.

**Постановка проблеми.** Функціонування транспортної системи міста загалом залежить від функціонування її окремих елементів. Одним з таких елементів є транспортно-пересадкові вузли, які знаходяться в межах міської території. ТПВ акумулюють в своїх межах значні обсяги пасажиропотоків, причому накопичення їх відбувається не рівномірно, а швидше стрибкоподібно (наприклад, у зв'язку з прибуттям потяга на станцію).

Вибір користувачами способу свого переміщення до та з ТПВ залежатиме від розташування вузла, періоду доби, видів транспорту у вузлі та характеристик їх роботи. В сукупності ці чинники визначатимуть ефективність взаємодії усіх видів сполучення, представлених у транспортно-пересадковому вузлі.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій.**

Організація роботи транспортно-пересадкових вузлів в межах міста відбувається у взаємозв'язку з діяльністю всієї міської транспортної системи. Виділяють два рівні цього процесу: організація пасажиропотоків, що в'їжджають в місто, та розподіл цих потоків міською територією [1].

Дослідженням функціонування ТПВ займаються як українські, так і закордонні дослідники. В роботі [2] автори формують перелік чинників, які визначають ефективність функціонування пасажирського хабу, а також пропонують вагові коефіцієнти впливу кожного з цих індикаторів (на основі аналізу експертних оцінок).

Автори [3] прогнозують сумарні річні пасажиропотоки у ТПВ на основі соціальних та полі-

тичних чинників, що характеризують місто, та з урахуванням статистичних даних про обсяги пасажиропотоків у ТПВ в попередні періоди. Методами прогнозування є генетичний алгоритм та нейронні мережі.

Нейронні мережі застосовуються для прогнозування пасажиропотоку в залізничному вузлі (на прикладі залізничної станції в Пекіні) і авторами [4]. В дослідженні враховуються такі чинники, як погодні умови, наявність свят (канікули, державні свята, вихідні), а також коефіцієнти нерівномірності пасажиропотоку протягом дня, визначені на основі даних попередніх періодів.

Автори [5] досліджували переміщення пішохідних потоків в межах транспортно-пересадкового вузла для визначення «вузьких» місць, де виникають найбільші затримки, з використанням аналітичного та імітаційного моделювання (в програмному середовищі PTV Vissim/Viswalk). Таке моделювання доцільно застосовувати при оцінці функціонування, зокрема, новопроекттованих чи реконструйованих ТПВ.

В роботі [6] оцінка функціонування ТПВ проводиться з позиції часу, який проводять пасажирів в кожній із його зон. Визначено, що тривалість перебування у ТПВ та виходу з нього змінюється залежно від дня тижня (робочий, вихідний/святковий чи передсвятковий). Результати роботи можна застосовувати, наприклад, для оцінки пропускної здатності вузла та управління вузлом в періоди нетипового збільшення пасажиропотоку.

Дослідженням часових чинників функціонування транспортно-пересадкового вузла займалися і науковці [7, 8]. На основі даних опитувань щодо тривалості та умов очікування пасажирами ТПВ пересадки формуються рекомендації щодо планування та розмірів зон очікування пасажирів з урахуванням структури пасажиропотоку у ТПВ [7] та пропонується методика розрахунку мінімальної тривалості пересадки у залізничному вузлі [8].

Також проводилися дослідження переміщень пасажирів в межах ТПВ на основі даних стільникового зв'язку. Зокрема, в роботі [9] автори на основі досліджень, проведених в транспортному вузлі Хунцяо (Шанхай), проаналізували подальші напрямки руху пасажирів та визначили, для якої частки користувачів територія ТПВ є частиною їх щоденних маршрутів.

**Формулювання цілей статті.** Транспортно-пересадкові вузли є пунктами генерації та притягання великих обсягів пасажиропотоків в межах міської транспортної системи. Однак на даний

момент більшість досліджень зосереджено на комплексній оцінці загального пасажиропотоку у транспортно-пересадковому вузлі. Розподіл пасажиропотоку між різними зонами ТПВ при прибутті та відправці є цікавим, але досі недостатньо висвітленим питанням.

Основна ціль дослідження – сформулювати модель розподілу пасажиропотоків між зонами їх відправки з ТПВ в місто та прибуття з міста в ТПВ та визначити чинники, які впливають на кількісні характеристики такого розподілу.

**Виклад основного матеріалу.** При використанні гравітаційної моделі на основі початкових даних про генеруючу та притягуючу здатність транспортних районів розраховується матриця кореспонденцій між ними. Для коректного розподілу необхідно володіти інформацією про те, як сприймають учасники руху різні параметри свого переміщення (відстань, тривалість, вартість тощо). Математичне відображення цього відбувається з допомогою функції корисності.

Розподіл переміщень між районами відбувається за залежністю [10, ст. 157]:

$$F_{ij} = k_{ij} \cdot Q_i \cdot Z_j \cdot f(U_{ij}) \quad (1)$$

де  $Q_i$  – генеруюча здатність  $i$ -ого району відправки;

$Z_j$  – притягуюча здатність  $j$ -ого району прибуття;

$U_{ij}$  – значення корисності переміщення між транспортними районами;

$k_{ij}$  – коефіцієнт нормування для переміщень з району  $i$  в район  $j$  (використовується для стикування сумарних обсягів відправок і прибуттів).

При моделюванні використано функцію корисності типу ВохСох [10, ст. 158]:

$$f(U_{ij}) = e^{\frac{U_{ij}^b - 1}{c}} \quad (2)$$

де  $a, b, c$  – параметри функції корисності, які підбираються шляхом порівняння змодельованих результатів з фактичними (отриманими під час натурних обстежень, опитувань тощо).

Корисність переміщення є лінійною комбінацією параметрів, що визначають ступінь впливу на учасника руху різних чинників:

$$U_{ij} = \sum_{i=1}^n \beta_i \cdot X_i \quad (3)$$

Де  $X_i$  – чинник, який впливає на вибір користувача;

$\beta_i$  – коефіцієнт оцінки ступеня впливу чинника на загальну ймовірність вибору

При розподілі переміщень в межах транспортно-пересадкового вузла тривалість чи від-



стань переміщення не має особливого значення для користувача транспортних послуг. Розподіл відбувається залежно від вибору подальшого способу переміщення.

Транспортно-пересадковий вузол «Головний залізничний вокзал» у м. Львові за можливими напрямками розподілу потоків можна поділити на 7 зон: залізничні перони (zone 1), зупинки міських автобусних маршрутів (zone 2), зупинки міжміських автобусних маршрутів (zone 3), зупинки міських трамвайних маршрутів (zone 4), місце зупинки таксі (zone 5), стоянки приватного автотранспорту (zone 6) та умовну зону виходу для осіб, які прибувають з міста в ТПВ чи відправляються з ТПВ в місто пішки (zone 7) – рис. 1.

Основні характеристики цих зон, які визначають їх привабливість для користувача транспортних послуг, подано в табл. 1.

Для отримання фактичного розподілу пішохідних потоків між зонами досліджуваного транспортно-пересадкового вузла проведено натурні обстеження, в ході яких підраховано кількість пасажирів, що здійснюють посадку та висадку на зупинках ГПТ та в таксі, кількість пішоходів, що здійснюють рух в напрямку до та від автостоянки і до та від виходу в місто. Ці дослідження проводилися з 13:00 до 14:00 год протягом 5 робочих днів тижня у вересні 2021 року. Результати окремих днів відрізняються між собою максимум на 12%, що дозволяє використовувати усереднені значення для подальших обчислень. Відсотковий розподіл між різними способами «виходу» з ТПВ в місто подано на рис. 2а, прибуття з міської території до ТПВ – на рис. 2б.

Найбільшою є різниця між часткою користувачів приватних автомобілів: прибувають у вузол автомобілями 12% користувачів, а відправляються



Рис. 1. Поділ території ТПВ «Головний залізничний вокзал» на зони та їх взаємне розташування

Таблиця 1

**Характеристики окремих зон ТПВ «Головний залізничний вокзал»**

Зона ТПВ	Характеристика
Зона 1	Залізничний вокзал «Львів» працює цілодобово, протягом доби має 73 відправки у внутрішньому сполученні та 13 – у міжнародному.
Зона 2	Автобусна зупинка ГПТ «Залізничний вокзал» обслуговується 5 маршрутами, середній інтервал руху яких коливається в межах 10 – 20 хв. Початок руху – 6:00, закінчення – 22:00. Зупинка є кінцевою для всіх маршрутів. Вартість проїзду – 10 грн.
Зона 3	З автовокзалу «Двірцевий» відправляються автобуси міжміського та міжнародного сполучення. Внутрішні перевезення виконуються в трьох напрямках. Період роботи – з 6:00 до 24:00. Кількість відправок за добу у внутрішньому сполученні – 64, міжнародних – 31.
Зона 4	Трамвайна зупинка ГПТ «Залізничний вокзал» обслуговується 2 маршрутами, середній інтервал руху яких коливається в межах 10 – 15 хв. Початок руху – 6:00, закінчення – 22:00. Зупинка є кінцевою для всіх маршрутів. Вартість проїзду – 10 грн.
Зона 5	Зона зупинки та стоянки таксі є цілодобовою, вартість проїзду залежить від відстані поїздки та оператора таксі. В межах міста вартість коливається від 40 до 250 грн.
Зона 6	Вартість паркування – 45грн/добу. Година паркування – 25 грн.
Зона 7	ТПВ знаходиться в межах 30 хв пішої ходьби до центру міста.

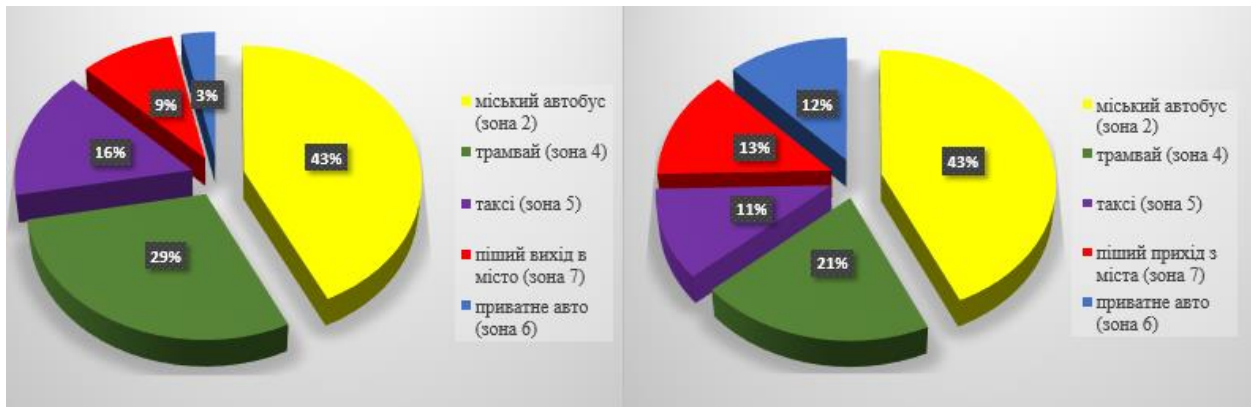


Рис. 2. Розподіл загальної кількості пасажирів, що прибули в ТПВ, між зонами 2 та 4–7

з вузла в місто – тільки 3%. Причиною може бути небажання людей залишати автомобіль на паркувальному майданчику (через вартість паркування чи тривогу за безпеку автомобіля). Тому люди приїжджають не самі, а з кимось, хто забере їх автомобіль.

Розподіл фактичної годинної кількості переміщень між зонами досліджуваного ТПВ подано на рис. 3 (для кращої візуалізації на рисунку зміщене фактичне взаємне розташування зон).

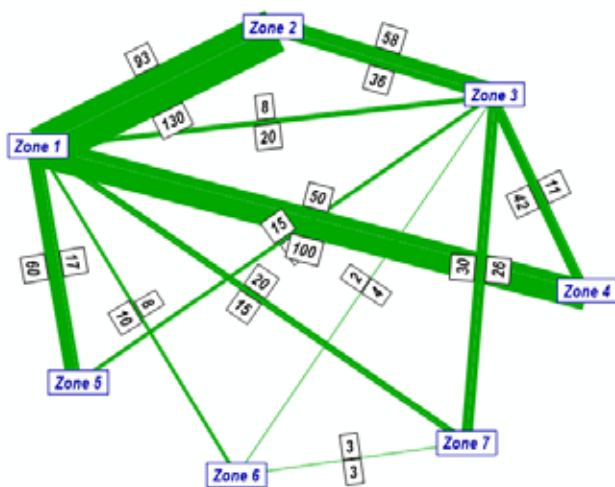


Рис. 3. Годинна кількість переміщень між зонами в межах ТПВ

Наймасовіші пішохідні потоки спостерігаються між залізничним вокзалом та автобусною і трамвайною зупинками громадського транспорту.

Для подальшого моделювання добового обсягу пасажиропотоків у ТПВ проведено аналіз розподілу кількості прибуттів та відправок залізничних потягів та автобусів міжміського сполучення протягом доби (табл. 2).

Нічний часовий період (з 00:00 до 06:00 год) об'єднано, оскільки міський громадський тран-

спорт в цей час не працює, і більшість пасажирів прибувають з міста в ТПВ чи відправляються з ТПВ у місто на таксі. 29% всіх залізничних маршрутів прибувають чи відправляються вночі.

На основі цих даних проведено оцінку нерівномірності пасажиропотоку у ТПВ протягом дня (рис. 4) та розраховано матрицю добових кореспонденцій між зонами ТПВ у PTV Visum.

Добовий обсяг пасажирів, які користуються послугами ТПВ, за результатами моделювання становить 16455 осіб. Аналізуючи зміну обсягів пасажиропотоку в ТПВ протягом доби, можна зробити такі висновки:

- В нічний період доби (з 00:00 до 06:00 год) ТПВ обслуговує в середньому 11% добового пасажиропотоку. Це в основному пасажирів, які переміщуються між зонами 1, 5 та 6 досліджуваного транспортно-пересадкового вузла.

- Протягом дня пасажиропотік розподіляється таким чином: з 6:00 до 7:00 ранку обслуговується 12% добового пасажиропотоку (що пов'язано з найбільшою щільністю прибуттів і відправок потягів в цей період), з 7:00 до 12:00 год обслуговується 25% пасажиропотоку, з 12:00 до 17:00 год – 16%, з 17:00 до 22:00 год – 23%, з 22:00 до 24:00 год – 13%.

**Висновки.** Транспортно-пересадкові вузли, розташовані в межах міста, забезпечують взаємодію різних видів міського та позаміського транспорту. ТПВ «Головний залізничний вокзал» у м. Львові поєднує на своїй території залізничний вокзал, автовокзал, автобусну та трамвайну зупинки міського громадського транспорту, місця стоянки таксі та приватних автомобілів.

Згідно результатів натурних спостережень в робочі дні тижня, 72% пасажирів, що прибувають в місто, пересідають у ТПВ на міський громадський транспорт. Тих, що прибувають з міської території в транспортно-пересадковий вузол на

ГПТ, 64%. Найбільшою є різниця між напрямками «місто–ТПВ» та «ТПВ–місто» частки користувачів приватних автомобілів: 12% та 3% відповідно. Досить велика частка користувачів таксі – 11 і 16% (порівняно з даними про розподіл переміщень за видами загалом в місті – в межах 3%). Очевидною причиною є функціонування ТПВ в нічний період, коли громадський транспорт не працює.

Серед інших можливих причин: наявність багажу у людей, і, відповідно, незручність переміщення громадським транспортом, особливо при відсутності безпересадкового сполучення.

В програмному середовищі PTV Visum змодельовано добовий пасажиропотік ТПВ (16455 осіб) та отримано матрицю переміщень пасажирів між окремими зонами вузла. З урахуванням інтенсив-

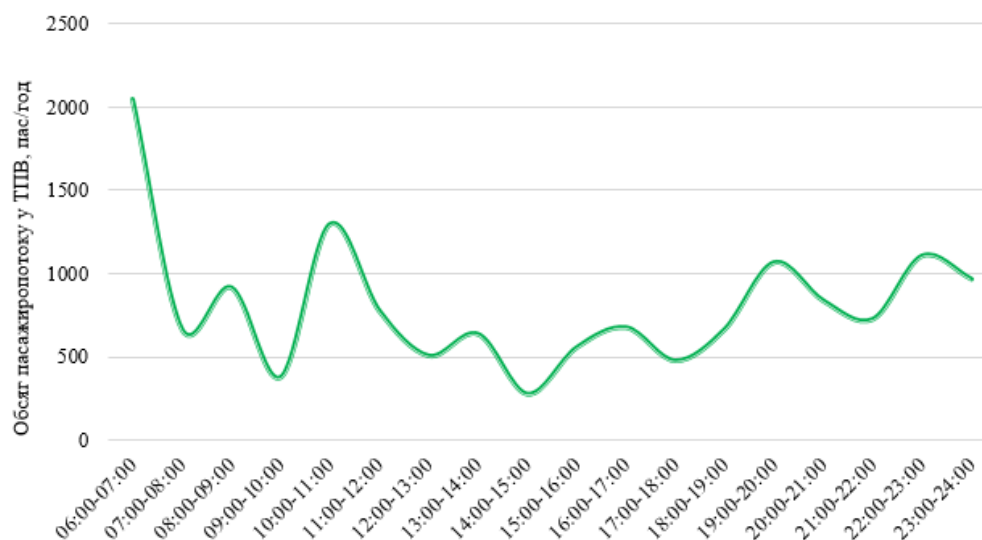


Рис. 4. Денна нерівномірність пасажиропотоків у ТПВ

Таблиця 2

**Розподіл кількості відправок та прибуттів позаміських маршрутів ТПВ «Головний залізничний вокзал»**

Часовий період доби	Залізничне сполучення			Автобусне сполучення		
	Кількість прибуттів	Кількість відправок	Сума	Кількість прибуттів	Кількість відправок	Сума
00:00 – 06:00	30	25	55	-	-	
06:00-07:00	13	8	21	4	6	10
07:00-08:00	2	4	6	5	4	9
08:00-09:00	5	3	8	6	7	13
09:00-10:00	3	0	3	5	3	8
10:00-11:00	9	3	12	8	7	15
11:00-12:00	2	6	8	4	1	5
12:00-13:00	2	1	3	4	10	14
13:00-14:00	3	2	5	5	7	12
14:00-15:00	1	1	2	4	3	7
15:00-16:00	1	3	4	6	7	13
16:00-17:00	3	2	5	5	9	14
17:00-18:00	2	2	4	6	3	9
18:00-19:00	4	1	5	4	9	13
19:00-20:00	7	3	10	7	5	12
20:00-21:00	1	7	8	6	3	9
21:00-22:00	4	3	7	2	4	6
22:00-23:00	6	5	11	4	4	8
23:00-24:00	3	7	10	1	3	4
Сума	101	86	187	86	95	181

ності прибуття та відправки позаміських автобусних і залізничних маршрутів визначено зміну пасажиропотоку у вузлі з розподілом за годинами доби.

Результати моделювання дозволяють визначати доцільні інтервали руху транспортних засобів на міських маршрутах громадського транспорту, які обслуговують ТПВ, щоб задовільнити попит на цей вид переміщень. Врахування обсягу

пасажиропотоку між зоною залізничних перонів та автобусних платформ дозволить оцінити потребу в узгодженості розкладів руху позаміських маршрутів.

В межах цієї роботи не вивчалось, як змінюється пасажиропотік ТПВ у вихідні чи святкові дні, що може бути завданням подальших досліджень.

#### Список літератури:

1. Wang X., Rong C. Function-Based Classification Method for Traffic Hub. *Mechanics and Materials*. 2011. Vol. 97/98. P. 779 – 782.
2. Wei-wen Mao, Shi-wei He. Research on High-speed Railway Hub Passenger Transport System Planning Evaluation System. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2020. Vol. 587. doi: 10.1088/1755-1315/587/1/012118.
3. Ren X., Li L. Research on Passenger Volume Demand Prediction for External Passenger Transport Hub Based on Genetic Neural Network. *1st International Conference on Transportation Infrastructure and Materials*. 2016. P. 535 – 542.
4. Jing Z., Yin X. Neural Network-Based Prediction Model for Passenger Flow in a Large Passenger Station: An Exploratory Study. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 36876-36884. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2972130.
5. Yoongho Ahn, Tomoya Kowada, Hiroshi Tsukaguchi, Upali Vandebona. Estimation of Passenger Flow for Planning and Management of Railway Stations. *Transportation Research Procedia*. 2017. Vol. 25. P. 315-330. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2017.05.408>.
6. Liu T, Shan J, Liu X, Shang T. Departure efficiency evaluation of a comprehensive transport hub based on Wi-Fi probe data and a multilayer hybrid model. *PLoS ONE*. 2022. Vol. 17(3):e0264473. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0264473>
7. Havlena Ondřej, Jacura Martin, Javořík Tomáš, Svetlík Marián. Area claims of the passengers at mass public transport hubs. *Transport Problems: an International Scientific Journal*. 2013. Vol. 8. P. 83-88.
8. Vojtek Martin, Skrucany Tomas, Kendra Martin, Ponický Ján. Methodology for calculation of minimum transfer time in the transport hub. *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 235(2)5:00015. doi:10.1051/mateconf/201823500015.
9. Zhong Gang, Yin Tingting, Zhang Jian, He Shanglu, Ran Bin. Characteristics analysis for travel behavior of transportation hub passengers using mobile phone data. *Transportation*. 2019. Vol. 46. doi: 10.1007/s11116-018-9876-5.
10. PTV Vision: VISUM 11.5 Basics – Karlsruhe: PTV AG, 2010. – 756 с.

#### **Pivtorak H.V., Gits I.I., Zhyla M.P. ESTIMATE OF PASSENGER FLOW DISTRIBUTION IN EXTERNAL TRANSPORT HUB**

*External transport hubs (ETH) are an important element of the urban transport system, a place of interaction between urban and suburban transport. Studying the characteristics of the distribution of passengers between ETH's zones and what mode of movement passengers use when moving in the directions "city-ETH" and "ETH-city", will optimize hub capacity, and improve passenger service and transport system in general.*

*ETH "Main Railway Station" in Lviv combines zones of suburban rail and bus transport, stops of city tram and bus routes, taxi stands, and parking for private cars. Based on data collection conducted on weekdays, information was obtained on the walking volume between individual zones of the external transport hub and the distribution of passenger arrivals from urban areas to ETH and vice versa between modes of movement (public transport, taxis, own transport, and pedestrian traffic). The influence of the intensity of arrival and departure of the suburban railway and bus routes, as well as the frequency of urban public transport routes on the volume of passenger traffic in ETH is determined. In the software environment of PTV Visum the simulation of daily passenger traffic in ETH was performed and the origin-destination matrices between the zones of the hub with the distribution by hours of the day were obtained. The utility function of movements between individual zones takes into account the alternatives and characteristics of further movement options.*

*The obtained results can be used to optimize the functioning of the passenger transport hub: identifying "bottlenecks" and increasing their capacity, adjusting the time of departure/arrival of suburban bus routes, taking into account train schedules, and optimizing the frequency of vehicles on urban public transport routes, who serve ETH.*

**Key words:** external transport hub, passenger flow, mode choice, modelling, PTV Visum.

УДК 629.463. 001.63  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/33>

**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВЕРТИКАЛЬНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ ВАГОНА-ХОПЕРА ДВОХСЕКЦІЙНОГО

У статті наведені результати дослідження вертикальної навантаженості вагона-хопера двохсекційного. Особливістю несучої конструкції вагона є те, що вона розділена на дві окремі секції, що сприяє можливості здійснення перевезень різнотипних вантажів у ньому. В зонах обпирання секцій вагона-хопера на середню частину рами встановлена балка прямокутного перерізу для забезпечення відповідної жорсткості конструкції. При проектуванні вагона у якості прототипу обрано вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укрспецвагон" (Україна).

Для визначення основних показників динаміки вагона проведено математичне моделювання в плоскій системі координат. До уваги прийняті поступальні та кутові переміщення вагона у вертикальній площині. Враховано, що вагон рухається у порожньому стані стиковою нерівністю. Колія при цьому має пружно-в'язкі властивості. В моделі враховано технічні характеристики візків моделі 18-100. Визначення інерційних коефіцієнтів несучої конструкції здійснено за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks, де побудовано просторову модель кузова.

Розв'язок математичної моделі здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю. Результати розрахунків встановили, що всі досліджувані показники динаміки знаходяться в межах допустимих. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали  $5,2 \text{ м/с}^2$  ( $0,53g$ ), прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють  $8,4 \text{ м/с}^2$  ( $0,86g$ ). Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків складають  $42,7 \text{ кН}$ . Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює  $0,6$ . Рух вагона оцінюється як "добрий".

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності експлуатації вагонів-хоперів, а також створенню напрацювань щодо проектування їх перспективних конструкцій.

**Ключові слова:** транспортна механіка, вагон-хопер, несуча конструкція, динамічна навантаженість, показники динаміки.

**Постановка проблеми.** Залізничний транспорт вже тривалий час є найбільш пріоритетною галуззю транспортної системи. Він забезпечує можливість перевезення майже всіх типів вантажів та є одним з найбільш безпечних. Разом з цим для утримання першості залізничної галузі на ринку вітчизняних та міжнародних перевезень важливим є впровадження в експлуатацію перспективних конструкцій рухомого складу, які мають не тільки покращені техніко-економічні показники, а і характеризуються багатofункціональністю, тобто можливістю перевезень широкою номенклатури вантажів.

Одним з найбільш небезпечних вантажів, які перевозяться залізницею є високотемпературні. Для їх транспортування використовуються здебільшого вагони-хопери. Важливо сказати, що даний тип вагону є вузькоспеціалізованим. Для

підвищення ефективності експлуатації вагонів-хоперів можливим є удосконалення їх несучих конструкцій шляхом адаптації до перевезень більш широкою номенклатури вантажів, в тому числі одночасного перевезення різнотипних вантажів. Це сприятиме рентабельності залізничних перевезень, а також створенню напрацювань щодо проектування перспективних конструкцій рухомого складу.

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

В роботі [1] розглянуто розробку та оптимізацію технологічного процесу вакуумної інфузії для виготовлення вагонів-хоперів з використанням полімерних композиційних матеріалів. Дослідження проведені стосовно вагона-хопера моделі 19-5167. Обґрунтовано використання полімерних композиційних матеріалів в складових кузова і даху.



В публікації [2] розглянуто питання оптимізації дизайну вагонів-хоперів із використанням функціональних стільникових сендвіч-панелей. Розроблена нова процедура оптимізації конструкції для мінімізації ваги вагонів-хоперів. Встановлено, що запропонована методологія дозволяє зменшити матеріалоемність вагона-хопера більше ніж на 16% у порівнянні з прототипом. Разом з цим запропоновані конструкції вагонів-хоперів не дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у них, що скорочує їх ефективність експлуатації.

Особливості застосування перспективних матеріалів у вагонобудуванні, зокрема, магнієвих сплавів для підвищення ефективності їх експлуатації висвітлюється у роботі [3]. Екструдовані елементи, що утворюють кузов вагона, були розроблені з використанням алгоритму оптимізації. Наведені результати чисельного моделювання, які підтвердили конструктивні характеристики нового кузова вагона.

В публікації [4] розглянуто проектування кузова залізничного транспортного засобу з екструдованих алюмінієвих панелей. При цьому застосовано структурну оптимізацію. Кожна алюмінієва панель виготовлена з сендвіч-панелей, які зварені між собою. Запропонована конструкція кузова сприяє зменшенню його маси при збереженні достатньої міцності. Важливо сказати, що авторами не досліджено температурної навантаженості несучих конструкцій удосконалених вагонів. Також запропоновані конструкції вагонів не сприяють можливості одночасного перевезення різнотипних вантажів.

Для спрощення конструкції кузова вагона, зменшення його ваги та поліпшення механічних властивостей в публікації [5] запропоновано заміну сендвіч панелей на профлист. Жорсткість кузова вагона оцінено шляхом модального аналізу. Встановлено, що запропоновані панелі зменшують масу кузова вагона на 600–700 кг у порівнянні з типовою конструкцією.

Методологія багатомасштабного проектування та оптимізації сендвіч-конструкцій з решітчастою серцевиною для легких вагонів-хоперів висвітлюється в роботі [6]. При проектуванні вагона використані Північноамериканські стандарти. Запропонований дизайн був підтверджений шляхом порівняння комп'ютерного моделювання з точними аналітичними рівняннями. Важливо сказати, що запропоновані конструкції вагонів не дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів.

В роботі [7] проведено визначення основних показників міцності несучих конструкцій вагонів, в тому числі, вагона-хопера, які вичерпали свій нормативний ресурс експлуатації. Встановлено, що строк служби досліджуваних несучих конструкцій вагонів може бути продовженим. Запропоновано модернізацію несучих конструкцій вагонів під перевезення завданої номенклатури вантажів. Однак при проведенні розрахунків авторами не враховано термічні навантаження, які можуть діяти на несучі конструкції вагонів в експлуатації.

Обґрунтування створення несучих конструкцій вагонів секційного типу з труб круглого перерізу проводиться у роботі [8]. Дані конструкції вагонів дозволяють здійснювати одночасне перевезення різнотипних вантажів у одному вагоні. Для зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів запропоновано використання на них концепту упряжного пристрою. Разом з цим процес проектування та технічного обслуговування даних конструкцій вагонів викликає складнощі в експлуатації.

Аналіз літературних джерел [1 – 8] дозволяє зробити висновок, що питання удосконалення несучих конструкцій вагонів-хоперів є досить актуальними. Однак вони потребують подальшого розвитку для підвищення ефективності їх експлуатації. Тому виникає необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

#### **Постановка завдання.**

**Метою дослідження** є висвітлення особливостей визначення вертикальної навантаженості вагона-хопера двохсекційного в експлуатації. Для досягнення поставленої мети сформовані такі завдання:

- створити розрахункову схему вагона-хопера двохсекційного для визначення основних показників його динаміки;
- визначити основні показники динаміки вагона-хопера двохсекційного.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** Для підвищення ефективності залізничних перевезень запропоновано конструкцію вагона-хопера двохсекційного (рис. 1). Особливістю його несучої конструкції є те, що вона розділена на дві окремі секції, що сприяє можливості перевезень різнотипних вантажів у ньому. В зонах обпирання секцій на середню частину рами встановлена балка прямокутного перерізу для забезпечення відповідної жорсткості конструкції. При проектуванні вагона у якості прототипу обрано

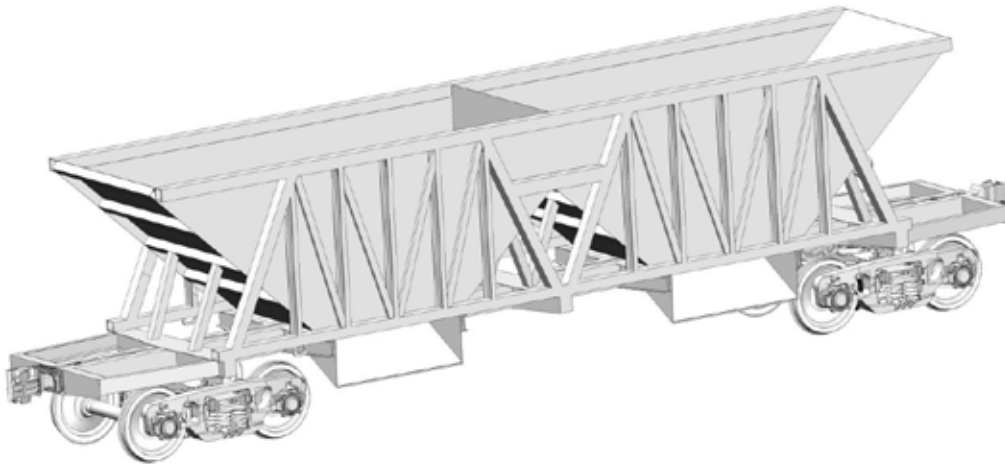


Рис. 1. Вагон-хопер двохсекційний

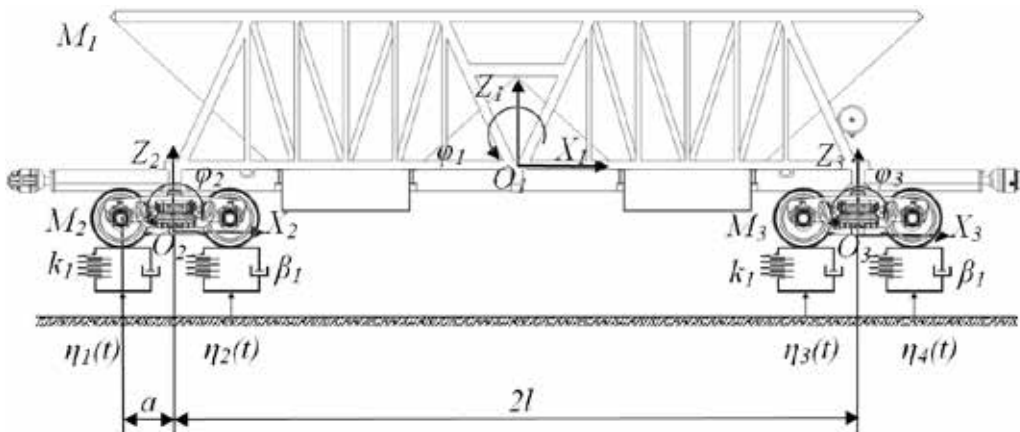


Рис. 2. Розрахункова схема вагона-хопера

вагон-хопер моделі 20-9749, побудови ДП "Укр-спецвагон" (Україна).

Для визначення вертикальної навантаженості вагона-хопера проведено математичне моделювання. При цьому використано математичну модель, наведену у роботі [9]. Модель описує поступальні та кутові переміщення вагона-хопера у вертикальній площині при його русі стиковою нерівністю. Колія при цьому розглянута як пружно-в'язка.

Розрахункова схема вагона-хопера наведена на рис. 2. Враховано, що вагон переміщується у порожньому стані оскільки при цьому спостережується найбільша навантаженість його конструкції.

В моделі враховано технічні характеристики візків моделі 18-100.

$$M_1 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_1 + C_{1,1} \cdot q_1 + C_{1,3} \cdot q_3 + C_{1,5} \cdot q_5 = -F_{TP} \cdot (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (1)$$

$$M_2 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_2 + C_{2,2} \cdot q_2 + C_{2,3} \cdot q_3 + C_{2,5} \cdot q_5 = F_{TP} \cdot l \cdot (\Delta_1 + \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_3 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_3 + C_{3,1} \cdot q_1 + C_{3,2} \cdot q_2 + C_{3,3} \cdot q_3 + B_{3,3} \cdot \frac{d}{dt} q_3 = \\ = F_{TP} \cdot \Delta_1 + k_1 (\eta_1 + \eta_2) + \beta_1 \left( \frac{d}{dt} \eta_1 + \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \quad (3)$$

$$M_4 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_4 + C_{4,4} \cdot q_4 + B_{4,4} \cdot \frac{d}{dt} q_4 = \\ = -k_1 (\eta_1 - \eta_2) - \beta_1 \cdot a \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta_1 - \frac{d}{dt} \eta_2 \right), \quad (4)$$

$$M_5 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_5 + C_{5,1} \cdot q_1 + C_{5,2} \cdot q_2 + C_{5,5} \cdot q_5 + B_{5,5} \cdot \frac{d}{dt} q_5 = \\ = F_{TP} \cdot \Delta_2 + k_1 (\eta_3 + \eta_4) + \beta_1 \left( \frac{d}{dt} \eta_3 + \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \quad (5)$$

$$M_6 \cdot \frac{d^2}{dt^2} q_6 + C_{6,6} \cdot q_6 + B_{6,6} \cdot \frac{d}{dt} q_6 = \\ = -k_1 \cdot a \cdot (\eta_3 - \eta_4) - \beta_1 \cdot a \cdot \left( \frac{d}{dt} \eta_3 - \frac{d}{dt} \eta_4 \right), \quad (6)$$

$$\Delta_1 = \text{sign} \left( \frac{d}{dt} \delta_1 \right), \quad \Delta_2 = \text{sign} \left( \frac{d}{dt} \delta_2 \right), \quad (7)$$



$M_1, M_2$  – відповідно, маса та момент інерції несучої конструкції вагона-хопера;  $M_3, M_4$  – відповідно, маса та момент інерції першого за ходом руху візка;  $M_5, M_6$  – відповідно, маса та момент інерції другого за ходом руху візка;  $C_{ij}$  – характеристика пружності складових коливальної системи;  $B_{ij}$  – функція розсіювання;  $a$  – напівбаза візка;  $q_i$  – узагальнені координати, що відповідають поступальному та кутовому переміщенням навколо вертикальної вісі, відповідно, кузова вагона-хопера, першого та другого візка;  $k_i$  – жорсткість ресорного підвішування візків;  $\beta_i$  – коефіцієнт демпфірування;  $F_{TP}$  – сила тертя, що виникає у ресорному комплекті.

Вхідні параметри, які використовувалися при математичному моделюванні наведені у табл. 1. Визначення інерційних коефіцієнтів несучої конструкції здійснено за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks, де побудовано просторову модель кузова.

Розв’язок математичної моделі (1) – (6) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad. Початкові переміщення та швидкості прийняті рівними нулю [10, 11]. Результати розрахунків наведені на рис. 3 – 6.

Результатирозрахунківвстановили,щоотримані показники динаміки знаходяться в межах допустимих [12, 13]. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали  $5,2 \text{ м/с}^2$  ( $0,53g$ ),

Таблиця 1

**Вхідні параметри до математичного моделювання вертикальної навантаженості вагона-хопера**

Назва параметру	Розмірність	Значення
Несуча конструкція вагона-хопера		
Маса	т	12,3
Момент	$\text{т} \cdot \text{м}^2$	206,3
Напівбаза	м	5,07
Візок		
Маса	т	4,3
Момент інерції	$\text{т} \cdot \text{м}^2$	3,0
Напівбаза	м	0,925
Жорсткість ресорного підвішування	кН/м	8000
Коефіцієнт відносного тертя		0,1
Колія		
Жорсткість	кН/м	100000
Коефіцієнт демпфірування	$\text{кН} \cdot \text{с} / \text{м}$	200
Амплітуда нерівності	м	0,01
Довжина нерівності	м	3,0
Відстань між нерівностями	м	25,0

прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють  $8,4 \text{ м/с}^2$  ( $0,86g$ ). Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків складають  $42,7 \text{ кН}$ . Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює  $0,6$ .

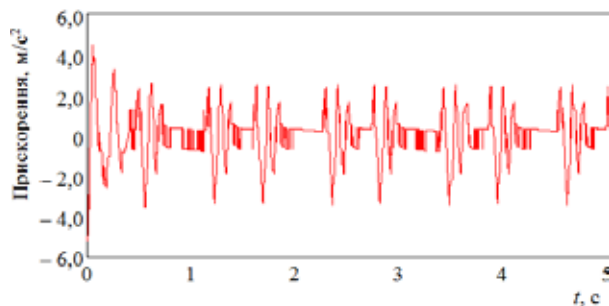


Рис. 3. Прискорення в центрі мас несучої конструкції вагона-хопера

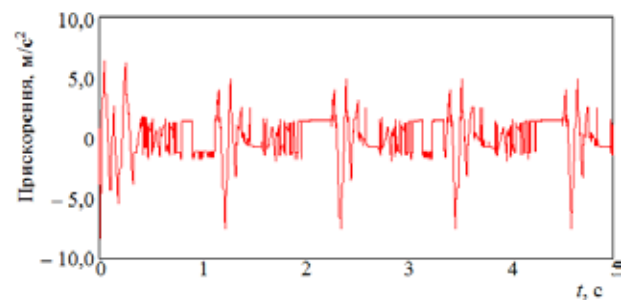


Рис. 4. Прискорення несучої конструкції вагона-хопера з зонах спирання на візки

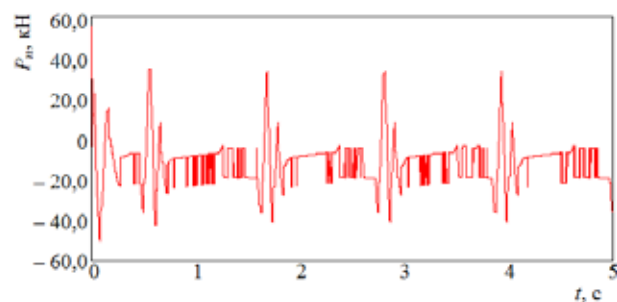


Рис. 5. Сили в ресорному підвішуванні

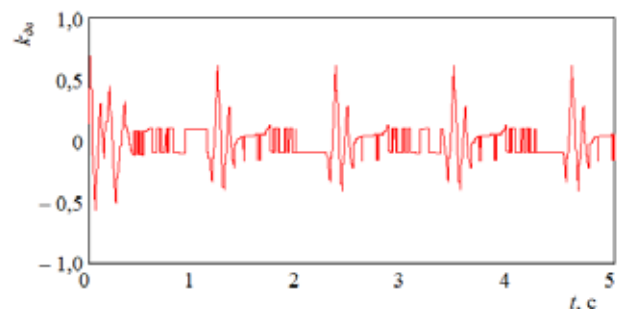


Рис. 6. Коефіцієнт вертикальної динаміки

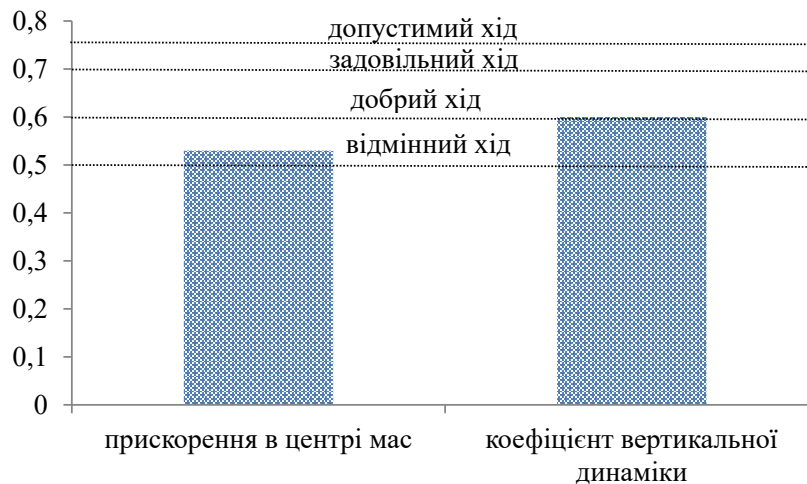


Рис. 7. Показники динаміки вагона-хопера двохсекційного

Розраховані показники динаміки відповідають “доброму” ходу руху вагона (рис. 7).

При цьому прискорення, яке діє в центрі мас несучої конструкції на рис. 7 приведене в частках  $g$ .

#### Висновки.

1. Створено розрахункову схему несучої конструкції вагона-хопера двохсекційного для визначення основних показників його динаміки. Дослідження проведені у плоскій системі координат. Модель враховує переміщення

вагона стиковою нерівністю у порожньому стані.

2. Визначено основні показники динаміки вагона-хопера двохсекційного. Прискорення, які діють на несучу конструкцію в центрі мас склали  $5,2 \text{ м/с}^2$ , прискорення в зонах спирання несучої конструкції на візки дорівнюють  $8,4 \text{ м/с}^2$ . Сили, що діють в ресорному підвішуванні візків склали  $42,7 \text{ кН}$ . Коефіцієнт вертикальної динаміки дорівнює  $0,6$ . При цьому хід руху вагона оцінюється як “добрий”.

#### Список літератури:

1. Ushakov A. E., Safonov A. A., Sergeichev I. V., et al. Design and optimization of a vacuum infusion technological process for hopper car fabrication using polymeric composite materials. *J Mach Manuf Reliab*. 2015, Vol. 44(3). P. 276 – 282. doi:10.3103/S105261881503022X
2. Ayman Al-Sukhon, Mostafa SA ElSayed. Design optimization of hopper cars employing functionally graded honeycomb sandwich panels. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2021, December. doi: 10.1177/09544097211049640
3. Lee W. G., Kim J. S., Sun S. J., et al. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2016, Vol. 232(1). P. 25 – 42. doi:10.1177/0954409716646140.
4. Lee H. A., Jung S. B., Jang H. H., et al. Structural-optimization-based design process for the body of a railway vehicle made from extruded aluminum panels. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2015, Vol. 230(4). P. 1283 – 1296. doi:10.1177/0954409715593971.
5. Wennberg D., Stichel S., Wennhage P. Substitution of corrugated sheets in a railway vehicle’s body structure by a multiple-requirement based selection process. *Proc Inst Mech Eng F J Rail Rapid Transit*. 2012, Vol. 228(2). P. 143 – 157. doi:10.1177/0954409712467139.
6. Molavitabrizi D., Laliberte J. Methodology for multiscale design and optimization of lattice core sandwich structures for lightweight hopper railcars. *Proc Inst Mech Eng C: J Mech Eng Sci*. 2020, Vol. 234(21). P. 4224 – 4238. doi: 10.1177/0954406220920694.
7. Fomin Olexsij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021, Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534
8. Alyona Lovska, Olexsij Fomin, Vaclav Pistek, Pavel Kucera. Calculation of loads on carrying structures of articulated circular-tube wagons equipped with new draft gear concepts. *Applied Sciences*. 2020, Vol. 10(21). 7441. doi:10.3390/app10217441
9. Дьомін Ю. В., Черняк Г. Ю. Основи динаміки вагонів. Київ, 2003. 269 с.

10. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Establishing patterns in determining the dynamics and strength of a covered freight car, which exhausted its resource. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2020, Vol. 6. Issue 7 (108). P. 21 – 29. doi: 10.15587/1729-4061.2020.217162

11. Fomin Oleksij, Lovska Alyona. Determination of dynamic loading of bearing structures of freight wagons with actual dimensions. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021, Vol. 2/7 (110). P. 6 – 15. doi: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.220534>

12. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 162 с.

13. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. Москва, 2016. 54 с.

### **Fomin O.V., Lovska A.O. INVESTIGATION OF VERTICAL LOADING OF A HOPPER TWO-SECTIONAL WAGON**

*The article presents the results of the study of the vertical load of a two-section hopper car. The peculiarity of the load-bearing structure of the car is that it is divided into two separate sections, which facilitates the possibility of transportation of various types of cargo in it. In the support areas of the hopper sections, a rectangular beam is installed on the middle part of the frame to ensure the appropriate rigidity of the structure. When designing the car, a hopper car model 20-9749, built by Ukrspetsvagon (Ukraine), was chosen as a prototype.*

*Mathematical modeling in a flat coordinate system was performed to determine the main indicators of car dynamics. The translational and angular movements of the car in the vertical plane are taken into account. It is taken into account that the car moves in an empty state with butt roughness. The track has elastic and viscous properties. The model takes into account the technical characteristics of trolleys model 18-100. The inertial coefficients of the load-bearing structure were determined using the options of the SolidWorks software package, where a spatial model of the body was built.*

*The solution of the mathematical model was carried out by the Runge-Kutta method in the MathCad software package. Initial displacements and velocities are assumed to be zero. The results of the calculations showed that all the studied indicators of the dynamics are within acceptable limits. The accelerations acting on the load-bearing structure in the center of mass were  $5.2 \text{ m/s}^2$  (0.53g), the accelerations in the zones of support of the load-bearing structure on the carts are  $8.4 \text{ m/s}^2$  (0.86 g). The forces acting in the spring suspension of the trolleys are 42.7 kN. The coefficient of vertical dynamics is equal to 0.6. The movement of the car is assessed as "good".*

*The conducted researches will promote increase of efficiency of operation of hopper cars, and also creation of developments concerning designing of their perspective designs.*

**Key words:** transport mechanics, hopper car, load-bearing structure, dynamic loading, dynamics indicators.

УДК 656.613.2:629  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/34>

**Шибасєв О.Г.**

Одеський національний морський університет

**Сільванська Г.М.**

Одеський національний морський університет

## МЕТОД ДІЛОВИХ ІГОР В ОЦІНЦІ ПЕРСОНАЛУ СУДЕН У РОБОТІ КРЮЇНГОВИХ КОМПАНІЙ

*У статті представлені методичні положення щодо розробки та застосування методу ділових ігор при використанні Корпоративних інформаційних систем (КІС). Показано склад та взаємозв'язок елементів ігрового процесу. Корпоративні інформаційні системи впливають на теорію і практику менеджменту [4, 5]. У зв'язку з вивченням впливу мережесевих технологій на менеджмент компаній, провідними американськими аналітиками (Чарльз Севідж, Джеймс О'Брайен), відзначено глобальну тенденцію підвищення загальної інформованості, ролі знання, довіри та обізнаності менеджерів усіх рівнів корпорації при посиленні горизонтальних структур менеджменту (замість традиційних вертикальних структур). На зміну вертикальній лінійно-функціональній структурі йде ланкова структура управління, де кожна ланка має вихід на інформаційний сервер робочої групи, сервер організації, сервер корпорації. Це означає риси менеджменту нового, п'ятого покоління – покоління 21-го століття [1, 2].*

*Із впливом нових інформаційних технологій через корпорації на теорію та практику управління пов'язана ще одна потужна тенденція – реінжиніринг бізнес-транспортних процесів, що є комплексним і ґрунтовним переглядом бізнес-процесів в організації транспортних систем, який може різко, в 5-10 і більше разів, підвищити ефективність роботи за рахунок вивчення досвіду своїх кращих фахівців (експертів), фіксації їх знань у базі знань корпорації та радикального перепроєктування транспортних процесів компанії на цій основі [1, 3, 4].*

*Корпоративні інформаційні системи та реінжиніринг транспортних процесів – це дві супутні та взаємно посилюючі одна одну нові тенденції у сфері застосування розвинених спеціалізованих систем підтримки прийняття рішень (СППР). Використання розвинених спеціалізованих СППР забезпечує менеджерам творчу свободу моделювання альтернатив рішень. У цій тріаді перша КІС забезпечує для менеджменту детальну і точну інформацію по всьому комплексу процесів і ділових функцій [5, 6].*

*Була дана постановка та математична модель завдання щодо формування завантаження судна. Вказано місце та значимість завдання завантаження судна.*

**Ключові слова:** інформаційні системи, персонал суден, крьюінгова компанія, ділова гра, сумісність, компетентність, члени екіпажу.

### Постановка проблеми.

На сьогодні визнано, що вирішальним фактором виживання та успіху організації є управління людськими ресурсами (УЛР). Сьогодні УЛР – важливий фактор забезпечення конкурентоспроможності компаній. Управління персоналом (УП) є важливим елементом ширшого поняття – управління людськими ресурсами (УЛР), хоча на практиці обидва ці терміни найчастіше використовуються як синоніми [5; 9; 10].

Головна відмінність між УП та УЛР пов'язана з рівнем управління. УП – управління всередині організації, управління людськими ресурсами – на рівні «вище за фірму» (локальний/місцевий, регіональний, національний, міжнародний). З іншого боку, УП спрямовано на конкретну людину чи людську групу, УЛР – на людські ресурси, тобто людські здібності. Сфера інтересів УЛР загалом перемістилася з національних проблем на багатонаціональні та глобальні.

В організаційній сфері УЛР включає більше стратегічних питань, що належать до інтересів бізнесу самої організації.

УЛР – це стратегія, яка спрямована на пошук шляхів активізації людського чинника всередині організації та облік соціально-психологічних особливостей персоналу, що є одним з основних напрямів підвищення ефективності діяльності будь-якої фірми. При цьому в центрі системи управління розглядається людина. З огляду на вищезазначене, всі аспекти управління націлені на пробудження здібностей та психологічних особливостей працівників для того, щоб вони були максимально використані в процесі виробництва [5, 6, 9].

Світова рецесія, зокрема й у судноплаванні, яка викликана пандемією коронавірусу, підвищує гостроту кадрової конкурентної боротьби та посилює вимоги щодо компетентності і кваліфікації плавскладу.

Формування екіпажів суден та забезпечення високої якості кадрового потенціалу – це головні важелі підвищення ефективності функціонування та конкурентоспроможності судноплавних компаній. Тому проектування комплексної інформаційної системи управління плавскладом судноплавної компанії набуває особливої теоретичної та практичної значущості. Одним із центрів реалізації кадрової політики є крьюінгові компанії або відповідні підрозділи у структурі судноплавних компаній [2, 3, 11]. Проблема ефективного використання моряків є основним завданням крьюінгових компаній. На сьогодні на ринку праці України функціонує близько 360 зареєстрованих крьюінгових компаній, які працевлаштовують більшу частину українських моряків.

Одним із способів реалізації таких освітніх технологій є ділова гра. Ділові ігри належить до активних методів навчання та становлять основу компетентного підходу, дозволяючи застосовувати отримані знання практично. Вони орієнтовані на проблемну діяльність, використання наявного досвіду того, хто вчиться, доступність одержуваної інформації, моделювання необхідного для поведінки. Це спосіб навчання, в якому імітується процес прийняття рішення. Саме до пізнавальної діяльності в ділових іграх застосована класична теорія навчання Девіда Колба завдяки досвіду, яка заснована на розробках Джона Дьюї, Курта Левіна і Жана Піаже та включає чотирьохетапний цикл: «Навчання через досвід – сукупність освітніх технологій, які передбачають участь в якій-небудь діяльності і придбання відповідного досвіду,

а також оцінку цієї діяльності та набутого досвіду, ідентифікацію та засвоєння нових знань і умінь.

Для морської галузі перша ділова гра розроблена та впроваджена в навчальний процес факультету підвищення кваліфікації в Одеському інституті інженерів морського флоту в 1979 році [7; 12].

Одна з перших закордонних управлінських ігор була створена США фірмою «Американська асоціація управління». У 1957 р. Американською асоціацією менеджменту була розроблена перша комп'ютерна ділова імітаційна гра з управління організацією [4, с. 298]. Гра проводилася з використанням обчислювальної техніки.

Дії апробованої системи імітуються за допомогою відповідної моделі даних, яка реалізована завдяки технології Customer Relationship Management (CRM) [1, 7]. Це модуль управління персоналом, який дозволяє досліджувати ефективність різних варіантів прийнятих рішень, не несучи при цьому значних матеріальних та моральних витрат. Застосування такого ігрового імітаційного моделювання до господарської діяльності зазвичай має назву ділових ігор [7–10]. Застосовуючи метод ділових ігор у програмах корпоративного навчання керівників разом з іншими методами, досягається «вищий рівень професійної компетентності, що дозволяє в оптимальні терміни та з оптимальною якістю реалізувати як корпоративні цілі організації, так і свої індивідуально-особистісні цілі, які пов'язані з індивідуальним та кар'єрним зростанням» [13, с. 188], що є основною метою корпоративного навчання.

У такий спосіб застосування методів імітаційно-ігрового моделювання (ділової гри) дозволяє учасникам гри так само переконатися в достатній ефективності та згуртованості членів екіпажу, які необхідні в ході підготовки та виконання рейсу морських суден.

**Постановка завдання** – розробка методичних положень щодо проектування та впровадження ділової (імітаційної моделі) гри для оцінки згуртованості, компетентності та кваліфікації членів екіпажу морських торгових суден.

В основі проектування наявні такі принципи розробки та проведення управлінської імітаційної гри:

1. Принципи розробки гри:

- наочність імітаційної ігрової моделі; автономність тем та фрагментів гри;
- «відкритість» ігрової моделі для її подальшого розширення та розвитку;

- максимально можливе насичення ігрової системи управління технічними засобами збору, передачі та обробки інформації;

- максимальне використання готових програм для ЕОМ та інформаційних масивів;
- можливість збору та систематизації спостережень стосовно проблеми, що вивчається в грі.

2. Принципи проведення ігрового експерименту:

- поступовості входження учасників гри до експериментальної ситуації; рівномірності навантаження;

- правдоподібності експериментальної ситуації;

- повного занурення учасників гри в проблему системи, що моделюється [14, 15].

У грі імітується діяльність працівників штурманського складу екіпажів суден щодо формування рейсового завдання з використанням інформаційних систем.

На всіх етапах гри виконуються різні операції, які умовно поділені на дві групи:

- операції, що реалізують функції людини щодо вироблення рішень в управлінні;

- операції, що піддаються формалізації та можуть виконуватись при використанні технології CRM в автономному режимі або в діалоговому режимі.

Розвиток ситуації пов'язаної з підготовкою рішень забезпечується введенням в гру об'єктивних та випадкових факторів – зміна ресурсів, перешкоди та інциденти тощо. Чинники відбивають закономірну і випадкову поведінку об'єктів управління та зовнішнього середовища.

Керівництво діловою грою здійснює спеціаліст, який добре знає проблему, в якій розігруються ситуації, що пов'язані з управлінням процесами підготовки та виконання рейсу морського транспортного судна.

Гра проводиться в умовному масштабі часу. Порядок і зміст дій у грі її учасників визначається технологічною схемою ігрового процесу та інструкціями гравцям.

Залежно від цілей проведення гри вона може закінчуватися на тій чи іншій стадії розвитку навички прийняття рішень (табл. 1).

1. Проблематизація та тематизація.

2. Визначення типу за призначенням (для навчання, з метою дослідження, для прийняття рішень, проектування, з кадрових питань).

3. Виділення цілей конструювання.

4. Аналіз основних закономірностей – зв'язків, відносин в діяльності, що моделюється,

виходячи з проблеми, що в основі гри. У цьому пункті визначається необхідний ступінь деталізації уявлення об'єкта. Всі зв'язки в ньому повинні бути доступні для огляду і водночас не дуже спрощені.

5. Виділяються ігрові одиниці та функції. На основі цієї роботи створюється сценарний план і продумуються ігрові події.

6. Створюється список рішень, які можуть приймати гравці. На цьому етапі визначено основні точки, на яких базується проста гра. Пункти 7 та 8 належать лише до складної гри.

7. Визначення параметрів зв'язків між факторами, які необхідно відобразити. Вони повинні бути такими, щоб викликати наслідки, які характерні для діяльності, що моделюється. Необхідно визначити взаємодію параметрів у кожній ланці діяльності. Не всі параметри можуть визначатись кількісно. У такому разі при конструюванні застосовуються експертні оцінки.

8. Формування числового масиву. На цьому етапі визначається розмірність основних параметрів, закономірності та взаємодії, будуються таблиці, графіки, програми для ЕОМ.

9. Деталізація сценічного плану, формування впливу довкілля.

10. Формулювання правил, розподіл рішень щодо гравців. Установлення причинно-наслідкових відношень між операціями. Побудова блок-схеми гри, внутрішнього графіка поведінки, уточнення основних кроків, етапів, циклів. Кроком є завершена фаза прийняття рішення, етап поділяє сценарні фази, цикл призводить до очевидних підсумків, є найбільш завершеною фазою гри. Особлива увага звернена на точки розгалуження гри.

11. Формулювання системи штрафів та заохочень, визначення критеріїв виграшу. Результати гри можуть бути очевидні, виражені кількісно та оцінюватися експертами.

12. Налагодження гри, її відтворення розробниками, уточнення зв'язків, властивостей, перевірка гнучкості блок-схем, життєздатності математичного апарату, аналіз реальності ситуацій – дієвість стимулів, правильності розрахунків тимчасових витрат, остаточна корекція гри.

Методологія дослідження.

Для представлення гри необхідно підготувати методичну інструкцію щодо проведення гри, рольові інструкції гравцям та необхідний довідковий матеріал. Методична інструкція з проведення гри включає опис призначення та цілей гри, структури ігрового колективу та функцій учасників, системи стимулювання, вихідних даних, про-

цесу гри (етапи, епізоди), напрямів можливого вдосконалення та ускладнення гри.

У рольовій інструкції важливо передбачити засоби, що дозволять оптимізувати процес ідентифікації гравця з роллю.

Під час підготовки документів необхідно враховувати психологічні закономірності роботи з текстом. В іграх знаходяться різні можливі наочні уявлення інформації. Ігрова мотивація та активність гравців, а отже ефективність гри, багато в чому визначається формою подачі інформації. Довідковий матеріал має бути представлений у такий спосіб, щоб викликати в учасників потребу в пошуку інформації про основи закладеної в грі проблеми. Така увага приділяється підготовці матеріалів, які забезпечують рефлексивний аналіз гри (наприклад, списку контрольних питань).

У діловій грі при її конструюванні та застосуванні реалізуються такі психолого-педагогічні принципи: принцип імітаційного моделювання конкретних умов та динаміки виробництва; принцип ігрового моделювання змісту та форм професійної діяльності; принцип спільної діяльності; принцип діалогічного спілкування; принцип двоплановості; принцип проблемності змісту імітаційної моделі та процесу його розгортання в ігровій діяльності. Основою розробки ділової гри є створення імітаційної та ігрової моделей, які повинні органічно накладатися одна на одну, що визначає структуру ділової гри [5.12].

Метод аналізу. У діловій грі при її конструюванні та застосуванні реалізуються наступні психолого-педагогічні принципи:

- принцип імітаційного моделювання конкретних умов та динаміки виробництва;
- принцип ігрового моделювання змісту та форм професійної діяльності; принцип спільної діяльності;
- принцип діалогічного спілкування;
- принцип двоплановості.

Визначення профілю компетенцій фахівця відбувається на основі моделі середовища, яка описана реляційною алгеброю як інструмент інформаційної системи у вигляді таблиць відповідності (База даних). Як еталон відбору в нашому випадку використовується система Customer Relationship Management (CRM). Модуль управління персоналом.

1. *Економічні знання.* Знання наявних економічних моделей управління, вміння застосовувати їх на практиці.

2. *Професійна ерудиція.* Глибокі та ґрунтовні професійні знання.

3. *Вміння працювати з літературою, довідниками.* Вміння швидко знаходити необхідну інформацію в різних літературних джерелах.

4. *Вміння зробити висновки за завданням.* Вміння чітко та ясно формулювати завдання, узагальнити результати його виконання, сформулювавши їх у вигляді чітких та ясних положень.

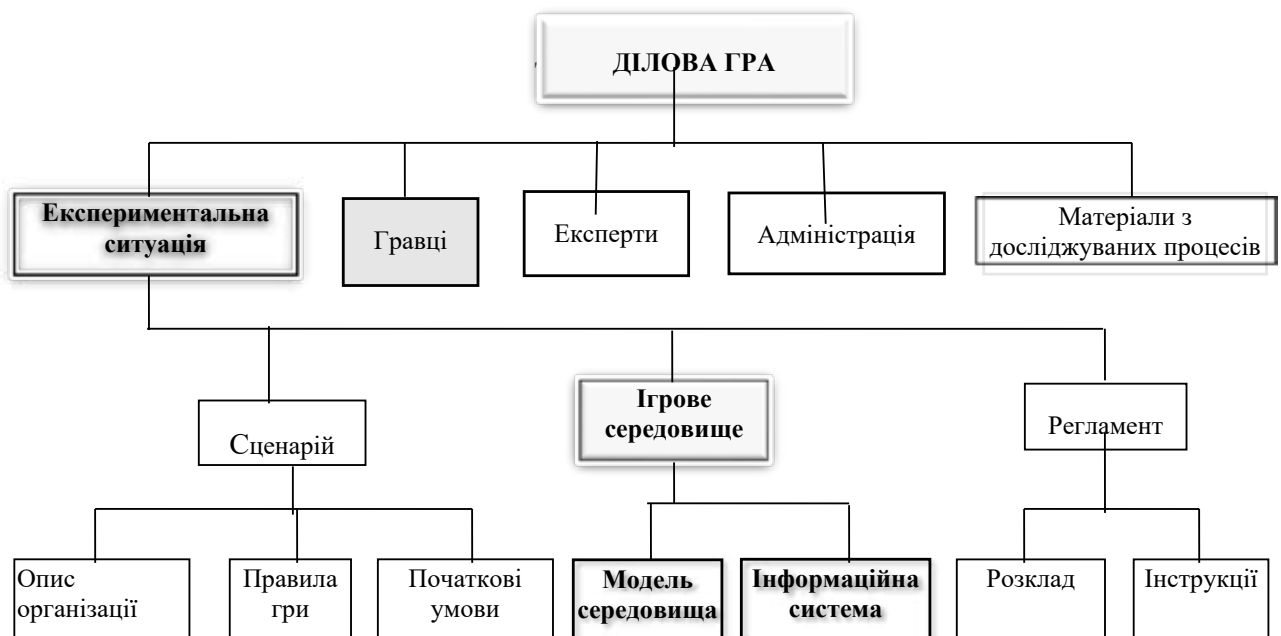


Рис. 1. Функціональна структура моделі ділової гри



5. *Вміння вирішувати професійне завдання.* Вміння застосувати професійні знання для вирішення професійної проблеми.

6. *Вміння керувати людьми.* Вміння раціонально керувати роботою та життям колективу.

7. *Вміння планувати роботу.* Вміння порівнювати час та засоби, які необхідні для роботи.

8. *Вміння розподіляти роботу.* Вміння давати завдання з урахуванням особистих можливостей працівників, їхнього навантаження.

9. *Вміння контролювати роботу.* Вміння перевіряти своєчасність та точність виконання виробничих завдань.

10. *Вміння створювати трудову атмосферу.* Вміння підтримувати у виробничому колективі робочий настрій.

11. *Вміння створювати сприятливі стосунки в колективі.* Вміння створювати взаємовідносини, що позитивно впливають на успіх професійної діяльності.

12. *Вміння захопити людей.* Вміння зацікавити дорученою роботою.

13. *Вміння постояти за колектив.* Вміння обстоювати інтереси колективу.

14. *Обов'язковість.* Вірність слову, надійність у виконанні даної обіцянки.

15. *Вибагливість до інших.* Уміння вимагати від інших якісного та своєчасного виконання завдання, встановленого розпорядку.

16. *Вибагливість до себе.* Висування високих вимог до себе.

17. *Критичність розуму.* Прагнення все аналізувати, оцінювати, нічого не приймаючи на віру.

18. *Оригінальність мислення.* Самобутність, своєрідність, не шаблонність мислення, схильність до нестандартних рішень.

19. *Гнучкість розуму.* Пластичність, здатність змінювати плани, способи вирішення завдань відповідно до мінливих об'єктивних обставин.

20. *Кмітливість.* Здатність швидко і добре розуміти та вирішувати завдання.

21. *Цілеспрямованість.* Здатність цілеспрямовано вирішувати поставлені завдання.

22. *Винахідливість.* Здатність швидко знаходити вихід зі скрутного становища.

23. *Вихованість, тактовність.* Уміння поводитися, дотримуючись правил поведінки в суспільстві та виявляючи необхідний такт у стосунках з людьми.

24. *Стриманість.* Вміння володіти проявом своїх почуттів, урівноваженість.

25. *Уміння ладнати з людьми.* Вміння правильно будувати стосунки з оточуючими.

26. *Здатність розуміти інших.* Вміння вислухати, розібратися в ситуації, зрозуміти та прийняти аргументи іншої людини.

27. *Терпимість до інших.* Уміння миритися з чужою думкою, способом думок, характером.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Дана модель проведення гри дозволяє відпрацювати технологію розрахунку завантаження суден, використання нормативів, методики визначення часу рейсу та валютно-фінансових показників. Він використовується в разі відсутності відповідної технічної бази чи недостатнього рівня її розвитку.

Ділова гра, що проводиться з використанням модуля CRM, позбавлена перелічених недоліків «ручного» варіанта та дає можливість виключити трудомісткі процеси розрахунку різних параметрів, а також зосередити основну увагу на управлінських аспектах формування та виконання рейсу.

У табл. 1 представлені стадії розвитку навичок та особливості виконання навчальних процесів.

Це насамперед:

- якісне завантаження суден;
- аналіз можливостей використання суден з урахуванням експлуатаційних, економічних та комерційно-правових факторів.

Формування плану (завантаження) розміщення вантажів у вантажних приміщеннях універсальних суховантажних суден є одним із центральних завдань оперативного управління процесами завантаження та перевезення вантажів. Воно відповідає нижнім ланкам ієрархії управління як у судні, так і в портах (попередній і виконавчий вантажний план). Реалізація цього завдання здійснюється. При цьому для складання вантажних планів відводиться, як правило, дуже обмежений час, тобто час, що вимірюється від моменту приходу судна в порт до початку вантажних робіт. В окремих випадках перескладання вантажних планів доводиться виконувати в процесі завантаження судна. Це визначається зміною обставин, які пов'язані з порушенням термінів прибуття вантажів та відвантажувальних документів у порти, необхідністю прискорення обробки та виходу судна в рейс та ін.

Зазначені обставини визначають необхідність використання економіко-математичних методів і сучасної обчислювальної техніки (ПК), які дозволяють не тільки знизити трудовитрати, а й отримати оптимальне рішення про завантаження судна в терміни, що забезпечують практично безперервний технологічний процес його обробки з належною ефективністю.

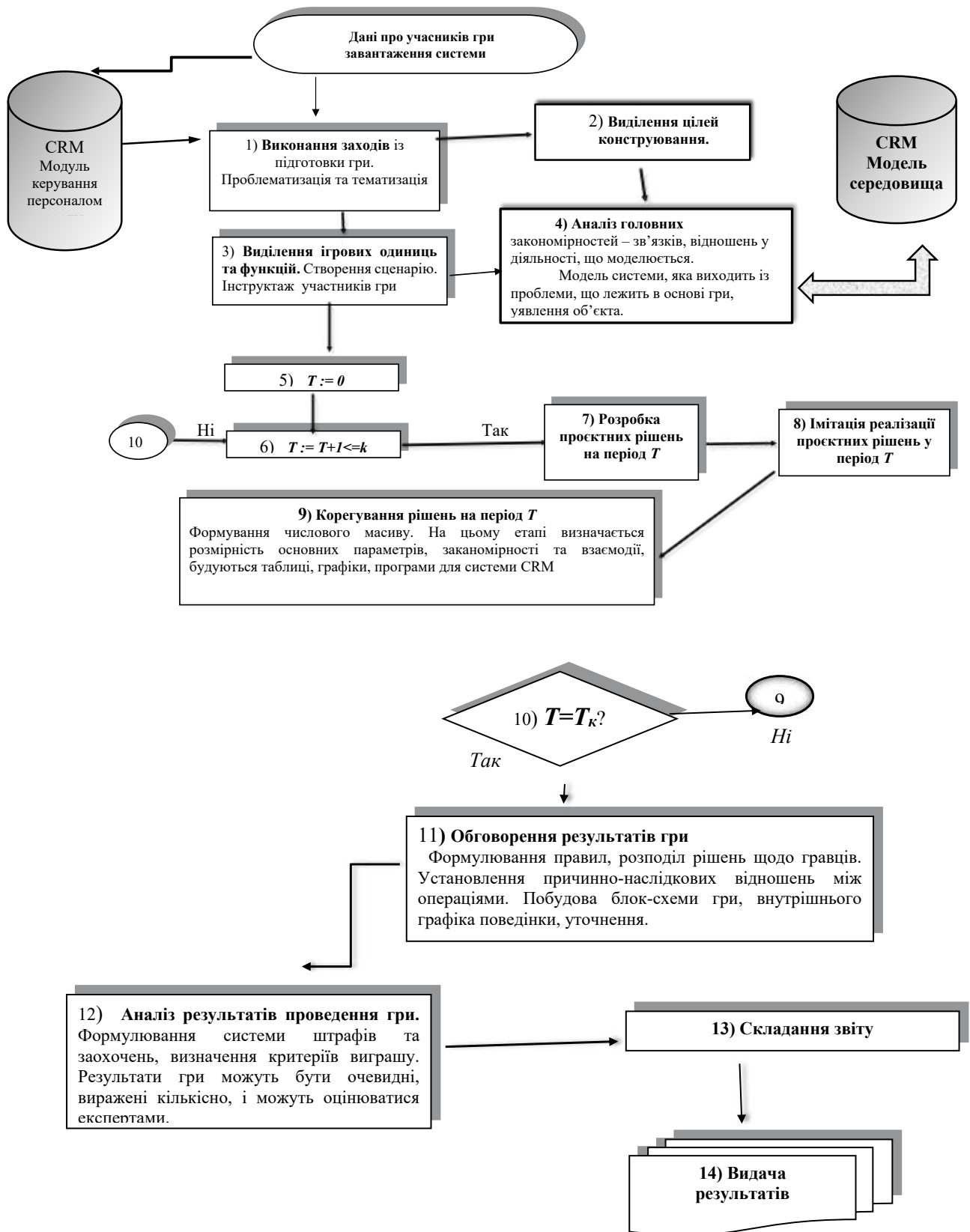


Рис. 2. Схема ігрового процесу:  $T_k$  – номер останнього періоду керування

Стадії розвитку навичок та особливості виконання навчальних процесів.

Найменування стадії	Характер навички	Ціль навички	Особливості виконання дій
Ознайомча	Осмислення дій та їх представлення	Ознайомлення з прийомами виконання дій	Виразне розуміння мети. Невиразне уявлення про способи її досягнення. Грубі помилки у рішеннях
Підготовча (аналітична)	Свідоме, невміле виконання	Опанування окремими елементами дії. Аналіз способів їх виконання	Виразне розуміння способів виконання дій, але не точно (нестійке) їх виконання. Дуже напружена увага. Поганий контроль
Стандартизуюча (синтетична)	Автоматичне виконання окремих елементів дій	Поєднання та об'єднання елементарних дій в єдине ціле	Підвищення якості рішень. Усунення зайвих операцій. Перенесення уваги на кінцевий результат. Поліпшення контролю над діями
Варіювальна	Гнучка пристосованість до ситуації	Опанування довільним регулюванням характеру дій	Гнучке цілеспрямоване виконання дій. Синтез окремих операцій. Інтуїція

Як відомо, завдання формування завантаження по суті зводиться до оптимального розподілу партій вантажу по вантажним приміщенням судна (палуба, твіндек, трюм) з урахуванням його техніко-експлуатаційних характеристик, транспортних особливостей окремих партій вантажу, вимог забезпечення необхідних мореплавних якостей та формулюється в такий спосіб.

На виробничий перевантажувальний комплекс (ВПК), що спеціалізується на завантаженні генеральних вантажів, надходять доручення на експортні вантажі  $Q_r$  ( $r=1,2,\dots,R$ ), що підлягають відправленню на судно вантажопідйомністю  $D_q$ , вантажомісткістю  $W_k$  і корисною площею  $S$ .

Попередньо всі вантажі поділені на три основні категорії:

- 1,2 – за транспортними характеристиками;
- 3 – за комерційними умовами.

1). Вантажі, розміщення яких допустиме на палубі судна  $Q_r^H$  ( $r=1,2,\dots,R'$ );

2). Вантажі, завантаження яких можливе лише у внутрішні вантажні приміщення –  $Q_r^B$  ( $r=R'+1, R'+2,\dots,R''$ );

3). Факультативні вантажі, завантаження яких можливе після розміщення основних вантажів –  $Q_r^O$  ( $r=R''+1, R''+2,\dots,R$ ).

Відомі також: маса одного вантажного місця кожної партії вантажу –  $q_r$ , питоми вантажні обсяги  $u_{yr}$  вантажу  $r$  за вантажними приміщеннями  $y$  ( $y=1,2,\dots,Y$ ;  $r=R'+1, R'+2,\dots,R$ ), площа палуби  $S_{yr}$  ( $y=1,2,\dots,Y$ ;  $r=1,2,\dots,R'$ ), яку займе одне вантажне місце в разі того, якщо вантаж належить до пер-

шої категорії. Тоді математична модель завдання набуде наступного вигляду:

$$\sum_{y=1}^{Y'} \sum_{r=1}^{R'} R_{yr} q_r X_{yr} + \sum_{y=Y'+1}^Y \sum_{r=R'+1}^R R_{yr} q_r X_{yr} Z_{yr} \rightarrow \min; \quad (1)$$

$$S_{yr} q_r X_{yr} \leq S_y, \quad (2)$$

$$(y=1,2,\dots,Y');$$

$$\sum_{r=R'+1}^R u_{yr} q_r X_{yr} Z_{yr} \leq W_y^{TB}, \quad (3)$$

$$(y=Y'+1, Y'+2,\dots,Y'');$$

$$\sum_{r=R'+1}^R u_{yr} q_r X_{yr} Z_{yr} \leq W_y^{TP}, \quad (4)$$

$$(y=Y''+1, Y''+2,\dots,Y);$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y \sum_{r=R'+1}^R u_{yr} q_r X_{yr} Z_{yr} = W_k; \quad (5)$$

$$\sum_{y=1}^{Y'} \sum_{r=1}^R q_r X_{yr} Z_{yr} \leq \frac{1}{3} D_q; \quad (6)$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y \sum_{r=R'+1}^R q_r X_{yr} Z_{yr} \leq \frac{2}{3} D_q; \quad (7)$$

$$\sum_{y=1}^{Y'} q_r X_{yr} Z_{yr} = Q_r^H, \quad (8)$$

$$(r=1,2,\dots,R');$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y q_r X_{yr} Z_{yr} = Q_r^B, \quad (9)$$

$$(r=R'+1, R'+2,\dots,R'');$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y q_r X_{yr} Z_{yr} \leq Q_r^O, \quad (10)$$

$$\begin{aligned} (r = R''+1, R''+2, \dots, R); \\ X_{yr} = 0, 1, 2, \dots, P, \\ (y=1, 2, \dots, Y; r=1, 2, \dots, R), \end{aligned} \quad (11)$$

де  $X_{yr}$  – кількість вантажних місць вантажної партії  $r$ , яку необхідно розмістити у вантажному приміщенні  $y$ ;

$R_{yr}$  – витрати порту по завантаженню вантажу  $r$  у вантажне приміщення  $y$ ;

$S_y$  – площа палуби над вантажним відсіком  $y$ ;

$W_y^{TB}$  – вантажомісткість твіндеків  $y$ ;

$W_y^{TP}$  – вантажомісткість трюмів  $y$ ;

$R$  – загальна кількість вантажних партій;

$R'$  – кількість вантажних партій, які призначені для завантаження на палубу (перша категорія);

$R''$  – кількість вантажних партій другої категорії;

$Y$  – загальна кількість майданчиків та вантажних приміщень;

$Y'$  – кількість майданчиків для розміщення вантажів на палубі;

$Y''$  – кількість твіндеків;

$I$  – якщо вантаж  $r$  може бути розміщений у вантажному

$Z_{yr}$  = приміщенні  $y$ ;

$\theta$  – в іншому випадку.

Вираз (1) – цільова функція моделі, що визначає загальні витрати на завантаження вантажів. Їх необхідно мінімізувати.

Нерівності (2) є обмеженнями за площею палуби над відповідними вантажними відсіками.

Нерівності (3), (4) та рівняння (5) характеризують обмеження за обсягами твіндеків, трюмів та в цілому по судну. Обмеження (5) введено у зв'язку з тим, що вантажі за умовами, що розглядаються, генеральні і «легкі», тобто середньозважений питомий вантажний обсяг перевищує питому вантажовмісність судна. Якщо ж вантажі «важкі» (протилежний випадок), замість рівняння (5) встановлюється відповідне обмеження щодо вантажопідйомності.

Аналіз вантажних планів (попередніх та виконавчих) дозволив встановити співвідношення за кількістю вантажів, що перевозяться на палубі, у твіндеках і трюмах, що забезпечує належні мореплавні якості – стійкість судна (нерівності (6) і (7)).

Якщо необхідно додатково забезпечити заданий диферент і загальну міцність корпусу судна, то в математичну модель вводять відповідні обмеження. Однак це значно підвищує трудомісткість підготовки вихідних даних, розмірність завдання і, як наслідок, не забезпечує необхідну оперативність у прийнятті рішень.

Рівняння (8) та (9) визначають обов'язковість завантаження вантажів першої та другої категорій.

Нерівності (10) є обмеженням за масою факультативних вантажів.

Параметр управління моделі (12) є цілісною змінною, що не допускає дроблення вантажних місць у результаті розв'язання завдання.

Якщо будь-який вантаж не можна з якихось причин розмістити в тому чи іншому вантажному приміщенні (наприклад, із міркувань сумісності, неможливості перевезення на палубі та інших), то це регламентується до початку проведення розрахунків на основі моделі за допомогою параметра  $Z_{yr}$ . В окремих випадках вимога цілісності може бути знята. Наприклад, коли потрібна швидка попередня оцінка вартості вантажних робіт (доходів за рейс).

Наведена постановка та математична модель завдання орієнтовані значною мірою на партії вантажів, які за своїми розмірами є близькими до розмірів вантажних приміщень судна. Якщо ж вантаж дрібнопартійний та великої номенклатури, то партія вантажу має бути завантажена повністю в одне вантажне приміщення. Із цією метою як параметр управління вводиться булева змінна, що приймає значення  $I$ , якщо  $r$ -я партія повинна бути завантажена у вантажне приміщення судна  $y$  і  $\theta$ , коли вантаж до завантаження не приймається. При цьому обмеження (8), (9) та (10) виключаються. Замість них встановлюються умови:

$$\sum_{y=1}^{Y'} X_{yr} = I, (r = 1, 2, \dots, R'); \quad (12)$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y X_{yr} = I, (r = R'+1, R'+2, \dots, R''); \quad (13)$$

$$\sum_{y=Y'+1}^Y X_{yr} \leq I, (r = R''+1, R''+2, \dots, R); \quad (14)$$

Під  $q_r$  у такому разі розуміється маса партії вантажу  $r$ .

Подана модель завдання є лінійною. Вона може бути вирішена стандартними методами математичного програмування, які реалізовані в пакетах прикладних програм (ППП) персональних електронно-обчислювальних машин.

У такий спосіб застосування представленої вище математичної моделі та ЕОМ дозволяє учасникам гри зосередити свою увагу на наступних ключових виробничих питаннях:

- оцінка остійності судна,
- забезпечення заданого диференту,
- загальна міцність корпусу судна,

• зручність виконання вантажних робіт відповідно до черговості заходу судна до портів за маршрутом його руху.

Насамкінець керівником за допомогою підпорядкованого йому апарату управління проводиться аналіз результатів проведення ділової гри. Унаслідок аналізу оцінюються:

- ступінь досягнення цілей проведення гри;
- ступінь відповідності ходу ігрового процесу заданої технології проведення гри з метою забезпечення корегування спрямованості дій учасників гри;
- результати прийнятих управлінських рішень із метою підготовки критичних зауважень, оцінки якості та загальної характеристики проведеної роботи щодо завершення кожного етапу та гри в цілому;
- трудомісткість підготовки окремих рішень;
- рівномірність завантаження гравців, обслуговуючого персоналу та обчислювальної техніки;
- якість прийнятих у підгрупах рішень.

Загальним результатом аналізу є встановлення резервів методу оцінки рівня кваліфікації членів екіпажу та психологічної готовності до спільної роботи.

**Висновки.** У такий спосіб ділова гра дозволяє радикально скоротити час накопичення професійного досвіду, дає можливість експериментувати з подією, пробувати різні стратегії вирішення

поставлених проблем, формувати в майбутніх фахівців цілісне уявлення про професійну діяльність в її динаміці, набути соціального досвіду. У діловій грі знання засвоюються не про запас, не для майбутнього застосування, не абстрактно, а в реальному для учасника процесі інформаційного забезпечення його ігрових дій, у динаміці розвитку сюжету ділової гри, у формуванні цілісного образу професійної ситуації [13,15].

Результати представлених вище досліджень, а також відомості про розробку та застосування різних класів ділових ігор у провідних наукових та навчальних центрах країни дають змогу зробити такі висновки. Ділову управлінську гру можна застосовувати як:

- засіб налагодження проектних рішень, тобто за умов ігрового імітаційного експерименту виявляються проблеми та недоліки окремих елементів системи;
- метод прогнозування деяких виробничо-господарських ситуацій;
- спосіб відпрацювання для підприємства нововведень, тобто реорганізація виробничої, організаційної чи функціональної структури управління на судні;
- метод навчання майбутніх спеціалістів під час переходу членів екіпажу з одного типу судна на інший. Наприклад, із балкера на універсальне суховантажне судно.

#### Список літератури:

1. O'Brien., James A., Management Information Systems: A Managerial End User Perspective Subsequent Edition. 1994. SBN-10: 0256103461.
2. O'Brien., James, A., Marakas, George M. Introduction to information systems / James A., O'Brien, George M., Marakas A.– Fifteenth ed. p. cm. Includes New York : McGraw-Hill/Irwin, 2011. ISBN-13: 978-0-07-337677-6
3. Marakas, A., George M. II. Business Data processing Management. Management information systems. Electronic commerce. I. Title. /HF5548.2.O232010658.4'dc22. <https://www.worldcat.org/title/management-information-systems/oclc/496956144> (дата звернення 08.01.2022)
4. Savage, C.M. Fifts generations management: integrating enterprises through human networking. – Digital Press, 1990.
5. Бирштейн М.М. Классификационный обзор современных американских деловых игр // Опыт применения активных методов обучения управлению. Тез. докл. науч. – техн. школы – Л.: ИПК Судостроительной промышленности, 1978.
6. Сенашенко В.С., Марушина М.К. Деловая игра в корпоративном обучении как эффективный метод развития компетенций руководителей : // Современное образование. 2018. – № 3. – С. 94 – 108. DOI: 10.25136/2409-8736.2018.3.27318
7. Устинова Г.М. Информационные системы менеджмента. Санкт-Петербург: DiaSoftUP, 2000. 279с
8. Меттьюз, Д. Джой. Развитие человеческих ресурсов // Д. Джой – Меттьюз., Меггинсон, М. Сюрте / Пер. с англ. – М.: Эксмо, 2006. – 432 с.
9. Хилб, М. Развитие человеческих ресурсов // Управление человеческими ресурсами / Под ред. М. Пула, М. Уорнера. – СПб.: Питер, 2002.
10. Хруцкий Е.А. Организация проведения деловых игр. – М.: Высш.шк., 1991. 320 с.
11. Соколова М.И., А.Г. Дементьева. Управление человеческими ресурсами : Учебник. М.:, 2006. – 240 с.
12. Учеб. пособие для вузов Под ред. проф. Г.А. Титоренко. 2-е изд., доп. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. – 439 с.

13. Компьютерные технологии обработки информации /Под ред. С.В. Назарова. – М.: Финансы и статистика, 1995.

14. Using Virtual Environments for Leadership Development and Training [Электронный ресурс]. TrainingIndustry, Inc. 2013. 29 p. Режим доступа : <https://trainingindustry.com/research/e-learning/using-virtual-environments-for-leadership-development/> (дата звернення 30.09.2021).

15. Информационные технологии управления : Учеб.пособие для вузов/ под ред. Г.А. Титоренко. – 2-е ИЗД, доп. \_ М.: ЮНИТИ – ДАНА, 2004.

#### **Shibaev A.G., Silvanskaya G.N. METHOD OF BUSINESS GAMES IN ASSESSMENT THE PERSONNEL OF CREWING COMPANIES**

*This article presents the methodological provisions for the development and use of the method of business games when using the Enterprise Information Systems (EIS). Shows the composition and interconnection of the elements of the gaming process. Enterprise information systems influence the theory and practice of management [4, 5]. In connection with the influence of the measure technologies on the management of companies, the leading American analysts (Charles Savage, James O'Brien), have noted the global tendency of increasing the general informatization, role of knowledge, trust and awareness of managers at all levels of the corporation when horizontal management structures are strengthened (instead of traditional vertical structures). The vertical linear-functional structure is replaced by the lanky management structure, where each link has an access to the information server of the work group, the organization's server, the corporation's server. This means the risks of management of the new, fifth generation – the 21st century generation[1,2].*

*The impact of new information technologies through corporations on management theory and practice involves another important trend – reengineering of business-transport processes, which is a complex and routine review of business processes in the organization of transport systems, It can dramatically, by 5-10 times or more, increase the efficiency of work due to studying the experience of their best employees (experts), fixing their knowledge in the knowledge base of the corporation and radically redesigning the company transport processes on this basis [1, 3, 4].*

*Enterprise information systems and reengineering of transport processes are two related and mutually reinforcing one new trend in the sphere of application of developed specialized decision-making support systems (DSS). Use of developed specialized DSSS provides managers with creative freedom of modelling decision alternatives. In this area, the first QLS provides management with detailed and accurate information on the whole complex of processes and business functions [5, 6].*

*A mathematical model of the task of forming the vessel's loading was set and mathematical model of the task was given. The place and significance of the ship's loading task was indicated*

**Key words:** *information systems, vessel personnel, crewing company, business game, complexity, competence, crew members.*

## БУДІВНИЦТВО

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/35>

**Семичаєвський 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*

**Стилик І.Г.**

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту*

**Бенедюк В.С.**

*Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту*

### **УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗАХИСНОГО ВЗУТТЯ ДЛЯ ПОЖЕЖНИКІВ ЗА ПОКАЗНИКАМИ ЯКОСТІ ДЛЯ РЕАЛІЗАЦІЇ ВИМОГ ТЕХНІЧНОГО РЕГЛАМЕНТУ БУДІВЕЛЬНИХ ВИРОБІВ, БУДІВЕЛЬ І СПОРУД**

У статті наведено актуальність проведення дослідження, направлено на впровадження в Україні сучасних вимог до показників якості спеціального захисного взуття пожежника, методів і процедур їх оцінювання. Акцентовано увагу на необхідності реалізації вимог Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд з метою забезпечення безпечності рятувальних команд під час гасіння пожеж.

Зазначено, що проведені раніше дослідження не містять даних стосовно удосконалення національної нормативної бази щодо показників якості захисного взуття для пожежників та методів їх оцінювання.

Вказано, що для сприяння у вирішенні зазначеної проблеми в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту за замовленням Державної служби України з надзвичайних ситуацій проводилася науково-дослідна робота за темою: «Удосконалення методів випробувань речовин і матеріалів, електротехнічних виробів за показниками пожежної безпеки та засобів протипожежного захисту за показниками якості (код теми: «Удосконалення методів випробувань»)), метою якої було удосконалення національної нормативної бази, зокрема щодо методів випробувань захисного спорядження пожежника, в тому числі захисного взуття за показниками якості.

Наведено загальну інформацію стосовно класифікації захисного взуття для пожежників. Представлено загальний вигляд шкіряного та гумового захисного взуття для пожежників.

Приведено результати аналізу методів випробувань захисного взуття із застосуванням необхідного випробувального обладнання.

Виявлено шляхи удосконалення існуючої випробувальної бази призначеної для випробування захисного взуття. Встановлено перелік основного випробувального обладнання та його параметри, яке необхідне для реалізації таких методів випробувань захисного взуття пожежника, як «Визначення ізоляції від підвищених температур (захист від теплового впливу)», «Стійкість до удару», «Стійкість до стискання», «Електричні властивості (визначення електричного опору)», «Стійкість до ковзання взуття». Вказаний перелік випробувального обладнання наведено у табличній формі.

За результатами проведених досліджень у публікації зроблено відповідні висновки.

**Ключові слова:** випробувальна база, захисне взуття для пожежників, методи випробувань, показники якості, удосконалення.



## 1. Вступ

Під час виконання завдань за призначенням підрозділами ДСНС України використовується низка різного (як за технічними характеристиками так і за типом) спеціального захисного спорядження, яке не завжди може захистити пожежника від дії тих або інших небезпечних факторів, які виникають на пожежі [1]. Зокрема, під час гасіння пожеж у приміщеннях складного архітектурного планування, важкодоступних частинах будинків, таких як горищні приміщення, що мають дерев'яні конструкції, особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів піддається впливові високих температур, потужних теплових потоків тощо. До вказаного вище спорядження відноситься: каска пожежна, підкасник для пожежників, одяг пожежника захисний, рукавички захисні для пожежників, взуття пожежника захисне та одяг пожежника захисний – тепловідбивний.

Одним з видів захисного спорядження пожежника є захисне взуття, яке представляє собою спеціальне взуття, призначене для захисту ніг людини від впливу небезпечних факторів пожежі та вогнегасних речовин під час ліквідації надзвичайних ситуацій та їх наслідків.

Чинний на сьогоднішній день в Україні національний стандарт [2] встановлює лише мінімальні технічні вимоги до захисного взуття. Як показує практичний досвід, рівень вищевказаних вимог недостатній для виявлення недоброякісної продукції, що потрапляє на оснащення у пожежно-рятувальні підрозділи [1]. Крім того, потребують удосконалення методи випробувань захисного взуття за відповідними показниками якості.

Враховуючи викладене вище, для недопущення застосування такого неякісного захисного взуття з метою сприяння збереженню життя та здоров'я особового складу пожежно-рятувальних підрозділів під час виконання завдань за призначенням, необхідно розробити обґрунтовані вимоги до захисного взуття та удосконалити відповідні методи випробувань.

Вищезазначене обумовлює актуальність проведення дослідження, направленою на впровадження в Україні сучасних вимог до показників якості спеціального захисного взуття пожежника, методів і процедур їх оцінювання. Це необхідно для реалізації вимог Технічного регламенту будівельних виробів, будівель і споруд з метою забезпечення безпечності рятувальних команд під час гасіння пожеж [1].

## 2. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

У звіті [3] приведено результати пошукової науково-дослідної роботи з визначення шляхів удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання.

В той же час ця робота не містить досліджень щодо удосконалення національної нормативної бази щодо показників якості захисного взуття для пожежників та методів їх оцінювання.

## 3. Мета та завдання дослідження

Для сприяння у вирішенні зазначеної проблеми в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту за замовленням ДСНС України проводилася науково-дослідна робота за темою: «Удосконалення методів випробувань речовин і матеріалів, електротехнічних виробів за показниками пожежної безпеки та засобів протипожежного захисту за показниками якості (код теми: «Удосконалення методів випробувань»)), метою якої було удосконалення національної нормативної бази, зокрема щодо методів випробувань захисного спорядження пожежника, в тому числі захисного взуття за показниками якості.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Провести аналіз методів випробувань захисного взуття із застосуванням необхідного випробувального обладнання.

2. Виявити шляхи удосконалення існуючої випробувальної бази призначеної для випробування захисного взуття.

## 4. Загальна інформація та аналіз методів випробувань захисного взуття із застосуванням необхідного випробувального обладнання

В Україні прийнято національний стандарт ДСТУ EN 15090 [2], згідно з яким взуття для пожежників класифікують згідно з таблицею 1.

Згідно з рисунком 3 ДСТУ EN ISO 20345 [4], будова взуття має відповідати одній з моделей В – Е, де В – черевик, С – напівчобіт, D – чобіт, Е – чобіт з високою халявкою.

Згідно з ДСТУ EN 15090 [2] розрізняють такі типи взуття для пожежників:

– 1-й тип: Для реагування на надзвичайні ситуації та гасіння пожеж поза межами будинків і споруд, гасіння пожеж у природній місцевості; захист від проникнення рідин, захист пальців ніг, а також захист від хімічних небезпек не забезпечується;

– 2-й тип: Для гасіння всіх видів пожеж і проведення рятувальних робіт, під час яких

потрібні захист від проникнення рідин і захист пальців ніг; захист від хімічних небезпек не забезпечується;

– 3-й тип: Для гасіння всіх видів пожеж і проведення рятувальних робіт, під час яких потрібен захист від проникнення рідин і захист пальців ніг, у тому числі захист від хімічних небезпек.

Чоботи обов'язково повинні мати ударостійкий підносок для захисту пальців ніг та устілку в підошві для захисту ступень від гострих предметів. Як шкіра, так і гума повинні бути стійкими до дії теплових чинників, а саме: відкрите полум'я, контакт з нагрітими предметами тощо.

На рисунку 1 наведено загальний вигляд шкіряного та гумового захисного взуття для пожежників.

У таблиці 2 наведено результати аналізу методів випробувань спеціального захисного взуття для пожежників із застосуванням необхідного випробувального обладнання.

Таким чином, для реалізації таких методів випробувань захисного взуття пожежника, як «Визначення ізоляції від підвищених температур (захист від теплового впливу)», «Стійкість до удару», «Стійкість до стискання», «Електричні властивості (визначення електричного опору)», «Стійкість до ковзання взуття», необхідне

наступне основне випробувальне обладнання з параметрами, наведеними у таблиці 2:

- піщана баня;
- кульки з нержавіючої сталі;
- датчик температури;
- пристрій для вимірювання температури з компенсатором;
- затискний пристрій;
- циліндри із глини;
- прилад із круговою шкалою, з напівсферичною основою;
- випробний прес;
- випробний прилад, що може вимірювати електричний опір;
- жорстка прямокутна опорна плита із засобами надійного кріплення випробного зразка до опорної плити та засоби кріплення опорної пластини з випробним зразком;
- механізм для індукування руху взуття відносно поверхні тощо.

**5. Висновки**

За результатами аналізу нормативних документів щодо методів випробувань захисного взуття для пожежників встановлено наступне:

1. Актуальність методів випробувань підтверджується низкою чинних на сьогоднішній день в Україні нормативних документів;



а) – шкіряний чобіт      б) – гумові чоботи

**Рис. 1. Загальний вигляд захисного взуття для пожежників**

Таблиця 1

**Класифікація взуття**

Класи	Опис
I клас	Взуття, виготовлене зі шкіри або інших матеріалів, за винятком взуття, виготовленого цілком з гуми або полімерів
II клас	Взуття, виготовлене цілком з гуми (тобто цілком вулканізоване) або полімерів (тобто виготовлене цілком методом лиття)

**Аналіз методів випробувань спеціального захисного взуття для пожежників  
із застосуванням необхідного обладнання**

№ п/п	Назва методів випробування та шифр нормативного документу, згідно з яким проводиться випробування	Випробувальне обладнання, яке використовується для реалізації методів випробувань
1	2	3
1	Стійкість до дії полум'я згідно з пунктом 7.3 ДСТУ EN 15090 [2] та ДСТУ EN ISO 15025 [5]	<p>Монтажна рама.</p> <p>Газовий пальник повинен відповідати додатку А ДСТУ EN ISO 15025 [5]. Пальник забезпечує полум'я потрібних розмірів, довжину якого можна регулювати в межах від 10 мм до 60 мм.</p> <p>Пальник складається з трьох частин:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– газова форсунка з діаметром (0,19±0,02) мм;</li> <li>– трубка пальника;</li> <li>– стабілізатор полум'я</li> </ul> <p>Утримувач зразка складається з прямокутної металевої рами довжиною 190 мм та шириною 150 мм, на якій встановлено опорні штифти в кожному куті прямокутника.</p> <p>Шаблон (має бути плоский та твердий, з розміром, що відповідає розміру зразка (200 мм x 160 мм)).</p> <p>Реле часу для контролю та вимірювання часу впливу полум'я, яке встановлюють з точністю до 1 с та похибкою 0,2 с або менше</p>
2	Теплове випромінювання згідно з пунктом 7.2 ДСТУ EN 15090 [2] та методом В згідно з ДСТУ EN ISO 6942 [6]	<p>Джерело випромінювання повинно складатися з 6 нагрівальних стрижнів, виготовлених з карбїду кремнію (SiC), з такими характеристиками:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– загальна довжина (356±2) мм;</li> <li>– довжина нагрівальної частини (178±2) мм;</li> <li>– діаметр (7,9±0,1) мм;</li> <li>– опір електричному струму 3,6 Ом ±10% при температурі 1070°C.</li> </ul> <p>Випробувальна рама.</p> <p>Тримач зразка.</p> <p>Повинен бути виготовлений зі сталевих листів товщиною 2 мм, закріплених на алюмінієвій пластині товщиною 10 мм.</p> <p>На тримачі зразка для метода В згідно з ДСТУ EN ISO 6942 [6] повинен кріпитися колориметр.</p> <p>Колориметр. Виготовляється з листа міді (чистотою не менше ніж 99%) товщиною 1,6 мм та представляє собою прямокутну пластину розмірами 50,0×50,3 мм. Маса пластини повинна бути від 35,9 г до 36,0 г.</p> <p>Засіб вимірювання та реєстрації температури</p>
3	Визначення ізоляції від підвищених температур (захист від теплового впливу) згідно з пунктом 5.12 ДСТУ EN ISO 20344 [7]	<p>Піщана баня. Розмір ванни, в якій зберігають пісок, має бути (40 ± 2) см × (40 ± 2) см заввишки не менше ніж 5 см. Система опалення потужністю не менше ніж (2500 ± 250) Вт.</p> <p>Кульки з нержавіючої сталі діаметром 5 мм та загальною масою (4000 ± 40) г.</p> <p>Датчик температури з точністю ± 0,5 °C, припаяний до мідного диска завтовшки (2 ± 0,1) мм та діаметром (15 ± 1) мм.</p> <p>Пристрій для вимірювання температури з компенсатором, який можна використовувати з датчиком температури</p>

1	2	3
4	Стійкість до удару згідно з пунктом 5.4 ДСТУ EN ISO 20344 [7]	<p>Затискний пристрій, що складається з полірованої сталеві плити завтовшки не менше ніж 19 мм та розмірами 150 мм × 150 мм, із мінімальною твердістю 60 НРС з гвинтовим затискувачем для фіксації передньої частини основної устілки/вкладної устілки взуття до пластини таким способом, який не обмежує бічного розширення підносок під час удару.</p> <p>Циліндри, які формують із глини діаметром (25±2) мм і заввишки (20±2) мм для взуття до розміру 40 включно та заввишки (25±2) мм для взуття більше розміру понад 40.</p> <p>Прилад із круговою шкалою, з напівсферичною основою радіусом (3,0±0,2) мм та напівсферичною опорою радіусом (15±2) мм, із силою не більше ніж 250 мН</p>
5	Стійкість до стискання згідно з пунктом 5.5 ДСТУ EN ISO 20344 [7]	<p>Випробний прес відповідно до 5.1.3.1.1 ДСТУ EN 12568 [8].</p> <p>Циліндри.</p> <p>Прилад із круговою шкалою</p>
6	Електричні властивості (визначення електричного опору) згідно з пунктом 5.10 ДСТУ EN ISO 20344 [7]	<p>Випробний прилад, що може вимірювати електричний опір з точністю до ±2,5 %, під напругою (100±2) В постійного струму.</p> <p>Внутрішній електрод, що містить кульки нержавіючої сталі, діаметром 5 мм і загальною масою (4±0,1) кг. Сталеві кульки підключено до випробного інструменту за допомогою мідного кабелю.</p> <p>Зовнішній електрод, що містить контактну мідну пластину.</p> <p>Провідний лак, який має опір менше ніж <math>1 \cdot 10^3</math> Ом.</p> <p>Прилад для вимірювання опору провідного лаку, що складається з трьох провідних металевих датчиків радіусом (3±0,2) мм кожний</p>
7	Стійкість до ковзання взуття згідно з пунктом 5.11 ДСТУ EN ISO 20344 [7], ДСТУ EN ISO 13287 [9]	<p>Жорстка прямокутна опорна плита, з розмірами ширини, не меншими, ніж ширина вирізаного відповідним інструментом випробного зразка та завдовжки не менше ніж 50 мм.</p> <p>Засоби надійного кріплення випробного зразка до опорної плити.</p> <p>Засоби кріплення опорної пластини з випробним зразком.</p> <p>Наждачний карбідно-кремнієвий папір, зернистістю 400, закріплений на рівній жорсткій поверхні</p> <p>Механізм для опускання зразка взуття на поверхню й прикладання необхідної нормальної сили в потрібний час.</p> <p>Пристрій для вимірювання нормальної сили між взуттям та поверхнею під час випробування протягом періоду вимірювання з точністю вимірювання 2% чи більше.</p> <p>Механізм для індукування руху взуття відносно поверхні.</p> <p>Жорсткі клини, з кутом (7,0±0,5)° як придатний засіб для встановлення кута контакту</p>

2. Чинний в Україні національний стандарт, зокрема ДСТУ EN 15090 [2], встановлює мінімальні технічні вимоги, які висуваються до захисного взуття пожежника, що не в повній мірі відображають реальні умови використання зазна-

ченого виробу, як наслідок це приводить до тяжких травм пожежників отриманих під час гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій;

3. Враховуючи вищезазначене пропонується в Україні розробити національний стандарт на

захисне спорядження пожежника, в тому числі на захисне взуття, в якому врахувати всі можливі доповнення та недоліки існуючої нормативної бази та використовувати новий стандарт в цілях сертифікації та контролю якості захисного споря-

дження пожежника, яке потрапляє на ринок України та виготовляється в країні.

4. Виявлено шляхи удосконалення існуючої випробувальної бази призначеної для випробування захисного взуття.

#### Список літератури:

1. Присяжнюк, В.В., Щодо обґрунтування показників якості та методів їх оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника / С. В. Семичаєвський, М. Л. Якіменко, М. В. Осадчук, В. В. // Комунальне господарство міст. – 2021. – Том 1, випуск 161. – С. 290-295.
2. ДСТУ EN 15090:2017 (EN 15090:2012, IDT). Взуття для пожежників. – Введ. 2019-01-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 34 с.;
3. Провести пошукові дослідження та визначити шляхи удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання. Загальні технічні умови: звіт про НДР (заключний) УкрНДНЦЗ; кер. Борис О.П. Київ, 2016. 784 с;
4. ДСТУ EN ISO 20345:2016 (EN ISO 20345:2011, IDT; ISO 20345:2011, IDT). Засоби індивідуального захисту. Взуття безпечне. – Введ. 2016-12-13. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 27 с.
5. ДСТУ EN ISO 15025:2016 (EN ISO 15025:2002, IDT; ISO 15025:2000, IDT). Одяг захисний. Захист від тепла та полум'я. Метод випробування на обмежене поширення полум'я. – Введ. 2017-10-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2017. – 32 с.;
6. ДСТУ EN ISO 6942:2018 (EN ISO 6942:2002, IDT; ISO 6942:2002, IDT). Одяг захисний. Захист від тепла та вогню. Метод випробування. Оцінювання матеріалів і комбінацій матеріалів, що піддаються дії джерела теплового випромінювання. – Введ. 2020-01-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 11 с.;
7. ДСТУ EN ISO 20344:2016 (EN ISO 20344:2011, IDT; ISO 20344:2011, IDT). Засоби індивідуального захисту. Методи випробування взуття. – Введ. 2016-12-13. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. – 66 с.
8. ДСТУ EN 12568:2017 (EN 12568:2010, IDT). Засоби захисту стопи та ноги. Вимоги і методи випробування підносків та антипрокольних вставок. – Введ. 2019-01-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 26 с.
9. ДСТУ EN ISO 13287:2017 (EN ISO 13287:2012, IDT; ISO 13287:2012, IDT). Засоби індивідуального захисту. Взуття. Методи випробування стійкості до ковзання. – Введ. 2019-01-01. – К.: ДП «УкрНДНЦ», 2019. – 21 с.

#### **Semychayevsky S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V., Stylyk I.G., Benedyuk V.S. IMPROVEMENT OF PROCEDURES FOR TESTING OF FOOTWEAR FOR FIREFIGHTERS ACCORDING TO QUALITY INDICATORS TO IMPLEMENT THE REQUIREMENTS OF TECHNICAL REGULATIONS OF BUILDING PRODUCTS, BUILDINGS AND STRUCTURES**

*The article presents the urgency of conducting a study aimed at implementing in Ukraine modern requirements for quality indicators of special protective footwear for firefighters, methods and procedures for their evaluation. Emphasis is placed on the need to implement the requirements of the Technical Regulations of construction products, buildings and structures in order to ensure the safety of rescue teams during firefighting.*

*It is noted that previous studies do not contain data on improving the national regulatory framework for the quality of protective footwear for firefighters and methods of evaluation.*

*It is stated that in order to assist in solving this problem, the Institute of Public Administration and Research in Civil Protection commissioned research by the State Emergency Service of Ukraine on the topic: "Improvement of test methods for substances and materials, electrical products fire protection equipment on quality indicators (topic code: "Improvement of test methods"), the purpose of which was to improve the national regulatory framework, in particular on test methods for protective equipment of firefighters, including protective footwear on quality indicators.*

*General information on the classification of protective footwear for firefighters is given. The general appearance of leather and rubber protective footwear for firefighters is presented.*

*The results of the analysis of methods of tests of protective footwear with use of the necessary test equipment are resulted.*

*Ways to improve the existing test base designed for testing protective footwear have been identified. The list of the basic test equipment and its parameters necessary for realization of such methods of tests of protective footwear of the firefighter as "Determination of isolation from the raised temperatures (protection against thermal influence)", "Resistance to shock", "Resistance to compression", "Electrical properties (determination of electrical resistance)", "Shoe resistance". The specified list of test equipment is given in tabular form.*

*According to the results of the research, the publication draws the appropriate conclusions.*

**Key words:** *improvements, protective footwear for firefighters, quality indicators, test base, test methods.*

# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/36>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Осадчук В.С.**

Вінницький національний технічний університет

**Осадчук Я.О.**

Вінницький національний технічний університет

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОГЕНЕРАТОРНИХ ПАРАМЕТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З МАГНІТОРЕЗИСТОРОМ І МАГНІТОДІОДОМ

Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах, розроблено математичні моделі перетворювачів магнітного поля, на основі яких отримано аналітичні параметричні залежності функцій перетворення і чутливості. Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна магнітної індукції. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного опору коливальної системи в автогенераторних пристроях, що у свою чергу, змінює вихідну частоту перетворювачів магнітного поля.

Отримані аналітичні вирази параметричних функцій перетворення і чутливості пристроїв наочно показують вплив кожного параметра первинних магнітних елементів і елементів автогенераторів на вихідну частоту перетворювачів у порівнянні з функціями перетворення і чутливості, отриманих з еквівалентних схем магнітних перетворювачів на основі розв'язку рівнянь Кірхгофа.

Запропоновано автогенераторні параметричні перетворювачі магнітного поля на основі транзисторних структур з від'ємним диференційним опором з первинними магніточутливими резистором і діодом, при чому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схеми автогенератора, що спрощує конструкцію перетворювачів. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активну індуктивний елемент на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти перетворювачі магнітного поля за мікроелектронною технологією. У пристроях вимірювання магнітного поля з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, при цьому можливо передавати сигнал на відстань при роботі перетворювачів у надвисоких частотах. Чутливість пристроїв змінюється від 1,0 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ на частотах від 500 кГц до 1500 кГц.

**Ключові слова:** перетворювач, магнітна індукція, від'ємний диференційний опір, автогенератор, магніторезистор, магнітодіод.

### Постановка роботи.

Вимірювання характеристик магнітних полів та їх вплив на технологічні процеси в таких галузях виробництва як металургія, енергетика, машинобудування, авіаційна та космічна техніка потребують створення вимірювальних приладів високої точності, стабільності та швидкодії, а також дослідження впливів на результат вимірювань всієї сукупності факторів, яку супроводжують вимі-

рювальний процес [1, с. 147-171; 2, с. 223-298; 3, с. 292-300; 4, с. 208-231; 5, с. 160-187; 6; 7; 8].

Магнітне поле характеризується таким величинами як магнітний потік, магнітна індукція і напруженість магнітного поля. Вимірювані магнітні величини попередньо перетворюються в електричні, більш зручні для вимірювання. Перетворювачі магнітних величин в електричні створюються на основі явищ електромагнітної

індукції, ядерного магнітного резонансу, гальвано-магнітних і деяких інших [1, с. 147-171; 2, с. 223-298; 3, с. 292-300; 4, с. 208-231; 9; 10; 11, с. 88-147].

На теперішній час більшість перетворювачів магнітного поля мають вихідний сигнал у вигляді струму або напруги, що приводить до значних похибок вимірювання внаслідок втрат інформації в каналі між виходом перетворювача і входом підсилювально-перетворювальної апаратури, малих потужностей вихідного сигналу перетворювачів, їх низькою заводостійкістю і швидкодією [12; 13].

Усунути перераховані недоліки можливо на основі автогенераторних параметричних перетворювачів, які працюють в режимі перетворення “магнітна індукція – частота”, що дає можливість значно покращити їх метрологічні показники [14; 15].

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з перспективних наукових напрямів у створенні перетворювачів магнітного поля є дослідження в області перетворювачів на основі транзисторних структур з від’ємним диференціальним опором, що дозволяє створити прилади з частотним вихідним сигналом. Магнітні автогенераторні параметричні перетворювачі поєднують простоту і універсальність, які мають аналогові пристрої, з точністю і заводостійкістю, що характеризують перетворювачі з кодовим виходом. Застосування принципу перетворення “магнітна індукція-частота” на основі автогенераторних параметричних перетворювачів суттєво знижує собівартість інформаційно-вимірювальних систем, дозволяє значно зменшити масо-габаритні показники перетворювачів магнітного поля, підвищити точність і чутливість перетворення інформаційного сигналу [16, с. 125-174; 17; 18; 19].

#### Постановка завдання.

Метою роботи є створення та дослідження перетворювачів магнітного поля на основі транзисторних автогенераторних параметричних структур, в яких магніторезистор і магнітодіод виступають як первинні перетворювачі магнітного поля, так і як елементи автогенератора, в якому втрати енергії в коливальній системі компенсуються енергією від’ємного диференціального опору. Для досягнення поставленої мети у роботі необхідно вирішити такі задачі: провести аналіз існуючих наукових джерел та обґрунтування використання транзисторних автогенераторних параметричних структур з від’ємним диференціальним опором для побудови магнітних перетворювачів; розробити математичну модель перетворювачів магнітного

поля, в якій враховано залежність параметрів магніточутливих елементів та її вплив на вихідну частоту перетворювача; отримати параметричну залежність вихідної частоти перетворювача від індукції магнітного поля; зробити висновки з проведених досліджень.

#### Математична модель перетворювачів магнітного поля.

Електрична схема перетворювача з магніточутливим резистивним елементом подано на рис. 1. Вона являє собою інтегральну схему, що складається з двох біполярних транзисторів VT1 і VT2 з різними типами провідності, це приводить до появи спадаючої ділянки на вольт-амперній характеристиці на електродах колекторів транзисторів VT1 і VT2. Спадаюча ділянка вольт-амперної характеристики відповідає існуванню на ній від’ємного диференціального опору, що дозволяє будувати автогенератор перетворювача, у коло зворотного зв’язку якого включено магніточутливий резистивний елемент типу КМВ.

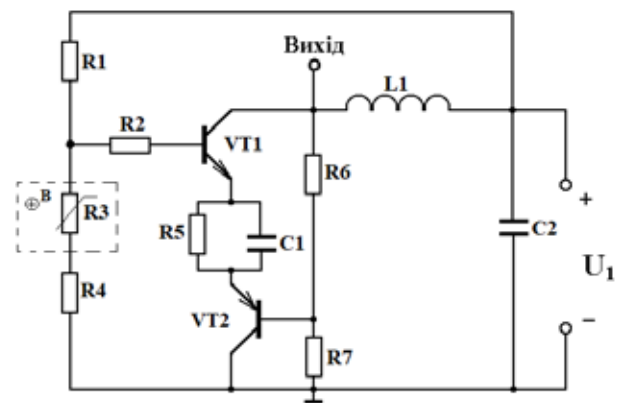


Рис. 1. Електрична схема перетворювача магнітної індукції з магніточутливим резистором

На електродах колектор-колектор транзисторів VT1 і VT2 існує повний опір, активна складова якого має від’ємне значення, а реактивна – ємнісний характер. Підключення індуктивності L1 до колектора VT1 створює коливальний контур, втрати енергії в якому компенсуються енергією від’ємного диференціального опору. При дії магнітного поля на магніточутливий резистор R3 відбувається зміна його опору, що приводить до зміни напруги на ньому, яка у свою чергу, змінює робочу точку на вольт-амперній характеристиці автогенератора перетворювача, що приводить до зміни вихідної частоти пристрою. Опори R<sub>1</sub> – R<sub>7</sub> здійснюють живлення перетворювача за допомогою джерела постійної напруги U1. Ємність C1 запобігає проходженню змінного струму через



джерело напруги  $U_1$ . Включення паралельного кола  $R_5$   $C_1$  у емітерне коло транзисторів VT1 і VT2 дозволяє значно поліпшити термостабільність пристрою.

Перейдемо до розгляду залежності параметрів напівпровідникового матеріалу магніторезистора від магнітної індукції. Зміна електричного опору напівпровідника, по якому протікає електричний струм, під дією магнітного поля, отримав назву магніторезистивного ефекту, або ефекту Гауса. Збільшення електричного опору при поперечному ефекті магнітоопору пояснюється викривленням траєкторії руху частини електронів під дією магнітного поля [1; 20; 21]. Оскільки ефект Хола і магніторезистивний ефект взаємозв'язані і доповнюють один одного, то для отримання кращого магніторезистивного ефекту необхідно значно зменшити вплив ефекту Хола [22].

Зміна електричного опору  $R(B)$  напівпровідникового матеріалу в магнітному полі описується формулою [22]

$$R(B) = R_0[1 + f(B)], \quad (1)$$

де  $R_0$  – опір магніторезистора без дії магнітного поля,  $B$  – індукція магнітного поля,  $\mu$  – рухливість носіїв заряду. В слабких магнітних полях функція  $f(B)$  залежить від абсолютної величини  $B$  і дорівнює  $(\mu B)^2$ . В сильних магнітних полях, коли  $(\mu B) \gg 1$ , дорівнює  $(\mu B)$ .

На практиці вплив ефекту Хола можна виключити, якщо на поверхню напівпровідника магніторезистора нанести вузькі металічні смужки для закорочування холівської різниці потенціалів. Смужки повинні бути розташовані перпендикулярно лініям струму і напрямку індукції магнітного поля. Замість нанесення короткозамикаючих металічних смужок на поверхні InSb використовують технологію створення магніторезисторів (InSb+NiSb), при якій матеріал NiSb створює голки дуже малого опору, які при певній орієнтації повністю виключають холівську напругу. Найкращим напівпровідниковим матеріалом при певній геометричній формі є InSb- антимонід індію.

З формули (1) витікає вираз приросту опору магніторезистора при дії слабого магнітного поля [1;23].

$$\Delta R(B) = KR_0 \left[ \frac{q}{m^*} \cdot \frac{l}{v} \right]^2 B^2, \quad (2)$$

де  $q$  – заряд електрона,  $m^*$  – ефективна маса електрона,  $l$  – довжина його пробігу,  $v$  – швидкість руху електрона,  $K$  – коефіцієнт, який враховує розподіл електронів за швидкостями і механізм розсіювання електронів. Як показано в роботах

[1;22], коефіцієнт  $K$  в слабких магнітних полях дорівнює 1,17, а в сильних полях дорівнює одиниці, тому його залежність від магнітної індукції практично можна не враховувати. Згідно формули (2) залежність  $\Delta R(B)$  від зміни параметрів напівпровідникового матеріалу магніторезистора від магнітної індукції можна представити у вигляді

$$\Delta R(B) = \frac{\partial R}{\partial m^*} \Delta m^*(B) + \frac{\partial R}{\partial l} \Delta l(B) + \frac{\partial R}{\partial v} \Delta v(B) + \frac{\partial R}{\partial B} \Delta B. \quad (3)$$

Після диференціювання виразу (3) отримуємо формулу

$$\Delta R(B) = \frac{-2R_0 B^2}{m^{*3}} \left[ \frac{ql}{v} \right]^2 \Delta m^*(B) + 2R_0 B^2 l \left[ \frac{q}{m^* v} \right]^2 \Delta l(B) - \frac{2R_0 B^2}{v^3} \left[ \frac{ql}{m^*} \right]^2 \Delta v(B) + 2R_0 B \left[ \frac{ql}{m^* v} \right]^2 \Delta B. \quad (4)$$

Формула (4) дозволяє аналітично визначити зміну електричного опору магніторезистора від дії магнітного поля.

Перейдемо до визначення параметричної залежності вихідної частоти перетворювача від параметрів магніточутливого резистора і параметрів автогенератора перетворювача. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії магнітного поля в енергію змінного електричного поля на виході перетворювача. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії перетворювача. На першому етапі роботи перетворювача енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля через напругу на магніторезисторі, яка є вхідною напругою для автогенератора пристрою. В подальшому енергія електричного поля, яка визначається напругою на магніторезисторі, перетворюється в енергію змінного електричного поля, яка зв'язана з еквівалентною ємністю  $C_{екв}$  коливального контуру автогенератора перетворювача. Таким чином, коефіцієнт корисної дії перетворювача магнітного поля визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tI^2 R_0 (\mu_n B)^2}, \quad (5)$$

де  $C_{екв}$  – еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора,  $U_{\sim}$  – зміна вихідна напруга перетворювача,  $t$  – період коливань змінної напруги  $U_{\sim}$ ,  $I$  – струм через напівпровідник магніотранзистора,  $\mu_n$  – рухливість електронів у напівпровіднику магніторезистора. З формули (5) визначимо еквівалентну ємність контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{2\eta t^2 R_0 (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2}. \quad (6)$$

З другого боку, еквівалентну ємність можна визначити з формули резонансної частоти автогенератора, яка має вигляд [16]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{екв}} \left[ \frac{R_g^2 C_{екв}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (7)$$

де  $R_g$  – від’ємний диференційний опір коливального контуру,  $L$  – його індуктивність. З виразу (7) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначимо  $C_{екв}$ ,

$$(4F_0^2 \pi^2 R_g^2 L) C_{екв}^2 - R_g^2 C_{екв} + L = 0. \quad (8)$$

Таким чином,  $C_{екв}$  описується виразом

$$C_{екв} = \frac{R_g^2 + \sqrt{R_g^4 - 16F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}}{8F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}. \quad (9)$$

Вирази (6) і (9) дорівнюють один одному, тому рівняння для визначення резонансної частоти  $F_0$  має вигляд

$$\frac{2\eta t L I^2 R_0 (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2} - \frac{R_g^2 + \sqrt{R_g^4 - 16F_0^2 \pi^2 R_g^2 L}}{8F_0^2 \pi^2 R_g^2 L} = 0. \quad (10)$$

Розв’язок рівняння (10) визначає величину  $F_0$ .

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U_{\sim}^2}{2\eta t L I^2 R_0 (\mu_n B)^2} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 R_g^2 I^4 R_0^2 (\mu_n B)^4} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Вираз (11) уявляє собою параметричну залежність вихідної частоти перетворювача магнітного поля, яка залежить як від параметрів напівпровідникового магніторезистора, так і від параметрів коливального контуру автогенератора пристрою

при дії магнітного поля, тобто його магнітної індукції. Вираз (11) дозволяє досить просто розрахувати функцію перетворення пристрою, ніж складним шляхом на основі еквівалентної схеми перетворювача, виходячи з розв’язку рівнянь Кірхгофа.

На рис. 2 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення пристрою від магнітної індукції.

Як видно з рис. 2, вихідна частота пристрою змінюється від 500 кГц до 780 кГц при зміні індукції магнітного поля від 0,1 мТ до 120 мТ.

Чутливість сенсора визначається похідною функцією (11) за параметром індукції  $B$ . У виразі (11), окрім впливу самої магнітної індукції  $B$ , необхідно врахувати залежність вихідної змінної напруги  $U_{\sim}$  від магнітної індукції, тоді вираз (11) приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ d_1 B^{-2} U_{\sim}^2(B) - d_2 B^{-4} U_{\sim}^4(B) \right]^{1/2}, \quad (12)$$

$$\text{де } d_1 = \frac{1}{2\eta t L I^2 R_0 \mu_n^2}, \quad d_2 = \frac{1}{4\eta^2 t^2 R_g^2 I^4 R_0^2 \mu_n^4}.$$

З врахуванням вищезазначених зауважень, функція чутливості перетворювача описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[ d_1 B^{-2} U_{\sim}^2(B) - d_2 B^{-4} U_{\sim}^4(B) \right]^{-1/2} \cdot$$

$$\left[ \left( 2d_1 U_{\sim}(B) \cdot B^{-2} \cdot \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 2d_1 B^{-3} U_{\sim}^2(B) \right) - \left( 4d_2 U_{\sim}^3(B) \cdot B^{-4} \cdot \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 4d_2 B^{-5} U_{\sim}^4(B) \right) \right]. \quad (13)$$

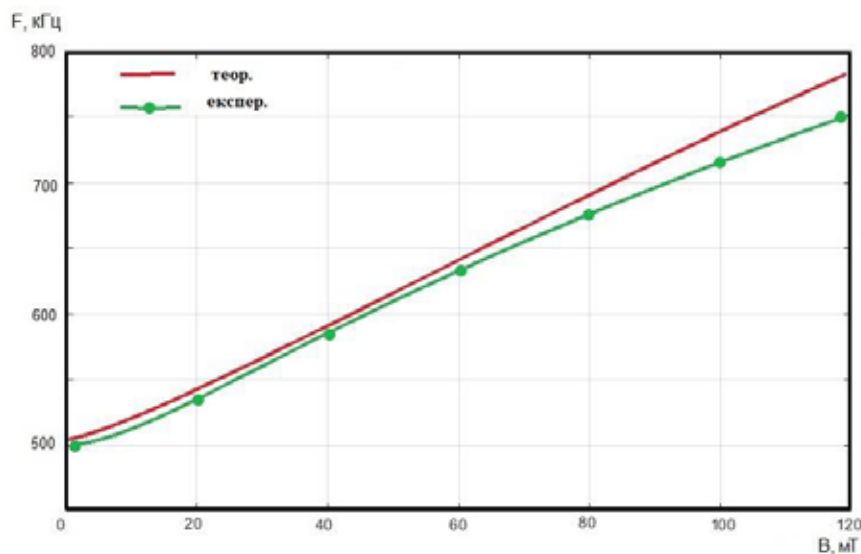


Рис. 2. Розрахункова і експериментальна залежності функції перетворення від магнітної індукції

Графік розрахункової і експериментальної залежності функції чутливості перетворювача від магнітної індукції подано на рис. 3.

Як видно з графіка (рис. 3), чутливість перетворювача у діапазоні від 0,1 мТ до 120 мТ складає від 1,0 кГц/мТ до 2,38 кГц/мТ.

Подальше покращення чутливості перетворювача магнітного поля можливо отримати на основі схеми параметричного автогенераторного пристрою з використанням магніточутливого діода [12; 13]. Електрична схема магнітного перетворювача з магніточутливим діодом подана на рис. 4. Вона являє собою схему, яка подана на рис. 1, окрім того, що пасивна індуктивність  $L1$  заміна на активний індуктивний елемент на основі біполярного транзистора  $VT3$  з фазозсуваючим електричним колом  $R7C2$ .

Виникнення індуктивних властивостей у біполярних транзисторах обумовлено кінцевою швидкістю руху носіїв заряду у базовій області. Сигнал, що прикладений до емітера не може з'явитися на колекторному переході, доки носії заряду проходять базу, в результаті чого виникає затримка у часі. Отже, струм колектора відстає у часі від напруги на емітері, яка викликала цей струм, що відповідає індуктивній реакції на електродах емітер-колектор біполярного транзистора. Величина індуктивності та добротності визначається на основі нелінійної моделі індуктивного транзистора, яка базується на моделі Еберса-Молла.

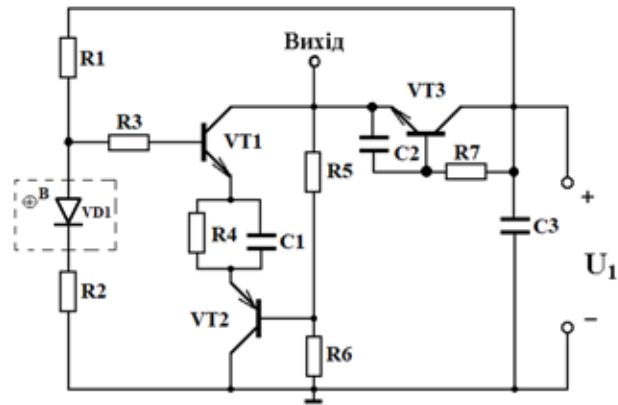


Рис. 4. Електрична схема перетворювача магнітного поля з активною індуктивністю і магнітодіодом

Включення зовнішнього  $R7C2$  кола до транзистора дозволяє збільшити як індуктивність, так і добротність активного елемента з однієї сторони, а з іншої сторони – повністю реалізувати як активний індуктивний елемент, так і увесь пристрій за мікроелектронною технологією [16].

Розглянемо роботу магніточутливого діода і його параметри, які необхідні для подальшого розрахунку характеристик перетворювача магнітного поля. В основі роботи магніточутливого діода лежить магнітодіодний ефект. Під магнітодіодним ефектом розуміють різку зміну електричного опору напівпровідникового діода з довгою базою при роботі його у прямому напрямку при дії на

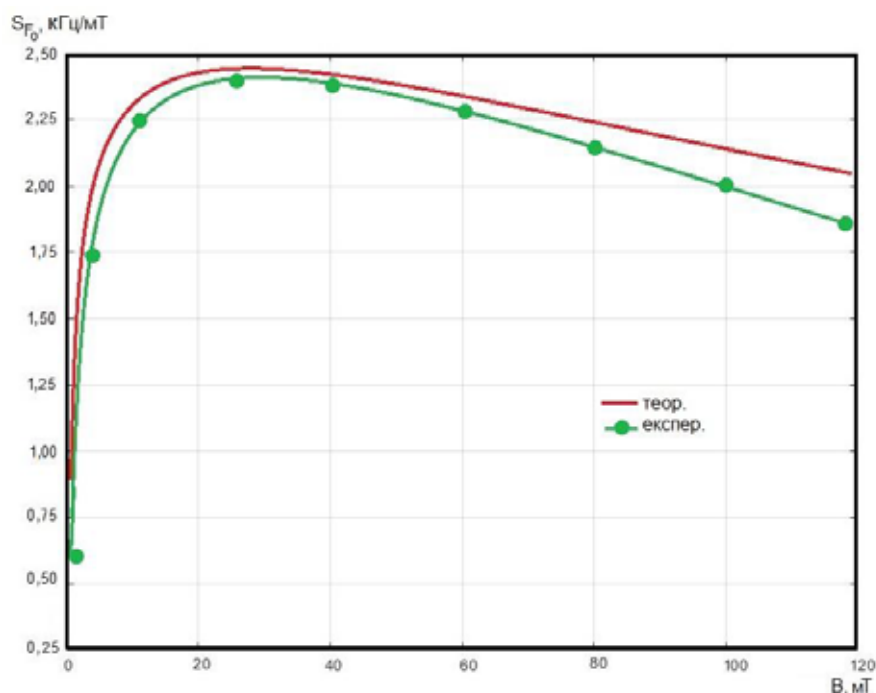


Рис. 3. Залежність функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

нього поперечного магнітного поля [13; 15]. Під довгою базою діода розуміють, коли довжина бази дорівнює або більше дифузійної довжини носіїв заряду. При включенні діода у пряму режимі з емітерної р-області в область п-бази інжектуються дірки, концентрація яких зменшується на відстані дифузійної довжини  $L_D$  в  $e = 2,718$  рази. При високих рівнях інжекції довжина  $L_D$  описується формулою [1]

$$L_D^2 = \left( \frac{2b}{b+1} \right) D_C \tau, \quad (14)$$

де  $b = \mu_n / \mu_p$  відношення рухливостей електронів і дірок,  $D_C$  – коефіцієнт спільної дифузії електронів і дірок,  $\tau$  – час життя носіїв заряду. Опір п- області, тобто довгої бази, сильно залежить від значення дифузійної довжини. Чим менше величина  $L_D$ , тим більшим буде опір бази. При розташуванні магніточутливого діода у магнітному полі таким чином, що вектор магнітної індукції буде перпендикулярним до вектора струму, то коефіцієнт дифузії  $D_C$  зменшується внаслідок викривлення траєкторії електронно-діркових пар під дією сили Лоренца. Оскільки концентрація дірок в базі діода наближається до значення концентрації електронів, то при спільній дифузії електронно-діркових пар практично відсутнє поле Хола. Тому магнітне поперечне поле викликає зменшення дифузійної довжини, а це, у свою чергу, приводить до збільшення опору бази. Таким чином, відбувається перерозподіл напруги між п-областю бази і р-п-переходом діода, при цьому напруга на р-п-переході падає, а на п-області зростає при постійному значенні напруги на діоді. Зменшення напруги на р-п-переході викликає зменшення концентрації інжектованих дірок у базу, що приводить до подальшого зростання опору бази. Отже, дія перпендикулярного магнітного поля до площини діода, через який протікає струм, приводить до різкого зростання опору діода при його роботі у прямому режимі.

Перейдемо до розгляду залежності опору бази магнітодіода від магнітної індукції. Виходячи з класичної формули опору напівпровідника в врахуванням виразу (1), опір бази описується формулою

$$R_B = \frac{U_B (\mu_n B)^2}{q \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{1/2} n_n S}, \quad (15)$$

де  $U_B$  – напруга на базовій області діода,  $n_n$  – концентрація електронів в базі,  $S$  – площа бази.

На основі формули (15) розглянемо залежності параметрів діода від магнітної індукції

$$\Delta R_B(B) = \frac{\partial R_B}{\partial U_B} \Delta U_B(B) + \frac{\partial R_B}{\partial D_C} \Delta D_C(B) + \frac{\partial R_B}{\partial n_n} \Delta n_n(B) + \frac{\partial R_B}{\partial \tau} \Delta \tau(B) + \frac{\partial R_B}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(B) + \frac{\partial R_B}{\partial B} \Delta B. \quad (16)$$

Виконавши диференціювання у виразі (16), отримаємо формулу приросту опору бази від магнітної індукції

$$\begin{aligned} \Delta R_B(B) = & [q n_n S]^{-1} \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} (\mu_n B)^2 \Delta U_B(B) - \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} D_C^{3/2} \Delta D_C(B) + \\ & + \frac{1}{2} \tau^{-1/2} [q n_n S]^{-1} \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B (\mu_n B)^2 \Delta \tau(B) - n_n^2 [q S]^{-1} \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{1/2} \times \\ & \times U_B (\mu_n B)^2 \Delta n_n(B) + 2 [q n_n S]^{-1} \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B \mu_n B^2 \Delta \mu_n(B) + \\ & + 2 [q n_n S]^{-1} \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^{-1/2} U_B \mu_n^2 B \Delta B. \end{aligned} \quad (17)$$

Формула (17) є аналітичним виразом для визначення приросту опору базової області магніточутливого діода від магнітної індукції. Визначивши її, перейдемо до розрахунків параметричної залежності резонансної частоти перетворювача від дії магнітного поля. Метод розрахунку цієї залежності такий самий, як було зроблено вище у цій роботі. Коефіцієнт корисної дії перетворювача з магніточутливим діодом описується формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U_{\sim}^2}{2tq^2 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} (\mu_n B)^2}, \quad (18)$$

де  $R_{B0}$  – опір базової області магнітодіода без дії магнітного поля. З формули (18) визначаємо еквівалентну ємність коливального контуру автогенератора перетворювача

$$C_{екв} = \frac{2\eta tq^2 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} (\mu_n B)^2}{U_{\sim}^2}, \quad (19)$$

Прирівнявши вирази (9) і (19), отримаємо рівняння для визначення параметричної залежності резонансної частоти від дії магнітного поля

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[ \frac{U_{\sim}^2}{2\eta tq^2 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} L (\mu_n B)^2} - \frac{U_{\sim}^4}{4\eta^2 t^2 q^4 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^2 n_n^4 S^4 R_{B0}^2 R_g^2 (\mu_n B)^4} \right]^{1/2}, \quad (20)$$

Введемо наступні позначення

$$d_3 = \left[ 2\eta tq^2 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right] n_n^2 S^2 R_{B0} L (\mu_n B)^2 \right]^{-1}, \quad (21)$$

$$d_4 = \left[ 4\eta^2 t^2 q^4 \left[ \frac{D_C}{\tau} \left( \frac{2b}{b+1} \right) \right]^2 n_n^4 S^4 R_{B0}^2 R_g^2 (\mu_n B)^4 \right]^{-1}, \quad (22)$$

тоді вираз (20) отримає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} [U_{\sim}^2(B)B^{-2}d_3 - U_{\sim}^4(B)B^{-4}d_4]^{1/2}. \quad (23)$$

Вираз (20) є функцією перетворення пристрою, який дозволяє визначити вплив кожного параметра магнітодіода і параметрів автогенератора на вихідну резонансну частоту перетворювача магнітного поля. Це надає можливість ціленаправлено працювати конструкторам сенсорів магнітного поля для підвищення точності, чутливості і вихідної частоти пристроїв.

На рис. 5 подано розрахункову і експериментальну залежності функції перетворення від магнітної індукції. Як видно з графіка (рис. 5), частота змінюється від 710 кГц до 1285 кГц при зростанні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

Чутливість пристрою визначається похідною виразу (23) за параметром індукції  $B$ , якщо вважати додатково залежною вихідну напругу перетворювача від індукції. Після проведення необхідних перетворень у формулі (23), функція чутливості  $S_{F_0}$  описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} [U_{\sim}^2(B)B^{-2}d_3 - U_{\sim}^4(B)B^{-4}d_4]^{-1/2} \cdot \left[ \left( 2U_{\sim}(B)B^{-2}d_3 \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 2B^{-3}U_{\sim}^2(B)d_3 \right) - \left( 4U_{\sim}^3(B)B^{-4}d_4 \frac{dU_{\sim}(B)}{dB} - 4B^{-5}U_{\sim}^4(B)d_4 \right) \right]. \quad (24)$$

На рис. 6 подано розрахункову і експериментальну залежності функції чутливості пристрою від магнітної індукції

Як видно з графіку (рис. 6), що чутливість перетворювача складає від 3,53 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ в діапазоні зміни магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ.

### Висновки

1. Запропоновано автогенераторні параметричні перетворювачі магнітного поля з частотним виходом на основі транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором з первинними магніточутливими резистором і діодом, при чому первинні магніточутливі елементи є активними елементами схем автогенераторів, що спрощує конструкцію перетворювачів. Запропоновано також замінити пасивну індуктивність коливального контуру автогенератора на активний індуктивний елемент, на основі транзистора з фазозсуваючим RC-колом, що дає можливість розширити діапазон регулювання вихідної частоти, а також повністю виготовляти перетворювачі магнітного поля за мікроелектронною технологією.

2. Виходячи з розгляду фізичних процесів у первинних магніточутливих елементах і автогенераторах перетворювачів, розроблено математичні моделі перетворювачів магнітного поля, на основі яких отримано аналітичні параметричні залежності функцій перетворення і чутливості.

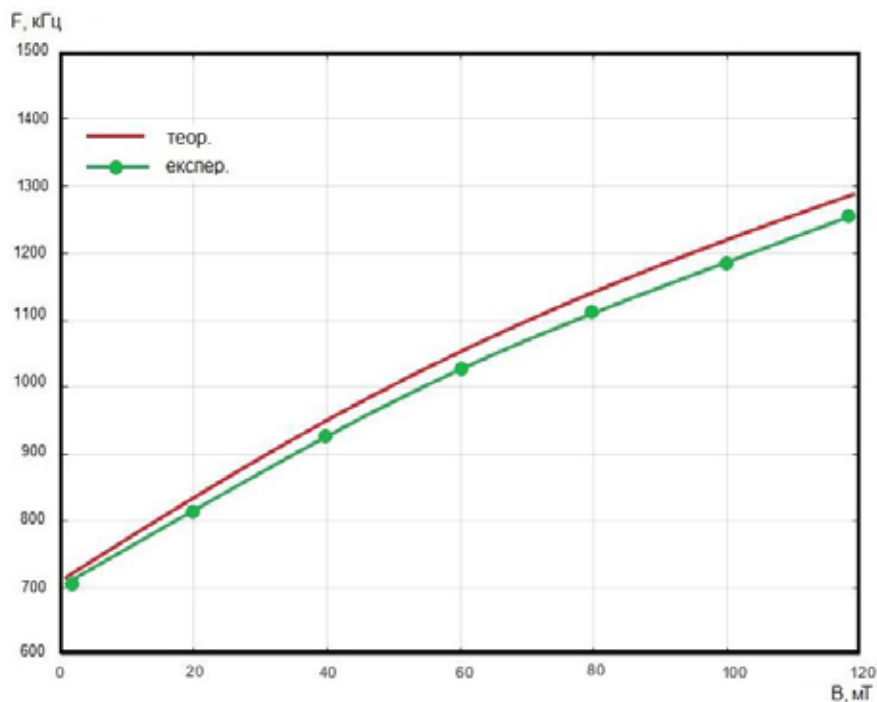


Рис. 5. Розрахункова і експериментальна залежності функції перетворення від магнітної індукції

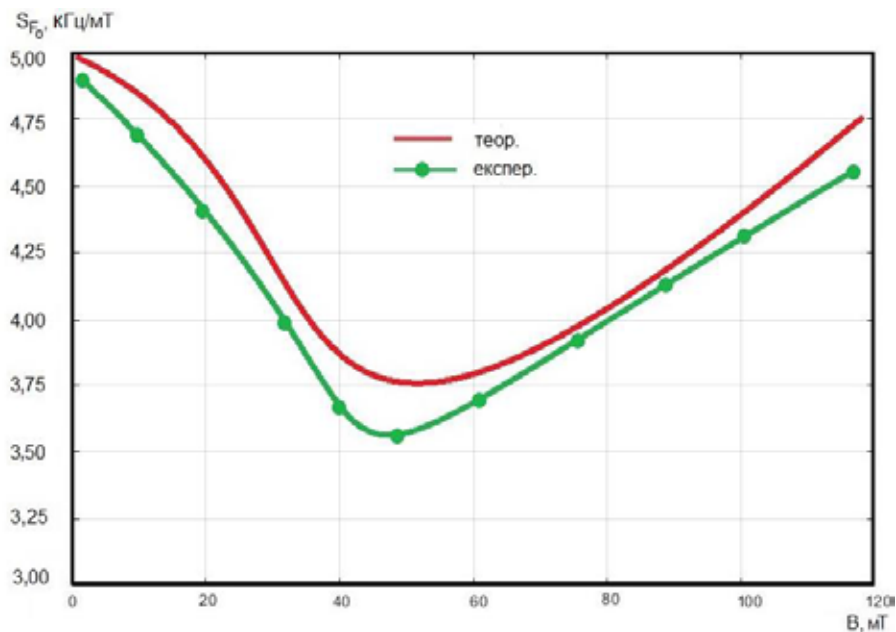


Рис. 6. Розрахункова і експериментальна залежності функції чутливості перетворювача від магнітної індукції

Показано, що основний внесок у функцію перетворення вносить зміна магнітної індукції. Це викликає зміну еквівалентної ємності і диференційного опору коливальної системи автогенераторних пристроїв, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту перетворювачів магнітного поля. Чутливість пристроїв змінюється від 1,0 кГц/мТ до 4,95 кГц/мТ при зміні магнітної індукції від 0,1 мТ до 120 мТ на частотах від 500 кГц до 1500 кГц.

3. Отримані аналітичні вирази параметричних функцій перетворення і чутливості пристроїв наочно показують вплив кожного параме-

тра первинних магнітних елементів і елементів автогенераторів на вихідну частоту перетворювачів у порівнянні з функціями перетворення, отриманих з еквівалентних схем перетворювачів на основі розв'язку рівнянь Кіргофа. У пристроях вимірювання магнітного поля з частотним виходом не потрібні аналого-цифрові перетворювачі і підсилювальні пристрої при подальшій обробці інформаційних сигналів, що здешевлює інформаційно-вимірювальну апаратуру, окрім того, вони дозволяють передавати інформацію на відстань.

#### Список літератури:

1. Мікроелектронні сенсори фізичних величин. Том.1. За редакцією З. Ю. Готри. Львів:Ліга-Прес, 2002. 475с.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Москва: Техносфера, 2007. 384 с.
3. Schaumburg H. Sensoren. Stuttgart: Teubner, 1992. 517 p.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва: Техносфера, 2012. 624с.
5. Мартинес-Дуарт Дж. М. Нанотехнологии для микро- и оптоэлектроники / Дж. М. Мартинес-Дуарт, Р.Дж. Мартин-Палма, Ф. Агулло-Рueda. Москва: Техносфера, 2007. 368 с.
6. Alvaro Gonzalez, Valentina Zhukova, Paula Corte-Leon, Alexandr Chizhik, Mihail Ipatov, Juan Maria Blanco and Arcady Zhukov. Tuning of Magnetoimpedance Effect and Magnetic Properties of Fe-Rich Glass-Coated Microwires by Joule Heating//Sensors 2022, 22, 1053. <https://doi.org/10.3390/s22031053>
7. Sungjae Ha, Dongwoo Lee, Hoijun Kim, Soonchul Kwon, EungJo Kim and Junho Yang. Neural Network for Metal Detection Based on Magnetic Impedance Sensor // Sensors 2021, 21, 4456. <https://doi.org/10.3390/s21134456>
8. Kittmann A., Durdaut P., Zabel S., Reermann J., Schmalz J., Spetzler B., Meyners D., Sun N.X., McCord J., Gerken M. et al. Wide band low noise love wave magnetic field sensor system // Sci. Rep. 2018, 8, 278.
9. Jana Marie Meyer, Viktor Schell, Jingxiang Su, Simon Fichtner, Erdem Yarar, Florian Niekief at al. Thin-Film-Based SAW Magnetic Field Sensors // Sensors 2021, 21, 8166. <https://doi.org/10.3390/s21248166>

10. Eric Elzenheimer, Christin Bald, Erik Engelhardt, Johannes Hoffmann, Patrick Hayes at al. Quantitative Evaluation for Magnetoelectric Sensor Systems in Biomagnetic Diagnostics // *Sensors* 2022, 22, 1018. <https://doi.org/10.3390/s22031018>
11. Поплавко Ю.М. Основы физики магнитных явлений в кристаллах: Учебное пособие. Киев: НТУУ «КПИ». 2004. 226 с.
12. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. – Вінниця : ВНТУ, 2013. 264 с.
13. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Pontial of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3 : [coll.] monograph. Published by Science Publishing. LP22772, 20-22 Wenlock Road, London, United Kingdom, 2019. – Pp. 212-237.
14. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Research on a magnetic field sensor with a frequency output signal based on a tunnel-resonance diode// *Informatyka, Automatyka, Pomiar w Gospodarce i Ochronie Środowiska*. IAPGOS, 4/2020, 51–56 p.
15. Vladimir S. Osadchuk, Oleksandr V. Osadchuk, Iaroslav A. Osadchuk, Tomasz Zyska, Aizhan Zhanpeisova. Microelectronic frequency transducers of magnetic field with Hall elements // *Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering, Volume 10808, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments 2018, 108086P, 2018, pp.1-14. ISSN 0277-786X. <https://doi.org/10.1117/12.2501629>.*
16. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница: «Универсум-Винница», 1999. – 275 с.
17. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskia O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments, 2019; 111761I (2019)*.
18. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments, 2017, 104451X (2017)*.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Kisała P., Zyska T., Annabaev A., Mussabekov K. Radiomeasuring pressure transducer with sensitive MEMS Capacitor. *Przegląd Elektrotechniczny*. 2017, R93(3), P.113–116.
20. Викулин И.М., Викулина Л.Ф., Стафеев В.И. Гальваномагнитные приборы. Москва: Радио и связь, 1983. 104 с.
21. Егiazарян Г.А., Стафеев В.И. Магнитодиоды, магнитотранзисторы и их применение. Москва, Радио и Связь, 1987. 88 с.
22. Вайсс Г. Физика гальваномагнитных полупроводниковых приборов их применение. Москва, 1974. 384 с.
23. Sze S.M., Kwok K.Ng. *Physics of Semiconductor Devices*. Wiley-Interscience: Hoboken, USA, 2007. 763 p.

### **Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.O. RESEARCH OF AUTOGENERATOR PARAMETRIC MAGNETIC FIELD TRANSDUCERS WITH MAGNETORESISTOR AND MAGNETODIOD**

*Based on the consideration of physical processes in primary magnetosensitive elements and autogenerator transducers, mathematical models of magnetic field transducers have been developed, on the basis of which analytical parametric dependences of transformation and sensitivity functions are obtained. It is shown that the main contribution to the transformation function is made by the change of magnetic induction. This causes a change in the equivalent capacitance and differential resistance of the oscillatory system in autogenerator devices, which in turn changes the output frequency of the magnetic field transducers.*

*The obtained analytical expressions of parametric functions of conversion and sensitivity of devices clearly show the influence of each parameter of primary magnetic elements and elements of autogenerators on the output frequency of transducers in comparison with transformation and sensitivity functions obtained from equivalent schemes*

*Autogenerator parametric magnetic field transducers based on negative differential resistance transistor structures with primary magnetosensitive resistors and diodes are proposed, with primary magnetosensitive elements being active elements of the autogenerator circuit, which simplifies the design of transducers. It is also proposed to replace the passive inductance of the oscillating circuit of the autogenerator with an active inductive element based on a transistor with phase-shifting RC-circuit, which allows to expand the range of output frequency control, as well as fully manufacture magnetic*



*field transducers by microelectronic technology. Analog-to-digital transducers and amplifier devices are not required in frequency-output magnetic field measuring devices for further processing of information signals, which reduces the cost of information-measuring equipment. The sensitivity of the devices varies from 1.0 kHz/mT to 4.95 kHz/mT when the magnetic induction changes from 0.1 mT to 120 mT at frequencies from 500 kHz to 1500 kHz.*

**Key words:** *transducer, magnetic induction, negative differential resistance, autogenerator, magnetoresistor, magnetodiode.*

**Відомості про авторів**

**Алексієнко Г.В.** – інженер-технолог ТОВ НВФ «Вест Лабс ЛТД»

**Альховик О.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Артюхов В.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри Системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баган Т.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баклан І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики і програмної інженерії факультету інформатики і обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Барабаш П.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баришич Л.М.** – аспірант 2-го курсу групи ПП-01ф кафедри інформатики та програмної інженерії факультету інформатики і обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бенедюк В.С.** – начальник відділу систем протипожежного захисту науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Березюк І.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Богдановський М.В.** – старший викладач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

**Бритов О.А.** – старший викладач кафедри Системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бунь В.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Бурик М.П.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Войтік А.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

**Гайдукевич С.В.** – старший викладач кафедри «Електротехнологій та експлуатації енергообладнання» Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

**Гіоргізова-Гай В.Ш.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Гіць І.І.** – аспірант, асистент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Говорущенко Т.О.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Головіна Н.В.** – аспірант Херсонського національного технічного університету

**Гондовська А.С.** – інженер-технолог АТ «Слов'янські шпалери – Корюківська фабрика технічних паперів»

**Грищук О.К.** – кандидат технічних наук, професор кафедри туризму Національного транспортного університету

**Демченко І.В.** – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Дідик О.К.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Дмитренко Н.В.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

**Добржанський О.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

**Доманський О.Ю.** – магістрант Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Єрко Я.В.** – аспірант кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

**Жила М.П.** – магістрант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Завгородній В.В.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Завгородня Г.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Закіпна О.П.** – магістр кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Зубенко В.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Іванов С.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

**Іллїна О.О.** – асистент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кануннікова Н.О.** – PhD, науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Капустян М.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Кириченко К.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри управління судном Херсонської державної морської академії

**Кірюша Б.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кобзев О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічної технології неорганічних речовин, каталізу та екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Колодницька Р.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Державного університету «Житомирська політехніка»

**Кондратець В.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Коновал В.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри цивільного та промислового будівництва Черкаського державного технологічного університету

**Коскіна Ю.О.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

**Кравчук А.Р.** – аспірант, асистент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

**Крамаренко К.С.** – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Куляс Р.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Кутковецька Т.О.** – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

**Лаврушкін О.В.** – бакалавр кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Леськів Я.А.** – магістр Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України “Бережанський агротехнічний інститут”

**Лободзинський В.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ловська А.О.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Лопатко І.Ю.** – аспірант кафедри комп’ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

**Ляшенко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Малахова Н.Г.** – магістрантка Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Мацуй А.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації виробничих процесів Центральноукраїнського національного технічного університету

**Михайленко Н.В.** – здобувач вищої освіти, 4 курс ЛЦ-81, кафедра екології та технології рослинних полімерів інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Нкука Мабіала Б.Д.** – аспірант, кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Оляднічук Р.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри агроінженерії Уманського національного університету садівництва

**Осадчук В.С.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Осадчук М.В.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Осадчук О.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Осадчук Я.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Пазюк В.М.** – доктор технічних наук, доцент, провідний науковий співробітник Інституту технічної теплофізики Національної академії наук України

**Петрик А.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

**Півторак Г.В.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

**Пінаєв Б.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Пушка О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, декан інженерно-технологічного факультету Уманського національного університету садівництва

**Розорінов Г.М.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Сарнацький В.В.** – аспірант, асистент кафедри інформатики та програмної інженерії, факультет інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Семенов А.О.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Семенова Н.П.** – старший викладач кафедри «Електротехнологій та експлуатації енергообладнання» Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України “Бережанський агротехнічний інститут”

**Семенова О.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

**Семичасівський С.В.** – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Сербул О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Сільванська Г.М.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Сірченко І.А.** – аспірант кафедри акустичних та мультимедійних електронних систем Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського"

**Скриннік І.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Будівельних, дорожніх машин і будівництва» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Соломаха А.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Спінул Л.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Стилик І.Г.** – начальник сектору метрології Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Стіканов В.Ю.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри Системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сухий М.К.** – студент IV курсу кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Тарасов Д.О.** – бакалавр, студент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Державного університету «Одеська політехніка»

**Тіницька Е.Ю.** – магістрант, 2 курс, ЛЦ-01 мн, кафедра екології та технології рослинних полімерів інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ткачук А.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені професора Б.Б. Самотокаїна Державного університету «Житомирська політехніка»

**Трембус І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів інженерно-хімічного факультету Національного технічного університету «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Трушаков Д.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Ушкаренко О.О.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Федотова М.О.** – кандидат технічних наук, асистент кафедри «Автоматизації виробничих процесів» Центральноукраїнського національного технічного університету

**Фомін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

**Фролова Л.А.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри технології неорганічних речовин та екології ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Чибеліс В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шевченко І.О.** – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Шибасв О.Г.** – доктор технічних наук, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

**Шпильовий О.О.** – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

**Штефан В.В.** – доктор технічних наук, професор кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Шувалов Д.Р.** – студент 2 курсу магістерського рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології кафедри Програмних і комп'ютерно-інтегрованих технологій Інституту штучного інтелекту та робототехніки Державного університету «Одеська політехніка»

**Шуцький І.С.** – аспірант III курсу групи 161 кафедри технологій палив, полімерних та поліграфічних матеріалів ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Юрченко А.В.** – магістр кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Яворський О.В.** – бакалавр, студент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Державного університету «Одеська політехніка»

**Яглицький Ю.К.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонського навчально-наукового інституту Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Якіменко М.Л.** – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Ярошевич М.В.** – магістрантка кафедри теплоенергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 33 (72) № 2 2022**

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. 30,0. Ум. друк. арк. 40,46. Зам. № 0522/175

Підписано до друку 23.05.2022. 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.