

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

*Журнал заснований у 1918 році*

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 32 (71) № 3 2021**



Видавничий дім  
«Гельветика»  
2021

## **Головний редактор:**

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

## **Члени редакційної колегії:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet  
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського  
(протокол № 10 від 07.06.2021 року)**

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

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

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

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

**ISSN 2663-5941 (Print)**

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

© Таврійський національний університет ім. В.І. Вернадського, 2021

# ЗМІСТ

## ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

**Морочко В.В.**

ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ  
ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ, ЗАПРАВЛЕНИМ ІЗ РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ  
І КАЛІБРУЮЧІЙ ДІЛЯНКАХ.....1

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В.**

ПЕРСПЕКТИВНІ ГАЛТУВАЛЬНІ ТА ЗМІШУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ  
В МАШИНІ ТИПУ TURBULA.....6

**Топчій Н.В., Білевська О.С.**

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СУМІСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ... 12

## АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

**Єнчев С.В., Цибульська Т.П.**

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ  
ЗМІННОГО СТРУМУ В MATLAB.....17

## КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

**Терлич С.В., Татарченко О.Б.**

ЕВОЛЮЦІЯ ЕКСТЕР'ЄРУ КОРАБЛЯ У СВІТОВОМУ КОРАБЛЕБУДУВАННІ.....24

## ПРИЛАДИ

**Альховик О.В.**

СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ  
ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ І ВИРОБІВ.....30

**Овчарук В.Т.**

ЗАПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МАРКУВАННЯ  
ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ДОСЛІДНОГО ВИРОБНИЦТВА.....36

**Шорнікова С.В.**

ОПТИЧНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНИ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ: ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ... 42

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Ikhsanov Sh.M, Diakonov O.S.**

8-APSK SIGNAL CONSTELLATION OPTIMIZATION OF THE DVB-S2X STANDARD..... 49

**Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Сушин І.О.**

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ КЕРУВАННЯ РУХОМ РОЗПОДІЛЕНОГО  
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО РОБОТА.....55

**Скакун О.В., Воскресенський В.Б., Сивобородько А.В.**

ОГЛЯД ПОРТАТИВНИХ АНАЛІЗАТОРІВ СПЕКТРУ ТА АНАЛІЗАТОРІВ СИГНАЛІВ, ЩО МОЖУТЬ  
БУТИ ВИКОРИСТАНІ ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ ПОБІЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ....63

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

**Арпентій С.П.**

ЗАСТОСУВАННЯ ВЕКТОРНОЇ МАШИНИ ПІД ЧАС РОБОТИ З МАСИВАМИ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ.....72

**Білевська О.С.**

АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМ СЕРТИФІКАЦІЇ WPA2 ТА WPA3 МЕРЕЖІ WI-FI..... 77

|   |     |
|---|-----|
| <b>Грішин М.В., Беглов К.В.</b><br>ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИТРАТ ТЕС.....   | 82  |
| <b>Завгородній В.В.</b><br>ВІДНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ<br>У ЄДИНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРИ ЗА ПОВНОЗВ'ЯЗНОЇ ТОПОЛОГІЇ.....   | 90  |
| <b>Кандиба І.О., Фісун М.Т., Горбань Г.В., Антіпова К.О.</b><br>ГЕНЕРАЦІЯ СЦЕНАРІЇВ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ<br>КОГНІТИВНОЇ КАРТИ ТА ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ..... | 96  |
| <b>Лазебний В.М.</b><br>МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ AUTOCAD I SOLIDWORKS<br>ДЛЯ ДРУКУ НА 3D-ПРИНТЕРАХ.....  | 105 |
| <b>Лежнін К.В.</b><br>АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ<br>ПІД ЧАС МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ.....  | 111 |
| <b>Маловичко В.К., Брунеткін О.І.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ<br>В ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ ВИСОКОГО ТИСКУ.....   | 117 |
| <b>Мануїлов Я.С.</b><br>ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ «БЛОКЧЕЙН» У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ.....  | 123 |
| <b>Mulyava O.M., Sheremeta M.M.</b><br>COMPOSITION OF PROBABILITY LAWS.....   | 128 |
| <b>Петлінський І.І.</b><br>АКТУАЛЬНІСТЬ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА<br>АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З РІДКИМ ПОГЛИНАЧЕМ.....  | 135 |
| <b>Серг І.В., Беглов К.В.</b><br>МОДЕЛЬ СПАЛЮВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗМІННОГО СКЛАДУ В КОТЛІ.....   | 142 |
| <b>Степанець О.В., Багінський В.О.</b><br>САМОДІАГНОСТИКА ОБЛАДНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТУ<br>ЯК ЗАСІБ ОЦІНКИ СТАНУ ЙОГО ВУЗЛІВ.....  | 147 |
| <b>Топчій Н.В., Білевська О.С.</b><br>АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНОСТІ ІР-КАМЕР ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ.....   | 157 |
| <b>Топчій Н.В.</b><br>АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ.....   | 162 |
| <b>Чайковський С.Ю.</b><br>РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ<br>ВИПРОБУВАНЬ ЯК АКТУАЛЬНИЙ НАПРЯМ ДОСЛІДЖЕНЬ.....   | 168 |
| <b>Шаманіна Т.В., Павленко В.Д.</b><br>ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОКУЛОМОТОРНОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ<br>НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ВОЛЬТЕРРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АЙТРЕКІНГУ.....                          | 174 |
| <b>Яворський О.В.</b><br>ДОСЛІДЖЕННЯ СИНТЕЗУ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАГРІВАЧА<br>ІЗ СОНЯЧНИМ КОЛЕКТОРОМ.....  | 187 |
| <b>ЕНЕРГЕТИКА</b>   |     |
| <b>Ленчевський Є.А., Тесленко О.І.</b><br>ПЕРСПЕКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МАНЕВРЕНИХ<br>ПОТУЖНОСТЕЙ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ.....                                   | 194 |
| <b>Лю Ян, Швець Н.О., Середа В.В.</b><br>РЕЖИМИ ТЕЧІЇ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБКАХ КОМПАКТНИХ<br>ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ.....  | 203 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>Огородник С.С., Новаківський Є.В., Швець М.Ю., Гуйда О.Г., Мінаєва Ю.Ю.</b><br>ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА<br>В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД РОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛООВОГО НАСОСУ.....                | 210 |
| <b>Семичаєвський С.В., Якіменко М.Л., Осадчук М.В.</b><br>ЩОДО АВАРІЙНОГО РОЗЛИВУ ГОРЮЧИХ РІДИН.....  | 219 |
| <b>Сінчук О.М., Бойко С.М., Жуков О.А., Риков Г.Ю., Іванченко Л.В.</b><br>КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ДЖЕРЕЛАМИ<br>РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ..... | 226 |
| <b>Черноусенко О.Ю., Бутовський Л.С., Грановська О.О., Мороз О.С., Старченко О.С.</b><br>ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФУЗІЙНО-СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА<br>ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В ЗАБАЛАСТОВАНОМУ ОКИСНЮВАЧІ.....      | 231 |
| <b>Чернюк А.М., Кирисов І.Г., Черевик Ю.О.</b><br>АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ<br>В УКРАЇНІ.....   | 239 |

## **РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН**

|  |     |
|--|-----|
| <b>Азарян В.А.</b><br>КОМПОНУВАЛЬНИЙ ПРИНЦИП ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ<br>МОБІЛЬНИХ ДРОБИЛЬНО-СОРТУВАЛЬНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ..... | 247 |
|--|-----|

## **ТРАНСПОРТ**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Тірон-Воробйова Н.Б., Данилян А.Г.</b><br>МІЖНАРОДНА МОРСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ ЯК СТРАТЕГІЧНА СТАЛА МІСІЯ<br>У ВІДРОДЖЕННІ ОКЕАНІВ.....                    | 253 |
| <b>Хабутдінов Р.А., Федоренко І.О.</b><br>АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОБУСА<br>ДЛЯ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ..... | 259 |

## **БУДІВНИЦТВО**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Лучковський І.Я., Єсакова С.В., Чепурний Д.О.</b><br>РОЗВИТОК ТИСКУ НА ПІДПІРНІ СТІНИ, ЩО УТРИМУЮТЬ УКОС<br>ІЗ ДВОШАРОВОЮ ЗАСИПКОЮ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ НА ПОВЕРХНІ.....   | 267 |
| <b>Скоробагатько Т.М., Слуцька О.М., Боровиков В.О., Пруський А.В., Стилик І.Г.</b><br>РЕАЛІЗАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ<br>ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ОНОВЛЕННЯМ ВІДПОВІДНОЇ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ..... | 274 |

## **ГЕОДЕЗІЯ**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Wen Mingming, Liu Chang, Song Shuli, Mamonov K.A., Rybina O.I.</b><br>DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL DIRECTION TO ENSURE THE ENVIRONMENTAL USE<br>OF LAND IN THE FORMATION SYSTEM OF MODELS AND INSTRUMENTS IMPLEMENTED<br>IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF UKRAINE..... | 282 |
|---|-----|

## **ЕЛЕКТРОНІКА**

|   |     |
|---|-----|
| <b>Павленко О.А.</b><br>МЕТОДИ Й ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОЛІТІВ, СПОСОБИ ЇХ КОРИГУВАННЯ.....                                       | 287 |
| <b>Рощенко О.М.</b><br>ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ<br>ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЬНОЇ СИСТЕМИ..... | 293 |

|                                   |     |
|-----------------------------------|-----|
| <b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b> | 299 |
|-----------------------------------|-----|

# CONTENTS

## MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

**Morochko V.V.**

IMPROVING THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF GRINDING CYLINDRICAL SURFACES WITH AN ORIENTED CIRCUIT FILLED WITH DIFFERENT FEEDS AT WORK.....1

## INDUSTRIAL ENGINEERING

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

PROSPECTIVE THROWING AND MIXING TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE TURBULA TYPE MACHINE.....6

**Topchii N.V., Bilevska O.S.**

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF JOINT DESIGN IN THE MANUFACTURE OF PRODUCTS...12

## AIRCRAFT AND AEROSPACE TECHNIQUES

**Yanchev S.V., Tsybulska T.P.**

MATHEMATICAL MODELING OF AVIATION AC POWER SUPPLY SYSTEM IN MATLAB..... 17

## SHIPBUILDING

**Terlych S.V., Tatarchenko O.B.**

SHIP'S EVOLUTION EXTERIOR IN WORLD SHIPBUILDING.....24

## EQUIPMENT

**Alkhovyk O.V.**

MODERN METHODS AND MEANS TO CONTROL MICROGEOMETRIC PARAMETERS OF SURFACES OF PARTS AND DEVICES.....30

**Ovcharuk V.T.**

INTRODUCTION OF MODERN LABELING TECHNOLOGIES TO INCREASE THE MANUFACTURABILITY EXPERIMENTAL PRODUCTION.....36

**Shornikova S.V.**

OPTICAL SYSTEM MEASURING OF DISTANCES BETWEEN OBJECTS: PRINCIPLES OF REALIZATION.....42

## RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Ikhsanov Sh.M, Diakonov O.S.**

8-APSK SIGNAL CONSTELLATION OPTIMIZATION OF THE DVB-S2X STANDARD..... 49

**Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Guida O.G., Sushyn I.O.**

THEORETICAL BASES OF DESIGNING MOTION CONTROL OF DISTRIBUTED INFORMATION AND TELECOMMUNICATION ROBOT.....55

**Skakun O.V., Voskresenskiy V.B., Sivoborodko A.V.**

REVIEW OF PORTABLE SIGNAL ANALYZERS THAT CAN BE USED TO DETECT SPURIOUS ELECTROMAGNETIC RADIATION.....63

## INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Arpentii S.P.**

APPLICATION OF VECTOR MACHINE FOR GRAPHIC DATA ARRAYS ANALYSIS.....72

**Bilevska O.S.**

ANALYSIS OF PROTECTION OF CERTIFICATION PROGRAMS WPA2 AND WPA3 WI-FI NETWORK.....77

|  |     |
|--|-----|
| <b>Grishyn M.V., Beglov K.V.</b><br>EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF FUEL ENRICHMENT TO REDUCE THE RISK<br>OF POWER PLANT COSTS.....  | 82  |
| <b>Zavgorodnii V.V.</b><br>RESTORING PARAMETERS OF INFORMATION OBJECTS IN A UNIFIED INFORMATION SPACE<br>AT FULLY CONNECTED TOPOLOGY.....  | 90  |
| <b>Kandyba I.O., Fisun M.T., Horban H.V., Antipova K.O.</b><br>GENERATION OF SCENARIOS FOR THE INTRODUCTORY CAMPAIGN OF A HIGHER EDUCATION<br>INSTITUTION BASED ON A COGNITIVE MAP AND A DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE..... | 96  |
| <b>Lazebnyi V.M.</b><br>DESIGN OF MECHANICAL DETAILS WITH AUTOCAD AND SOLIDWORKS FOR 3D PRINTING.....  | 105 |
| <b>Lezhnin K.V.</b><br>ANALYSIS OF INFLUENCE OF ULTRASOUND AT FRAGILE MATERIALS TOOLING.....   | 111 |
| <b>Malovichko V.K., Brunetkin O.I.</b><br>INVESTIGATION OF AUTOMATIC WATER LEVEL REGULATION SYSTEM<br>IN THE GROUP OF HIGH PRESSURE HEATERS.....   | 117 |
| <b>Manuilov Ya.S.</b><br>USE OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN TELECOMMUNICATIONS.....   | 123 |
| <b>Mulyava O.M., Sheremeta M.M.</b><br>COMPOSITION OF PROBABILITY LAWS.....  | 128 |
| <b>Petlinskyi I.I.</b><br>RELEVANCE OF THE AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM<br>OF THE POWER PLANT OF A NUCLEAR POWER PLANT WITH A LIQUID ABSORBER.....   | 135 |
| <b>Sert I.V., Beglov K.V.</b><br>MODEL OF COMBUSTION OF NATURAL GAS COMPOSITION OF NATURAL GAS IN A BOILER.....  | 142 |
| <b>Stepanets O.V., Baginskyi V.O.</b><br>SELF-DIAGNOSIS OF INDIVIDUAL HEATING POINT EQUIPMENT AS A MEANS OF OPTIMIZATION<br>OF CONDITION ASSESSMENT AND EQUIPMENT MAINTENANCE.....                                     | 147 |
| <b>Topchii N.V., Bilevska O.S.</b><br>ANALYSIS OF THE SECURITY OF IP SURVEILLANCE CAMERAS.....   | 157 |
| <b>Topchii N.V.</b><br>ANALYTICAL REVIEW OF MODERN OPTICAL SYSTEMS: ADVANTAGES AND DEFECTS.....  | 162 |
| <b>Tchaikovskiy S.Yu.</b><br>TESTS LEVEL QUALITY METHODS AS A CURRENT DIRECTION OF RESEARCH.....   | 168 |
| <b>Shamanina T.V., Pavlenko V.D.</b><br>TOOLS OF IDENTIFICATION OF THE HUMAN OCULO-MOTOR SYSTEM BASED<br>ON THE VOLTERRA MODEL USING EYE-TRACKING TECHNOLOGY.....  | 174 |
| <b>Yavorskyi O.V.</b><br>STUDY OF THE SYNTHESIS OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE HEATER<br>WITH A SOLAR COLLECTOR.....   | 187 |
| <b>POWER ENGINEERING</b>   |     |
| <b>Lenchevskiy Ye.A., Teslenko O.I.</b><br>THE PERSPECTIVE POSSIBILITY TO INCREASE THE OVERALL POTENTIAL<br>OF MANEUVERING CAPACITY OF THE INTEGRATED POWER SYSTEM OF UKRAINE.....                                     | 194 |
| <b>Liu Yang, Shvets N.O., Sereda V.V.</b><br>TWO-PHASE FLOW REGIMES IN HORIZONTAL TUBES OF COMPACT HEAT EXCHANGERS.....  | 203 |
| <b>Ohorodnyk S.S., Novakivskyy Ye.V., Shvets M.Yu., Guida O.G., Minaieva Yu.Yu.</b><br>IMPROVING EFFICIENCY SOLAR COLLECTORS IN THE WINTER SEASON<br>WITH THE USE OF HEAT PUMPS.....                                   | 210 |
| <b>Semichaevskiy S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V.</b><br>REGARDING EMERGENCY SPILLAGE OF FLAMMABLE LIQUIDS.....   | 219 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>Sinchuk O.M., Boiko S.M., Zhukov O.A., Rukov G.Yu., Ivanchenko L.V.</b><br>COMPREHENSIVE USE OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH SOURCES OF DISTRIBUTED<br>GENERATION IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES..... | 226 |
| <b>Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.</b><br>CHARACTERISTICS OF THE DIFFUSION-STABILIZER BURNER WHEN COMBUSTION<br>OF GAS AT REDUCED OXYGEN CONTENT IN OXIDIZER..... | 231 |
| <b>Chernyuk A.M., Kirisov I.G., Cherevik Yu.O.</b><br>ANALYSIS OF PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION<br>OF ELECTRICITY GENERATION IN UKRAINE.....   | 239 |

## RESOURCE DEVELOPMENT

|  |     |
|--|-----|
| <b>Azarian V.A.</b><br>COMPOSING PRINCIPLE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION<br>OF MOBILE CRUSHING AND SORTING RADIOMETRIC COMPLEXES..... | 247 |
|--|-----|

## TRANSPORT

|   |     |
|---|-----|
| <b>Tiron-Vorobiova N.B., Danylyan A.H.</b><br>INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION AS A STRATEGIC SUSTAINABLE MISSION<br>IN OCEAN REVIVAL.....                     | 253 |
| <b>Khabutdinov R.A., Fedorenko I.O.</b><br>ANALYSIS OF THE IMPACT OF TRANSPORT ENERGY EFFICIENCY INDICATORS<br>OF THE BUS FOR URBAN PASSENGER TRANSPORTATION..... | 259 |

## CONSTRUCTION

|   |     |
|---|-----|
| <b>Luchkovsky I.Ya., Chepurnyi D.O., Yesakova S.V.</b><br>DEVELOPMENT OF PRESSURE ON RETAINING WALLS THAT KEEPS THE SLOPE<br>WITH DOUBLE-LAYER FILLING AND SURFACE LOADS.....   | 267 |
| <b>Skorobahatko T.M., Slutska O.M., Borovykov V.O., Pruskyi A.V., Stylyk I.H.</b><br>IMPLEMENTATION OF THE IMPROVED QUALITY ASSESSMENT SYSTEM FOR FOAM<br>CONCENTRATES FOR FIRE-FIGHTING BY UPDATING APPROPRIATE REGULATORY BASE..... | 274 |

## GEODESY

|   |     |
|---|-----|
| <b>Wen Mingming, Liu Chang, Song Shuli, Mamonov K.A., Rybina O.I.</b><br>DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL DIRECTION TO ENSURE THE ENVIRONMENTAL USE<br>OF LAND IN THE FORMATION SYSTEM OF MODELS AND INSTRUMENTS IMPLEMENTED<br>IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF UKRAINE..... | 282 |
|---|-----|

## ELECTRONICS

|  |     |
|--|-----|
| <b>Pavlenko O.A.</b><br>METHODS AND MEANS OF ELECTROLYTE ANALYSIS, METHODS OF THEIR ADJUSTMENT.....                      | 287 |
| <b>Roschenko O.M.</b><br>IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF THE ELECTRONIC DEVICE THROUGH THE USE<br>OF A MODULAR SYSTEM..... | 293 |

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| <b>INFORMATION ABOUT AUTHORS.....</b> | 299 |
|---------------------------------------|-----|



# ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

УДК 621.923.42

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/01>**Морочко В.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

## ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ТА ПРОДУКТИВНОСТІ ШЛІФУВАННЯ ЦИЛІНДРИЧНИХ ПОВЕРХОНЬ ОРІЄНТОВАНИМ КРУГОМ, ЗАПРАВЛЕНИМ ІЗ РІЗНИМИ ПОДАЧАМИ НА РОБОЧІЙ І КАЛІБРУЮЧІЙ ДІЛЯНКАХ

Проведено дослідження процесу формоутворення циліндричних поверхонь деталей під час їх шліфування периферією орієнтованого круга. Розроблені просторові моделі зняття припуску та формоутворення, досліджено розподіл припуску вздовж різальної ділянки інструмента під час шліфування орієнтованим інструментом. Показано, що на периферійній різальній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування.

Оскільки під час шліфування зі схрещеними осями припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистої, чистої та калібрувальної ділянок шліфувального круга, нерівномірно від найбільшого на чорновій до практично нульового на калібрувальній ділянці, то відповідно і розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною. У роботі пропонується забезпечувати різну розвиненість периферійної поверхні круга за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента: більшої на чорновій ділянці і меншої на чистовій і калібрувальній. Так, на чорновій ділянці круга при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки, запобігаючи їй прилипання і виникненню вібрацій, що підвищить точність обробки. Чистова та калібрувальна ділянки периферії, на які припадають невеликі значення припуску, будуть забезпечувати нижчу геометричну шорсткість поверхні валів.

Упровадження запропонованого способу правки кругів при однопрохідному шліфуванні зі схрещеними осями інструменту і циліндричної деталі забезпечить більш високі точність та якість оброблених поверхонь, а також значно підвищить ефективність та продуктивність процесу обробки. Розроблений спосіб правки може бути застосований для процесів круглого шліфування зі схрещеними осями оброблюваної деталі та абразивних кругів.

**Ключові слова:** кругле шліфування, шліфування зі схрещеними осями, правка круга з різними подачами, знімаєми припуск, продуктивність шліфування, розвиненість поверхні круга.

**Постановка проблеми.** Значна частина продукції підприємств машинобудівного комплексу належить до групи тіл обертання – вали, осі, пальці, втулки, до яких висуваються високі вимоги по точності розмірів, форми, шорсткості поверхонь. Однією з головних тенденцій сучасного машинобудування в умовах ринкової економіки є забезпечення високих показників точності та якості оброблених поверхонь при високій продуктивності обробки. Ефективним способом фінішної обробки зовнішніх поверхонь обертання є шліфування зі схрещеними осями інструменту і дедалі. Дослідження, удосконалення наявних та впровадження нових способів обробки шліфуванням сприятиме підвищенню рівня конкурентоспроможності вітчизняних підприємств.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час шліфування циліндричних поверхонь деталей з паралельними осями деталі та інструмента задіяна не вся висота шліфувального круга, а лише частина, яка дорівнює подачі деталі на оберт круга, тому відбувається нерівномірний знос інструмента та погіршення якості і точності поверхневого шару деталі. Формоутворююча ділянки круга немає стабільного положення. Висота зношеної ділянки інструмента в кожній точці його робочої поверхні залежить від подачі та висоти припуску [1]. У вказаному способі знижується продуктивність обробки внаслідок задіяності в процесі шліфування не всієї висоти круга, а лише її невеликих частин при невідомому розташуванні формоутворюючої ділянки.

У [2] запропоновано спосіб круглого шліфування з поздовжньою подачею орієнтованим кругом зі схрещеними осями інструмента та деталі. Фіксація формоутворюючої ділянки круга здійснюється за рахунок повороту круга на кут відносно осі обертання деталі і є чітко визначеною. Вона розташована на осі поворота круга. Але в процесі зйому припуску кут його повороту залежить від величини припуску.

Німецькою фірмою Junker розроблено новий спосіб обробки циліндричних і торцевих поверхонь, при якому кути осі круга і деталі схрещуються під невеликим кутом [3; 4]. Використання торцевої ділянки інструменту дозволяє значно збільшити розміри п'ятна контакту інструмента із заготовкою. Число обертів заготовки вибирається в ряді випадків більшим числа обертів шліфувального круга. Досягається подача на оберт близько 0,01, а швидкість шліфування до 160 м/с.

У роботі 5 запропоновано новий принцип шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання на верстатах з ЧПК, коли вісь повороту абразивного інструменту, перпендикулярну до осі їх обертання, поєднують з нормаллю в опорній точці оброблюваної поверхні і круг повертають на кут, при якому чорнове шліфування здійснюється його торцем, напівчистове – перехідною радіусною кромкою, чистове шліфування та калібрування – широкою розвантаженою ділянкою периферії, що забезпечує підвищення продуктивності обробки в 1,5 – 3 рази в порівнянні з традиційними способами круглого шліфування, точності (ІТ 6-7) та отримання параметру шорсткості  $Ra = 0,32-0,16$  мкм. При цьому поворот осі круга відносно горизонтальної осі оброблюваної деталі забезпечує фіксацію формоутворюючої точки інструменту та можливість її програмування на верстатах з ЧПК.

У роботі [6] було проведено дослідження динамічних характеристик верстату ВЗ 208 Ф4 під час шліфування периферією орієнтованого круга в режимі самозаточування. Отримані показники статичної податливості, максимальної резонансної амплітуди, коефіцієнта динамічності, резонансної частоти, параметру який характеризує вібростійкість системи.

**Постановка завдання.** Метою даної роботи є дослідження способу фінішного шліфування циліндричних поверхонь деталей зі схрещеними вісями інструменту і деталі для виявлення додаткових резервів, які б дали можливість підвищити точність формоутворення та продуктивність обробки. Для цього необхідно дослідити розви-

неність робочої поверхні круга після правки та запропонувати спосіб правки абразивних кругів, який би забезпечував різну розвиненість робочої поверхні інструмента у відповідності до особливостей процесу обробки.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Під час механічної обробки матеріалів розрізняють продуктивності зняття припуску і формоутворення. За положенням у межах контакту говорять про питому і середню продуктивність, за тривалістю дії розрізняють миттєву і середню. Відома залежність для визначення продуктивності підведення припуску в зону обробки:

$$Q = \iint_S V_n \cdot dS,$$

де  $V_n$  – проекція швидкості відносного руху на напрям вектору одиничної нормалі  $\vec{n}$  до поверхні інструмента,  $S$  – розміри поверхні контакту між заготовкою та абразивним інструментом, які визначають рішенням векторних рівнянь поверхонь,  $dS$  – елемент площі в її межах.

Отже, продуктивність зростає зі збільшенням швидкості різання, що задається окружною швидкістю круга та площі контакту. Скалярний добуток виражає інтенсивність підведення металу до різних ділянок у межах контакту. Зняття припуску із заготовки відбувається при позитивному значенні скалярного добутку  $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i > 0$ , а формоутворення поверхні деталі при умові  $\vec{V}_i \cdot \vec{n}_i = 0$ .

Під час шліфування валів 1 (рис.1) абразивний круг 2 подається на всю глибину різання  $t$  і переміщується вздовж осі  $O_p Z_p$  системи координат деталі з подачею  $s_p$ . При цьому його повертають навколо осі  $O_w Y_w$ , розташованої на відстані  $C$  від торця інструмента. Величина кута орієнтації інструмента  $\alpha$  залежить від висоти припуску, а торцева частина інструменту не бере участі в обробці. Схрещення осей інструмента та деталі забезпечує роботу всієї периферійної ділянки круга, а зміщення осі  $O_w Y_w$  – наявність калібрувальної ділянки довжиною  $C$ , що формує вихідну точність обробки циліндричного вала [7].

При постійній подачі  $s_p$  круга на оберт деталі величина припуску  $t$  поступово зменшується від початкової точки  $i_1$  на профілі круга до точки повороту  $A$ : в точці  $i_1$  величина припуску максимальна  $t$ , в точці  $i_2-t_1$ , в точці  $i_k-t_2$ . При цьому формоутворююча точка  $A$  є початком калібрувальної ділянки периферії інструмента, де припуск практично дорівнює нулю.

Розробимо математичні моделі поверхні інструменту, оброблюваної деталі та процесу формоутворення під час шліфування зі схрещеними

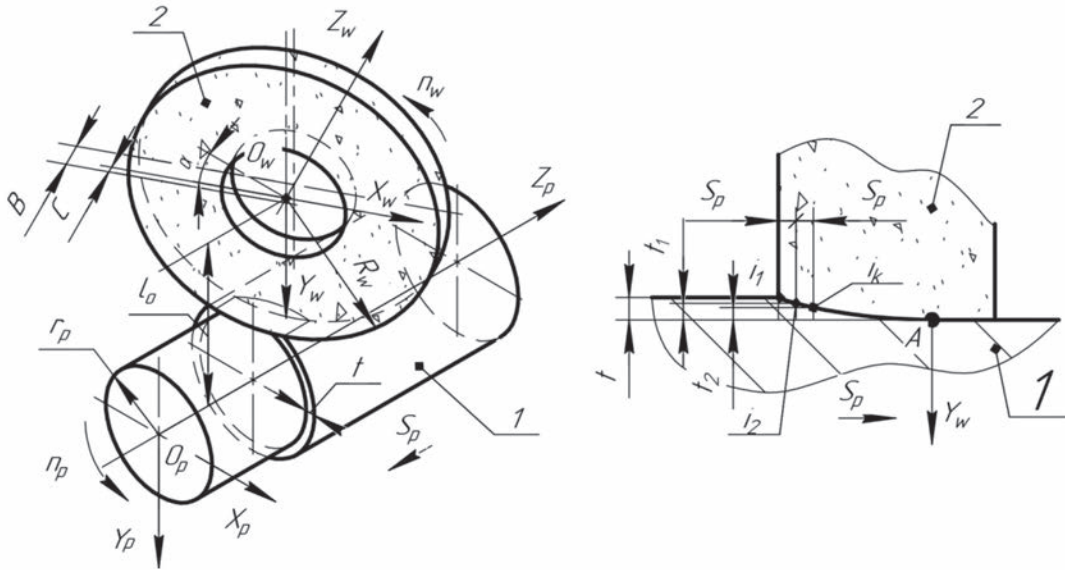


Рис. 1. Шліфування циліндричного вала периферією орієнтованого інструмента

осями інструмента та деталі з використанням пакету програмного забезпечення MatchCAD.

Радіус вектор поверхні інструмента  $\overline{GW}(z, \varphi)$  описується циліндричним модулем формоутворення:

$$\begin{aligned} \overline{GW}(z, \varphi) &= MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}4 = \\ &= M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}4, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $MC_{z, \varphi, R_w}^w$  – циліндричний модуль формоутворення поверхні інструмента, представлений матрицею переходу радіус-вектору початкової точки  $\bar{e}4$  в систему координат інструмента;  $M1...M6$  – матриці переміщень та поворотів відносно координатних осей;  $R_w=700$  мм – радіус шліфувального круга;  $z=0...B$  – лінійна координата на периферії круга, змінюється від 0 до висоти інструмента  $B=60$  мм;  $\varphi=0...360^\circ$  – кутова координата профілю шліфувального круга.

Циліндрична поверхня валу  $\bar{P}$  задається радіус-вектором поверхні інструменту, матрицею переходу та модулем орієнтації шліфувального круга в системі координат деталі:

$$\begin{aligned} \bar{P} &= M^r \cdot MC_\gamma^{or} \cdot \overline{GW} = \\ &= M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C) \cdot \overline{GW}, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $M^r = M1(-l_o)$  – матриця переходу із системи координат круга в систему координат деталі;  $l_o = R_w + r_p$  – відстань між осями вала та інструмента;  $MC_\gamma^{or} = M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C)$  – циліндричний модуль орієнтації інструмента;  $\gamma$  – кут повороту шліфувального круга;  $C$  – довжина калібрувальної ділянки круга.

Номинальний профіль обробленої поверхні циліндричного вала описується циліндричним модулем формоутворення  $C_{\gamma_p}^{sh}$ :

$$MC_{\gamma_p}^{sh} = M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p), \quad (3)$$

де  $\gamma_p$  – поточний кут повороту деталі навколо власної осі;  $p_z = \frac{s_p}{2 \cdot \pi}$  – крок гвинтової лінії;  $s_p$  – осьова подача деталі.

Остаточно номінальна поверхня деталі з урахуванням рівнянь (1)-(3) описується формулою:

$$\begin{aligned} \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma) &= MC_{\gamma_p}^{sh} \cdot M^r \cdot MC_\gamma^{or} \cdot MC_{z, \varphi, R_w}^w \cdot \bar{e}4 = \\ &= M3(\gamma_p \cdot p_z) \cdot M6(\gamma_p) \cdot \times \\ &\times M1(-l_o) \cdot M6(-\gamma) \cdot M3(-B+C) \times \\ &\times M3(z) \cdot M6(\varphi) \cdot M2(R_w) \cdot \bar{e}4. \end{aligned} \quad (4)$$

Профіль оброблюваної поверхні вала визначається за умови взаємодії інструментальної поверхні по лінії контакту з деталлю:

$$\bar{v} \cdot \bar{n} = \left( \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma_p} = 0, \quad (5)$$

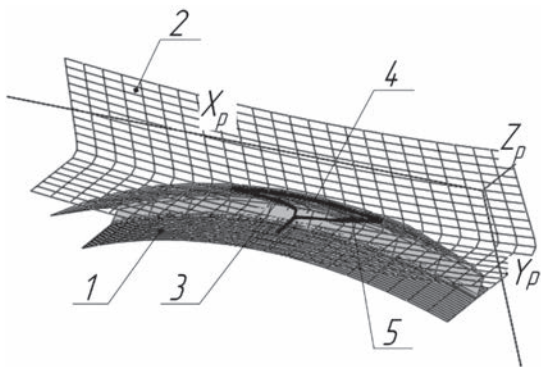
де  $\bar{n}$  – одиничний вектор нормалі до поверхні круга, що знаходиться як диференціал радіус-вектору  $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)$  за двома незалежними параметрами  $z$  та  $\gamma$ ;  $\bar{v}$  – вектор швидкості відносного руху круга в системі координат валика (диференціал радіус-вектору  $\bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)$  за параметром  $\gamma_p$ , який моделює кут повороту оброблюваної поверхні за одиницю часу).

Знайти лінію контакту оброблюваного вала та інструменту можна за допомогою такого розрахункового блоку:

$$\begin{aligned}
 & \gamma \leftarrow 0, \\
 & \text{for } j \in 0..N_i \\
 & \quad z \leftarrow z_{\min} + \frac{z_{\max}}{N_i} \cdot j, \\
 & \quad \gamma \leftarrow \text{root} \left( \left( \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial z} \times \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma} \right) \cdot \frac{\partial \bar{P}(z, \gamma_p, \gamma)}{\partial \gamma_p}, \gamma \right), \\
 & \quad M^{(j+1)} \leftarrow \begin{pmatrix} z \\ \gamma \end{pmatrix}, \\
 & \quad M^T.
 \end{aligned} \quad (6)$$

де  $N_i$  – кількість точок на периферії інструмента;  $z_{\min}=0$ ,  $z_{\max}=B$  – відповідно, найменша та найбільша координати точок на профілі круга;  $\gamma$  – кутова координата точки контакту на поверхні інструмента;  $M$  – матриця координат точок лінії контакту.

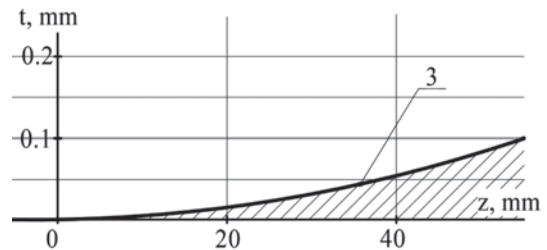
За результатами розрахунків отримані геометричні тривимірні моделі поверхонь валка 1 (рис. 2), інструмента 2 та площі їх контакту, обмежені лініями: 3 – контакту, 4 – перетину інструмента і торця заготовки; 5 – перетину зовнішнього циліндра заготовки і шліфувального круга. Як видно із рис. 2, у процесі зняття припуску задіяна вся периферія шліфувального круга 2. Схрещення осей інструмента та деталі забезпечує розвантаження чистової і калібрувальної ділянок круга, на які припадають найменші значення припуску. А отже, їх знос мінімальний, що практично не впливає на точність формоутворення деталі.



**Рис. 2.** Пляма контакту під час шліфування валу 1 орієнтованим кругом 2, обмежена лініями: 3 – лінія контакту; 4 – лінія перетину інструмента і торця заготовки; 5 – лінія перетину зовнішнього циліндру заготовки і шліфувального круга

Отриманий графік проекції лінії контакту 3 на площину (рис. 3) демонструє, що припуск  $t$  вздовж периферії круга рівномірно зменшується від чорнової ( $50 < z < 20$ ) до чистової та калібрувальної ділянок ( $20 < z < 0$ ). Від координати  $z$  (рис. 3), що

відповідає висоті  $B$  шліфувального круга, до координати  $z=0$  (початок калібрувальної ділянки) припуск (заштрихована ділянка під лінією контакту 3) поступово зменшується і на калібрувальній ділянці практично дорівнює нулю.



**Рис. 3.** Розподіл припуску  $t$  вздовж лінії контакту 3 шліфувального круга та деталі під час шліфування орієнтованим інструментом:  $z$  – висота шліфувального круга

Оскільки під час шліфування зі схрещеними осями припуск розподіляється вздовж чорнової, напівчистової, чистової та калібрувальної ділянок шліфувального круга, то і розвиненість робочої поверхні інструмента на вказаних ділянках повинна бути різною. У роботі пропонується забезпечувати різну розвиненість периферійної поверхні круга за рахунок різної величини подачі правлячого інструмента: більшої на чорновій ділянці і меншої на чистовій і калібрувальній. Так, на чорновій ділянці круга при правці знімається основний припуск, більші канавки забезпечують більший простір для відведення стружки, запобігаючи їй прилипанню і виникненню вібрацій, що підвищить точність обробки. Чистова та калібрувальна ділянки периферії, на які припадають невеликі значення припуску, будуть забезпечувати нижчу геометричну шорсткість поверхні валків.

Приведений спосіб правки також збільшує період між правками (45 хв) за рахунок наявності канавок різної конфігурації на чорновій та чистовій ділянках шліфувального круга у поєднанні з особливостями процесу обробки орієнтованим інструментом. Продуктивність обробки під час шліфування зі схрещеними осями абразивного круга, периферійна ділянка якого заправлена даним способом, та валка зростає на 10% за рахунок можливості використання підвищених режимів обробки.

Оскільки для обробки орієнтованим кругом здійснюється різна правка на його чорновій, чистовій та калібрувальній ділянках, даний спосіб накладає обмеження на довжину вказаних ділянок. Тому приведений спосіб правки не може бути застосований при правці вузьких кругів, а також алмазних та ельборових. Тривимірна

модель правки шліфувального круга дає можливість отримати тільки його геометричний профіль із урахуванням впливу профілю алмазного олівця, глибини різання та подачі. Однак отримана модель профіля круга не враховує вплив жорсткості системи та вібрацій.

У подальшому модель правки може бути застосована для способів шліфування орієнтованим інструментом не лише циліндричних, а й ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз сучасних методів шліфування поверхонь деталей на предмет

виявлення резервів підвищення продуктивності та покращення якості обробки та запропоновано спосіб шліфування циліндричних поверхонь деталей периферією орієнтованого інструмента, за якого на периферійній різальній ділянці шліфувального круга суміщаються чорнова, чистова обробки та калібрування з рівномірним зменшення припуску до чистової та калібрувальної ділянок вздовж різальної поверхні інструмента. Запропонований спосіб правки периферійної ділянки абразивного круга із різною подачею правлячого інструмента відповідно до особливостей процесу шліфування.

#### Список літератури:

1. Кальченко В.І., Кальченко В.В., Єрошенко А.М., Сіра Н.М. Дослідження способу шліфування валків стрічкопрокатних станів зі схрещеними осями інструмента та деталі. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2016. № 4. С. 80–87.
2. Кальченко В.И. Способ круглого шлифования с продольной подачей. А.с. 1234163 СССР, МКИ В24В 5/04. Авт. Изобр. № 3813415/25-08. Заявлено 20.11.84. Опубл. 30.05.86. Бюл № 20. 4 с.
3. Chang He Li, Ling Yun Qi, Hua Yang Zhao. Application and Development of High-Efficiency Abrasive Finishing. *Advanced Materials Research*. 2011. P. 189–193.
4. Yali Hou, Changhe Li, Yan Zhou. Applications of High-Efficiency Abrasive Process with CBN Grinding Wheel. *Engineering*. 2010. № 2(3). P. 184–189.
5. Сіра Н.М. Підвищення ефективності шліфування циліндричних, ступінчастих та криволінійних поверхонь обертання зі схрещеними осями круга та деталі. Дисертація на здобуття ступеня кандидата технічних наук. Чернігівський національний технологічний університет. Чернігів, 2017. 176 с.
6. Кальченко В.В., Венжега В.І., Сіра Н.М., Морочко В.В. Дослідження динамічних характеристик процесу шліфування циліндричних поверхонь периферією орієнтованого круга в режимі затуплення на верстаті В3208Ф4. *Технічні науки та технології. Науковий журнал*. 2020. № 4(22). С. 9–18.
7. Modeling of Tool Surface Dressing with Two-Sided Grinding of the Parts Ends / Vitaliy Kalchenko, Volodymyr Kalchenko, Natalia Sira, Vladimir Venzhega, Dmytro Kalchenko / Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes. Inter Partner 2020: Advanced Manufacturing Processes II pp. 513–523.

#### **Morochko V.V. IMPROVING THE ACCURACY AND PRODUCTIVITY OF GRINDING CYLINDRICAL SURFACES WITH AN ORIENTED CIRCUIT FILLED WITH DIFFERENT FEEDS AT WORK**

*A study of the process of forming cylindrical surfaces of parts during their grinding by the periphery of the oriented circle. Spatial models of allowance removal and shaping have been developed, the distribution of allowance along the cutting section of the tool during grinding with an oriented tool has been investigated. It is shown that on the peripheral cutting section of the grinding wheel roughing, finishing and calibration are combined.*

*Since when grinding with crossed axes, the allowance is distributed along the rough, semi-finished, finishing and calibration sections of the grinding wheel, unevenly from the largest on the rough to almost zero on the calibration section, then the development of the tool surface in these areas should be different. In the work it is offered to provide various development of a peripheral surface of a circle due to various size of giving of the operating tool: bigger on a rough site and smaller on finishing and calibration. Thus, on the rough section of the circle during editing, the main allowance is removed, larger grooves provide more space for chip removal, preventing it from sticking and vibration, which will increase the accuracy of processing. The finishing and calibration sections of the periphery, which have small allowance values, will provide a lower geometric surface roughness of the rolls.*

*The introduction of the proposed method of straightening wheels in single-pass grinding with crossed axes of the tool and the cylindrical part will provide higher accuracy and quality of machined surfaces, as well as significantly increase the efficiency and productivity of the machining process. The developed method of straightening can be applied to the processes of circular grinding with crossed axes of the workpiece and abrasive wheels.*

**Key words:** circular grinding, grinding with crossed axes, editing of a circle with different feeds, removable allowance, grinding productivity, development of a circle surface.

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.924.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/02>

**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

**Панасюк І.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Малишев В.В.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

### ПЕРСПЕКТИВНІ ГАЛТУВАЛЬНІ ТА ЗМІШУВАЛЬНІ ТЕХНОЛОГІЧНІ ПРОЦЕСИ В МАШИНІ ТИПУ TURBULA

*Під час виконання галтувальних технологічних процесів, а також процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин використовують обладнання з ємкостями, які мають різний характер руху. Сьогодні здебільшого відоме використання вібраційних машин, машин з обертальним рухом робочих ємкостей, а також машин роторного та шпindelного типів. Однак такі типи обладнання створюють низьку інтенсивність переміщення сипкого робочого середовища всередині ємкостей, що призводить до зниження продуктивності виконання відповідних технологічних операцій та водночас до збільшення енергозатрат. Машини з обертальним рухом робочих ємкостей вважаються застарілим типом обладнання, тривалість виконання галтувальної технологічної операції може досягати 48 годин безперервної роботи такої машини. Доведено, що для технологічних операцій змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а також для галтувальних технологічних операцій більш раціонально використовувати машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula. Установлено, що під час завантаження двох фракцій сипких дрібнодисперсних речовин до робочої ємкості, яка виконує складний просторовий рух, слід використовувати поперечну модель завантаження. Час, що витрачається на галтувальні технологічні операції полірування поверхні полімерних деталей, можна скоротити майже у два рази, а час, що витрачається на відділення металевих деталей від ливників, – у понад десять разів. Установлено взаємозв'язок між зміною режимів руху сипкого робочого середовища всередині ємкостей, які виконують складний просторовий рух, та інтенсивністю виконання відповідних технологічних операцій. Доведено, що для реалізації відділення металевих деталей від ливників та процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин слід забезпечити водоспадний режим руху сипкого робочого середовища, для реалізації процесів полірування поверхні полімерних деталей – змішаний режим руху.*

**Ключові слова:** змішування, галтувальні технологічні процеси, сипкі дрібнодисперсні речовини.

**Постановка проблеми.** Для реалізації галтувальних технологічних процесів, а також процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин використовують обладнання з рухомими ємкостями, що мають різний характер руху. До таких типів обладнання відносяться машини з обертальними ємкостями, вібраційними ємкостями, роторні та шпindelні машини, машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей тощо.

Вібраційні, а також машини з обертальним ємкостями є застарілим типом обладнання, інтенсивність руху технологічного середовища у ємкостях досить низька, щоб забезпечити високу

продуктивність виготовлення деталей чи швидке змішування сипких дрібнодисперсних речовин.

Попередніми дослідженнями [1, с. 172] доведено, що найбільшій продуктивності під час виконання відповідних технологічних операцій можна досягнути за використання машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей, зокрема це може бути обладнання з конструкцією типу Turbula, яка була розроблена у 1966 р. швейцарською фірмою Willy A. Bachofen (WAB) [2]. У подальшому будемо називати цю конструкцію «базова». Авторами були розроблені різноманітні модифікації базової конструкції типу Turbula,

що мають відмінні конструктивні особливості та різне технологічне призначення.

Відомі різні підходи до дослідження процесів змішування та обробки деталей у машині типу Turbula. Однак, незважаючи на проведені дослідження, дотепер відсутні загальні уніфіковані підходи та рекомендації щодо впливу режимів обробки, а також конструктивних особливостей машини на інтенсивність та продуктивність під час виконання вищезгаданих технологічних операцій. У науковій літературі досить обмежена кількість робіт із даної тематики, і це потребує уніфікації з подальшим узагальненням та систематизацією різних літературних джерел.

**Постановка завдання.** Мета даної роботи – уніфікація з подальшим узагальненням та систематизацією попередніх результатів наукових досліджень щодо перспективних галузевих та змішувальних технологічних процесів у машинах зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Базова конструкція машини типу Turbula зі складним просторовим рухом робочої ємкості являє собою просторовий шестиланковий механізм з обертальними кінематичними парами. Кінематичну схему просторового механізму базової конструкції механізму машини та її модель, створену за допомогою САПР SolidWorks, представлено на рис. 1 а та б відповідно.

Машина містить станину (1), ведучий (2) та ведений (6) вали, встановлені в станині паралельно в одній площині та з'єднані між собою подвійним просторовим шарніром, що виконаний у вигляді ведучого шатуна (3), веденого шатуна (5) та проміжного шатуна (4), закріпленого між веду-

чим (3) та веденим (5) шатуном на діаметрально взаємно перпендикулярних геометричних осях (7) та (8) відповідно. Рухомі ланки машини утворюють собою просторовий механізм з обертальними кінематичними парами А, В, С, D, E, F.

**Технологічні процеси змішування сипких дрібнодисперсних речовин у ємкості, що виконує складний просторовий рух.** Процеси змішування сипких дрібнодисперсних речовин широко застосовуються у різних галузях промисловості: хімічній, фармацевтичній, легкій тощо.

Відомо [3, с. 120–145], що для оцінювання якості змішування двох фракцій дрібнодисперсних речовин застосовують індекс сегрегації  $S$ , який може бути в діапазоні  $0 \leq S \leq 2$ . Для випадкових сумішей його значення приймають рівним одиниці:  $S = 1$ . По обидві боки від значення  $S = 1$  будуть нестійкі стани сегрегації. За  $S = 0$  – це ідеально змішана система,  $S = 1$  відповідає відокремленим фракціям двох сипких речовин.

У роботі [4, с. 220–225] на основі визначення коефіцієнту дисперсії експериментально досліджувалися дві можливі моделі завантаження сипких дрібнодисперсних речовин до циліндричної робочої ємкості – осьову та поперечну (рис. 2) за різних кутових швидкостей ведучого валу машини (2,4 рад/с, 4,8 рад/с та 7,2 рад/с).

Після аналізу результатів експериментального дослідження, які виконані у роботі [5, с. 19–21], було встановлено, що найменша ефективність змішування за обох моделей завантаження буде за кутової швидкості ведучого валу в 4,8 рад/с. У цілому інтенсивність змішування змінювалася нелінійно залежно від кутової швидкості ведучого валу. Кількість обертів ведучого валу, яка необхідна для досягнення повного змішування,

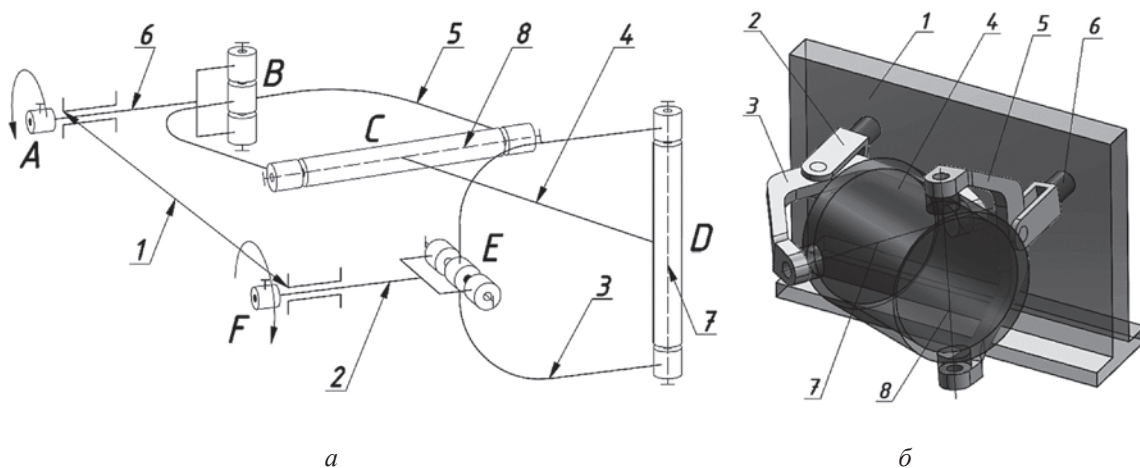


Рис. 1. «Базова» конструкція машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу Turbula: а – кінематична схема, б – модель машини

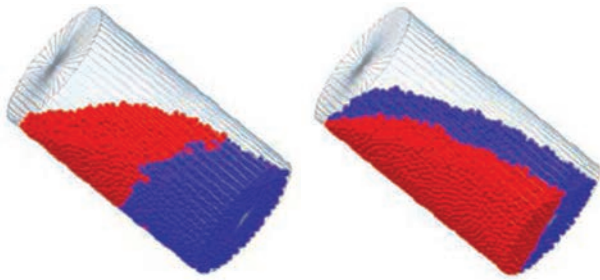


Рис. 2. Моделі завантаження сипких дрібнодисперсних речовин до циліндричної робочої ємкості: а – осьова, б – поперечна

спочатку збільшувалася зі збільшенням кутової швидкості, а потім зменшувалася. Також було доведено, що раціональною моделлю завантаження декількох фракцій сипких речовин до робочої ємкості є поперечна. У разі використання осьової моделі завантаження технологічний процес змішування відбувається менш інтенсивно майже у два рази.

У роботі [6, с. 250] було встановлено оптимальний рівень заповнення робочої ємкості сипким середовищем, що забезпечує найбільш інтенсивне виконання як процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, так і інших галтувальних технологічних процесів. Такий оптимальний рівень заповнення варіюється в межах 50–70% від загального об'єму ємкості. Даний рівень заповнення, з одного боку, достатній для забезпечення відносно руху сипкого середовища всередині ємкості, а з іншого – дає змогу досягнути значної продуктивності виконання відповідної технологічної операції.

У роботі [7, с. 544–545] було доведено ефективність використання базової конструкції машини зі складним просторовим рухом робочої ємкості типу Turbula порівняно з іншими типами обладнання. Результати експериментальних досліджень показали, що для досягнення задовільного індексу сегрегації двох фракцій сипких дрібнодисперсних речовин достатньо лише 20–30 обертів ведучого валу даної машини, що за частоти обертання ведучого валу у 2,4 рад/с можна досягнути за менш ніж дві хвилини роботи машини. Із використанням будь-якого іншого типу машин із рухомими

ємкостями, що використовуються для змішування сипких речовин, неможливо було досягнути подібного результату.

*Галтувальні технологічні процеси поліпшення якості поверхні полімерних виробів у ємкості, що виконує складний просторовий рух.* До таких галтувальних технологічних процесів слід відносити шліфування та полірування поверхні виробів. Уперше були проведені експериментальні дослідження [8, с. 25–30] щодо полірування поверхні поліефірних заготовок із використанням базової конструкції галтувальної машини типу Turbula. Зокрема, визначали вплив режимів руху робочого середовища всередині ємкості на інтенсивність та якість обробки поліефірних деталей під час реалізації водоспадного, каскадного та змішаного режимів руху робочого середовища за заповнення ємкості на 40% від її загального об'єму. Окрім самих оброблених деталей, робоча ємкість була заповнена абразивним матеріалом у вигляді керамічних трьохгранних призм та пемзою дрібнозернистості у необхідному співвідношенні [9, с. 30–31], увесь уміст заливався водою без особливих характеристик нижче насипного об'єму ємкості.

Для кожного режиму руху загальний час обробки становив 42 години. Якість обробки деталей оцінювали на основі визначення шорсткості їхньої поверхні. Машина зупинялася сім разів, зразки деталей виймалися на 6-й, 9-й, 14-й, 21-й, 24-й, 32-й та 42-й годинах обробки, так було отримано сім зразків деталей для кожного режиму руху. Шорсткість поверхні даних зразків, а також двох необроблених заготовок та двох контрольних зразків визначалася за двома параметрами: середнім арифметичним відхиленням профілю  $R_a$  та найбільшою висотою нерівностей профілю  $R_{max}$ . Кожен вимір параметру шорсткості на одному гудзику був продубльований сім разів. Фото необробленої заготовки, а також деталей, що пройшли відповідний час обробки, представлено на рис. 3. Графік залежності зміни шорсткості поверхні  $R_a$  полімерних деталей від часу обробки представлений на рис. 4, а графік залежності зміни шорсткості поверхні  $R_{max}$  полімерних деталей від часу обробки – на рис. 5.



Рис. 3. Фото необробленої заготовки, а також деталей, що пройшли відповідний час обробки



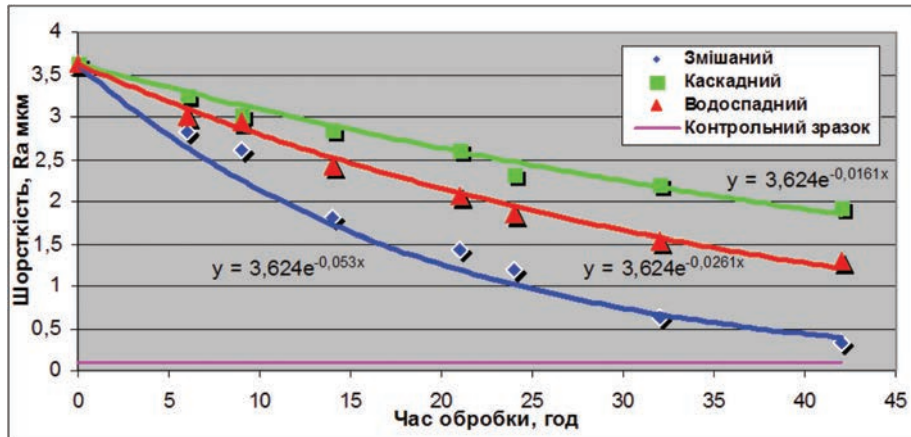


Рис. 4. Графік залежності зміни шорсткості поверхні  $R_a$  полімерних деталей від часу обробки

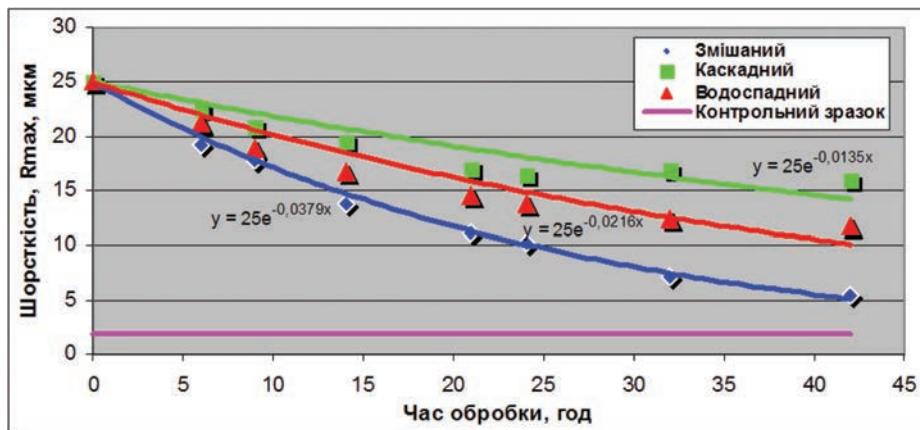


Рис. 5. Графік залежності зміни шорсткості поверхні  $R_{max}$  полімерних деталей від часу обробки

Проаналізувавши графіки залежності, що представлені на рис. 4 та рис. 5, встановлено, що найбільша інтенсивність полірування деталей відбувається під час реалізації змішаного режиму руху, менш інтенсивно обробка відбувалася за водоспадного режиму руху та найменша – за каскадного. Також було встановлено [10, с. 14–15], що обробка деталей у базовій конструкції машини типу Turbula потребуватиме у півтора-два рази менше технологічного часу, ніж під час виконання аналогічної технологічної операції з використанням машин з обертальним рухом робочої ємкості.

Для ще більшої інтенсивності виконання технологічної операції шліфування чи полірування полімерних деталей рекомендовано застосовувати робочі ємкості [11, с. 3–4], які мають циклоїдальний профіль стінок.

**Галузеві технологічні процеси відділення металевих деталей від ливників.** У роботах [12, с. 121; 13, с. 28–33] також уперше були

проведені аналітичні та експериментальні дослідження технологічного процесу відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Установлено [13, с. 30–34], що дана технологічна операція відбувається нерівномірно. На початку обробки спостерігається незначний приріст кількості відділених деталей від ливників. Значна інтенсифікація процесу реалізується, коли кількість відділених деталей від ливників в робочому масиві становить 20–80%. Після збільшення кількості відділених деталей у робочому масиві більше ніж 80% знову спостерігається зниження інтенсивності виконання технологічної операції.

Низька інтенсивність відділення деталей від ливників на початку технологічної операції пов'язана з тим, що вільний об'єм ємкості у цей час є найменшим, відливки вдаряться по стінках ємкості з меншою інтенсивністю. Низька інтенсивність відділення деталей від ливників у кінці технологічної операції відбувається за рахунок зміни співвідношення

між обробленими деталями (відділеними від ливників) та необробленими деталями, зокрема необроблених деталей по відношенню до всього робочого масиву стає дедалі менше. Відповідно, зі зменшенням кількості необроблених деталей, зменшується ймовірність їх зіткнення зі стінками ємкості за кожного оберту ведучого валу машини.

Досліджено [14, с. 150–220] вплив режимів руху робочого масиву на інтенсивність відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників. Експериментально встановлено, що найінтенсивніше відділення деталей від ливників відбувається під час реалізації водоспадного режиму руху робочого масиву. У цілому підтверджено, що для виконання технологічних операцій відділення металевих деталей замка «блискавка» від ливників, обладнання, в якому робоча ємкість виконує складний просторовий рух типу Turbula, є значно ефективнішим за обладнання з обертovими ємкостями, при цьому можна досягнути збільшення продуктивності у понад 10 разів.

Для ще більшої інтенсивності виконання технологічної операції відділення деталей від ливників слід використовувати робочі ємкості [15, с. 3–5], які виконані у формі шестигранних чи восьмигранних призм.

**Висновки.** Систематизовано літературні дані щодо перспективних галтувальних та змішувальних технологічних процесів у машинах зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula.

Доведено, що машини зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula можна успішно використовувати не лише для процесів змішування сипких дрібнодисперсних речовин, а й для інших галтувальних технологічних процесів.

Установлено, що з використанням машин зі складним просторовим рухом робочих ємкостей типу Turbula можна досягти значного збільшення продуктивності під час виконання галтувальних технологічних операцій обробки металевих та полімерних деталей.

#### Список літератури:

1. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Машини зі складним рухом робочих ємкостей для обробки полімерних деталей : монографія. Київ : Університет «Україна», 2018. 228 с.
2. Willy A. Bachofen (WAB): сайт Willy A. Bachofen AG, Maschinenfabrik. 2020. URL: <https://www.wab-group.com/en/> (дата відвідування: 31.01.2021).
3. Marigo M. Discrete Element Method Modelling of Complex Granular Motion in Mixing Vessels: Evaluation and Validation: dissertation EngD. The University of Birmingham, UK., 2012. P. 311.
4. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Cook M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part A: Measurement and Reconstruction of TurbulaMixer Motion using Positron Emission Particle Tracking, *CMES: Computer Modeling in Engineering & Sciences*. 2010. Vol. 59. № 3. P. 217–238.
5. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. Developing Mechanistic Understanding of Granular Behaviour in Complex Moving Geometry using the Discrete Element Method. Part B: Investigation of Flow and Mixing in the Turbula® mixer. *Powder Technology*. 2011. Vol 212. P. 17–24.
6. Mayer-Laigle C., Gatumel C., Berthiaux H. Mixing dynamics for easy flowing powders in a lab scale Turbula mixer. *Chemical Engineering Research and Design*. 2015. Vol. 95. March. P. 248–261.
7. Marigo M., Cairns D.L., Davies M., Ingram A., Stitt E.H. A numerical comparison of mixing efficiencies of solids in a cylindrical vessel subject to a range of motions. *Powder Technology, Powder Technology*. 2012. № 217. P. 540–547.
8. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Klapstov Y.V., Malyshev V.V. Experimental investigation of the handling process of polymeric units in a machine with a compacted space movement of working capacity. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. № 2. P. 24–32.
9. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Перспективні технології обробки деталей та змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 1: способи технологічних операцій). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2020. № 2. Т. 31(70). С. 29–35.
10. Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Smirnov Y.I., Kuznetsova O.O., Malyshev V.V. Analytical determination of the time of handling process of polymeric details in a machine with a complex movement of working container. *Bulletin of the Kyiv National University of Technologies and Design*. 2019. Vol. 3(134). P. 9–17.
11. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Патент №92545, МПК В01F 11/00. Машина для обробки деталей / заявник та патентовласник – Київський національний університет технологій та дизайну № u201401842; заяв. 25.02.2014, опуб. 26.08.2014, бюл. № 16.
12. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. Обработка изделий из пластмасс. Москва : Химия, 1988. 176 с.

13. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В. Експериментальне дослідження впливу режимів руху робочого масиву та об'єму заповнення ємкості на інтенсивність відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2020. № 1(142). С. 27–38.

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

15. Панасюк І.В., Залюбовський М.Г. Патент № 108645, МПК В01F 11/00, В24В 31/00. Машина для обробки деталей / заявник та патентовласник – Київський національний університет технологій та дизайну ; № u201600830; заяв. 02.02.2016, опуб. 25.07.2016, бюл. № 14.

#### **Zalyubovskiy M.G., Panasyuk I.V., Malyshev V.V. PROSPECTIVE THROWING AND MIXING TECHNOLOGICAL PROCESSES IN THE TURBULA TYPE MACHINE**

*When performing tumbling technological processes, as well as mixing processes of loose finely dispersed substances, equipment with containers is used, which have a different nature of movement. Today, in the overwhelming majority of cases, it is known to use vibration machines, machines with rotary motion of working containers, as well as machines of the rotary and spindle type. However, these types of equipment create a low intensity of movement of a free-flowing working medium in the middle of the tanks, which leads to a decrease in the productivity of performing the corresponding technological operations and, at the same time, to an increase in energy consumption. Machines with rotary motion of working containers are considered an outdated type of equipment; the duration of the tumbling technological operations can reach 48 hours of continuous operation of such a machine. It is proved that for technological operations of mixing loose finely dispersed substances, as well as for tumbling technological operations, it is more rational to use machines with a complex spatial movement of working containers such as "Turbula". It was determined that when loading two fractions of free-flowing fine-dispersed substances into a working vessel that performs complex spatial motion, a transverse loading model should be used. The time spent on tumbling technological operations for polishing the surface of polymer parts can be reduced by almost half, and the time spent on separating metal parts from the sprues - more than ten times. The relationship between the change in the modes of movement of a granular working medium inside the containers, which perform complex spatial movement and the intensity of the corresponding technological operations, has been determined. It is proved that to implement the separation of metal parts from the sprues and mixing processes of loose finely dispersed substances, it is necessary to provide a waterfall mode of movement of a granular working medium, to implement the processes of polishing the surface of polymer parts – a mixed mode of movement.*

**Key words:** *mixing, casting technological processes, free-flowing fine substances.*

**Топчій Н.В.**

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

**Білевська О.С.**

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

## АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ СУМІСНОГО ПРОЕКТУВАННЯ ПІД ЧАС ВИГОТОВЛЕННЯ ВИРОБІВ

*Під час розроблення сучасної техніки та незалежно від галузі її застосування висувається все більше вимог до продукції, що випускається. Сучасні підприємства не зможуть існувати в умовах ринкової економіки, якщо не випускатимуть нові продукти кращої якості, нижчої вартості і за менший час. З огляду на це, використання електроніки в традиційних механічних пристроях швидко зростає. Усі електронні компоненти повинні бути фізично з'єднані між собою і пов'язані із загальною структурою виробу. Датчики встановлюються майже в усі види обладнання для об'єднання пристроїв у єдину систему. Сигнали від цих датчиків передаються дротами на вбудовані блоки, приводи й антени. Окремі дроти об'єднуються в джгути.*

*Як результат того, що електроніка і програмне забезпечення починають керувати механічними вузлами конструкції, збільшується складність електромеханічних систем. Найкращі з наявних процесів проектування за короткий час застарівають і стають неефективними, а конструкторам усе важче встигати за швидкозмінними вимогами ринку. Сьогодні вже не можна просто передати готовий проект на виготовлення досвідченому зразку, щоб перевірити, чи працює виріб так, як планувалося. Інженерам доводиться виходити за межі їх сфери спеціалізації. Так, наприклад, інженери-механіки досить часто мають справу з електроустаткуванням, а інженери-електрики – із механічними приладами.*

*За відсутності злагодженості робочих процесів інженери-електрики розробляють комплект схем електричних, специфікацій і креслень. Потім інженери-механіки повинні вивчити документацію і з'ясувати, які ланцюги вимагають трасування механічними вузлами. Ці роботи виконуються вручну, тому зростає ризик виникнення помилок. Проектування електричної частини рідко вдається завершити з першого разу. Найчастіше це циклічний процес за участі інженерів-електриків та інженерів-механіків, при цьому на кожному циклі фахівцеві доводиться заново вивчати внесені зміни.*

*Як наслідок, помилки проектування передаються на такі етапи, через що доводиться виконувати безліч циклів виготовлення та проведення випробувань дослідних зразків.*

*У сучасних умовах розрізнені відділи підприємства не можуть працювати ефективно. Електричну і механічну частини проекту необхідно об'єднувати.*

**Ключові слова:** продукція, життєвий цикл продукції, виріб, модель виробу, САПР.

**Постановка проблеми.** З огляду на відсутність скоординованого процесу проектування, об'єднання систем виробу виконується на кінцевому етапі виготовлення дослідних зразків, тобто вже під час завершення життєвого циклу розробки продукції. При цьому помилки, допущені на таких пізніх етапах, можуть бути досить дорогими. Якщо їх не вдається виявити до виготовлення і проведення випробувань дослідних зразків, то існує ризик виникнення істотних витрат (як фінансових, так і часових). Крім того, такі помилки здатні сильно затримати вихід нового виробу на ринок.

Таким чином, традиційний поділ процесів стає неефективним на тлі зростаючої складності

виробів, які перебувають на стадії проектування та розроблення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням проблемних питань координації та взаємодії процесів створення продукції займалися такі вітчизняні науковці, як О. Наумчук, О. Матвійків, С. Ткаченко, В. Хаханов та ін.

Серед закордонних досліджень варті уваги праці таких учених, як В. Муленко, Е. Дружинін, Д. Єлісеєв, П. Браун, К. Каспрзак та ін.

Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам сумісного проектування під час створення продукції, стрімкий розвиток сучасних САПР зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою статті є ідентифікація та аналіз дійсного стану процесів виробництва, систем автоматизованої розробки робочих креслень та геометричного моделювання. Для розуміння виконання процесу необхідно визначити різні завдання та операції, які вирішуються в процесі розроблення та виробництва продукції.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Перш ніж перейти до розгляду проблем сумісного проектування, слід визначити основні поняття у сфері розроблення та проектування, а також різні завдання й операції, які вирішуються у процесі розробки і виробництва продукції.

**Продукція** – матеріальний результат трудової діяльності або виробничих процесів, що має корисні властивості і призначений для використання споживачем [1].

**Життєвий цикл продукції** – сукупність взаємопов'язаних процесів послідовної зміни стану продукції від початку дослідження та обґрунтування розроблення до припинення експлуатації виробу, застосування (зберігання) матеріалу [1].

**Стадія життєвого циклу (продукції)** – частина життєвого циклу продукції, яка характеризується певним станом конкретної продукції, сукупністю видів передбачених робіт та їх кінцевими результатами [1].

**Виріб** – одиниця промислової продукції, кількість якої обчислюють у штуках (екземплярах) [2].

**Модель виробу** – виріб, який відтворює або імітує конкретні властивості цього виробу, виготовлений для перевірки принципу його дії і визначення характеристик [1].

Процес виробництва починається з технічних вимог і завершується постачанням готових виробів.

Якщо раніше нормативною базою для перевірки конструкторської документації слугували стандарти Єдиної системи конструкторської документації (далі – ЄСКД), у яких були чітко визначені всі правила оформлення та структурування креслень (аж до товщини ліній), то нині аналогічних стандартів зі створення і структурування 3Dмоделей не існує. Певною кількістю великих виробників продукції формуються корпоративні правила, які поширюються тільки на створення електронної документації всередині корпорації і не є обов'язковими для виконання іншими користувачами. Водночас такі правила стають актуальними для великих проектів і визначають ідеологічну побудову систем керування життєвим циклом (PLM – Product lifecycle management).

Важливим складником інформаційної структури є інформація про технічні умови, які може

використовувати технолог виробництва для виготовлення моделі виробу. Сама модель без технічних умов виконує тільки допоміжну функцію та становить геометрію деталі, відповідно до якої можна оцінити масу і габарити, а також спроектувати оснащення, підготувати програми керування для верстата з числовим програмним керуванням (далі – ЧПК). Основна проблема виробництва із застосуванням автоматизованих та роботизованих комплексів полягає в тому, що нанесення на модель допусків, посадок, шорсткості та інших необхідних даних здійснюється безпосередньо на кресленик. До технолога надходить кресленик, який виконаний відповідно до моделі виробу, тому фахівець вносить зміни в нього. Як наслідок, кресленик накопичує всі зміни, при цьому вихідна модель, як правило, не піддається змінам та не містить технологічної інформації і (залежно від накопичення змін) утрачає зв'язок із креслеником. Технологів доводиться знову і знову створювати тривимірну модель відповідно до актуальних креслеників, щоб підготувати програму для верстата з ЧПУ. Таким чином, ідеологія РМІ (Product Manufacturing Information) принципово змінює підхід до проектування, роблячи прив'язку інформації до моделі та позиціонує кресленик як допоміжний об'єкт проектування, який створюється для сторонніх постачальників і фахівців, та не має можливості працювати безпосередньо з моделлю в програмному середовищі розробки.

Під час проектування виробів головна проблема полягає в традиційному поділі проекту на електричну та механічну частини. Забезпечення спільної роботи користувачів електричних та механічних систем автоматизованого проектування (далі – САПР) досить складне завдання. Як правило, інженери-електрики й інженери-механіки користуються різними інструментами.

Основна проблема полягає в тому, що структура одного і того ж виробу для проектування електричної і механічної частин презентується в САПР по-різному. У будь-якій механічній САПР електронний блок – це специфікація у вигляді кріплення, корпусу, друкованої плати і роз'ємів. При цьому в електричній САПР той самий модуль – це функціональна або електрична схема, тобто зображення більш високого рівня, ніж просто фізична структура об'єкта. Для виконання низки функцій електрообладнання можуть задіюватися одразу кілька друкованих плат і роз'ємів, що не дозволяє однозначно пов'язати конкретну функцію з конкретним фізичним елементом виробу. Щоб забезпечити необхідну функціональність електричної

частини, потрібно задіяти значні трудовитрати. У процесі проектування інженери підбирають відповідні роз'єми, клеми, екрани, матеріали проводів тощо. Також під час розроблення електричних систем доводиться вирішувати чимало завдань із конструювання механічних вузлів, тому необхідно ретельно виконати трасування електропроводки виробом, враховуючи при цьому питання електромагнітної сумісності. Процес трасування повинен виключати фізичний перетин електропроводки з деталями, правильно розраховувати довжини проводів (на основі реальних радіусів згину) і враховувати інші чинники, як-от коректний вибір точок кріплення проводки.

Як наслідок, щоб створити електросистему, інженери-електрики і інженери-механіки виконують безліч циклів проектування. Їм необхідно обмінюватися проектними даними та працювати в режимі тісної взаємодії.

Під час проектування електричних систем використовують комбінацію з універсального редактора для побудови схем, електронних таблиць і 2D-САПР, проте при цьому виникає чимало ризиків. Елементи, які розробляються в цих системах, ніяк не пов'язані між собою. Якщо в електричну схему вносяться зміни, кресленник і специфікації не будуть відображати нові проектні рішення. Усі елементи схеми, специфікації кресленник – це тільки лінії і символи. Виконати чисельне моделювання і перевірку функціональності систем за їх допомогою абсолютно не є можливим. Якщо помилково обрано занадто малий номінальний струм запобіжника, про це не буде відомо до проведення випробувань дослідного зразка.

За відсутності автоматизації під час переходу від електротехнічного проектування до трасування електропроводки механічними вузлами інженери-механіки змушені вручну розбиратися з документацією на електричну систему, щоб з'ясувати, де і які джгути дротів потрібно прокласти. Проте з'явилися нові процеси автоматизованого проектування, які успішно впорюються із зазначеними труднощами.

Чисельне моделювання прогнозує характеристики електричної системи, що дозволяє перевіряти й оптимізувати проектне рішення, а перехресна перевірка конструкції в різних додатках посилює інтеграцію.

Проектування сучасних електромеханічних систем – непросте завдання, що становить циклічний процес із широким переліком обмежень. Підприємствам потрібні автоматизовані та інтелектуальні рішення, які забезпечують спільну роботу фахівців.

Якість електричної частини значно впливає на успіх або невдачу нового виробу, а чисельне моделювання і розрахунки є основою ефективного контролю проектних рішень на ранніх етапах. Чисельне моделювання електричних систем на початку розробки здатне виявити проблеми, які вимагають повної переробки всієї базової архітектури електричної частини.

Електрична система тісно пов'язана з механічними вузлами, тому зміни в електричній частині найчастіше вимагають унесення корегувань і в механічну. Подібні зміни (як в електриці, так і в механіці) набагато простіше і дешевше проводити на найбільш ранніх етапах створення виробу.

Упровадження нових інтелектуальних систем проектування надає розробникам повний доступ до всієї інформації про виріб. На основі такої інформації виконується чисельне моделювання – основа процесів проектування інтегрованих електромеханічних систем, за допомогою якого скорочується потреба в дослідних зразках, значно економляться час і гроші.

Комп'ютерні методи моделювання і контролю проектних рішень електричної частини є значним кроком уперед у частині перевірки цілісності конструкції. Можливості такого підходу значно ширші, ніж під час використання традиційних дослідних зразків.

Інженер-електрик розробляє специфікацію на елементи електричної системи, яку потім інтегрує в ефективне середовище тривимірного проектування. Подібна інтеграція дозволяє під час проектування електричної частини враховувати обмеження, які накладаються механічною конструкцією, вказує на наявність місць із підвищеною вологістю, температурою та іншими небезпечними факторами. З іншого боку, під час проектування механічної частини конструктор буде залишати достатньо місця для проводки, а також забезпечувати необхідні радіуси вигинів джгутів. Завдяки наявності міждисциплінарного контексту інженери-електрики й інженери-механіки швидко виявляють невідповідності між електричною та механічною частинами проекту.

Інженер-механік повинен гарантувати, що джгут з усіма необхідними проводами вдасться прокласти в наявному просторі. Проте моделювання цих проводів у механічній САПР – занадто складне і трудомістке завдання. Якщо джгут оснащений хомутами, ізолювальними втулками та усадочними трубками, то для обліку їх впливу також потрібна міждисциплінарна взаємодія фахівців. Такі об'єкти найкраще створювати в

3D-механічних САПР, а потім додавати до них дані щодо електричної частини, які отримані з електричних САПР. Такий зв'язок дозволяє автоматично проектувати джгути-дроти і точно визначати їх параметри. Після звершення спільної розробки кожен інженер отримує чітке уявлення про те, як розроблена ним частина проекту буде функціонувати в складі всього виробу загалом.

Перехресна перевірка і візуалізація забезпечують контроль проходження сигналів безпосередньо на 3D-моделі, що допомагає в підборі оптимальної траси, виключає появу електромагнітних перешкод. Якщо інженер вносить зміни у свою частину конструкції, то їх відразу бачать інші учасники розробки, що мінімізує кількість проектних помилок.

Інтелектуальні графіки, специфікації та кресленики – це різні уособлення одних і тих же елементів, роз'ємів або дротів. Будь-яка зміна в одному з них тягне автоматичне відображення цієї зміни в інших матеріалах. Інженери-електрики виконують чисельне моделювання і розрахунки, перевіряючи належне функціонування розробленої системи. Чисельне моделювання здатне виявити стан електричної системи, яке призведе до перегорання запобіжника, причому задовго до випробувань дослідного зразка.

Проектна інформація передається у вигляді списку завдань для інженера-механіка, що займається трасуванням електропроводки виробом.

**Висновки.** Електрична система тісно пов'язана з механічними вузлами. У перших системах проектування і розрахунків електричної частини довжини дротів указувалися вручну. Залежно від ускладнення електричного обладнання ручні процеси пішли в минуле, виникла тісна інтеграція етапів розробки електричної і механічної частин із єдиними міждисциплінарними моделями. Зараз для цього застосовується двосторонній інтер-

фейс – електрично-механічна САПР. Електрична САПР повідомляє про всі необхідні атрибути, включаючи точки, які з'єднуються кожним провідником. Потім механічна САПР виконує трасування дротів, кабелю або джгута в 3D і відправляє фактичні довжини назад в електричну САПР. Такий міждисциплінарний процес скорочує терміни проектування.

Сучасні системи автоматизованого проектування й інтелектуальні інструменти допомагають інженерам синхронізувати дані і спільно працювати над найважливішими міждисциплінарними питаннями проекту. Завдяки цьому вдається найкраще реалізовувати задум конструктора і з першого разу досягати успіху. Система електромеханічного проектування, Solid Edge Wiring and Harness Design забезпечує міждисциплінарну спільну роботу, позбавляючи інженерів необхідності постійно проводити наради, обговорюючи помилки, які виникли під час ручного вводу змін.

Модулі Solid Edge для проектування електричних систем орієнтовані на підприємства середнього розміру, для яких особливо важливі такі параметри, як легкість упровадження та низька загальна вартість. Широкі можливості цієї системи виходять далеко за межі традиційних функцій зі створення електромеханічних вузлів. Модулі виконують чисельне моделювання струмів і напруг, виявляють такі помилки, як короткі замикання, розраховують номінали запобіжників. У разі спільного використання САПР Solid Edge 3D-модуль Solid Edge Wiring and Harness Design забезпечує ефективну спільну роботу інженерів-електриків і інженерів-механіків.

Інтелектуальна методика проектування дозволяє оцінювати наслідки змін для електричної і механічної частин у єдиному середовищі. Завдяки цьому в інженерів залишається більше часу на їх основне завдання – створювати інноваційні технології.

#### Список літератури:

1. ДСТУ 3278—95 Система розроблення та поставлення продукції на виробництво Основні терміни та визначення.
2. ДСТУ 2391:2010 Система технологічної документації. Терміни та визначення основних понять.
3. Наумчук О.М. Основи систем автоматизованого проектування: Інтерактивний комплекс навчально-методичного забезпечення. Рівне : НУВГП, 2008. 136 с.
4. Improving Electromechanical Design Collaboration. URL: <http://solidedge.siemens.com>
5. Муленко В.В., Компьютерные технологии и автоматизированные системы в машиностроении, Москва 2015, 73 с.
6. Solid edge с синхронной технологией – революция в области САПР, 2008, Siemens Product Lifecycle Management Software, Inc URL: <http://sapr.ru>
7. Проектирование электрических схем/ URL: <http://solidedge.siemens.com>
8. Дружинин Е.А., Елисеев Д.Н., Развитие систем автоматизированного проектирования. Научно-технический журнал «Двигатель», 2006, № 3 (45), С. 56–59.

9. Браун П., Каспрзак К., Синхронная технология – революция в проектировании, САПР и графика, 2012, № 3, С. 57–59.

10. Матвійків О., Ткаченко С., Хаханов В., Інженерне проектування складних об'єктів і систем / НУ «Львівська політехніка», 2016, 261 с.

#### **Topchii N.V., Bilevska O.S. ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF JOINT DESIGN IN THE MANUFACTURE OF PRODUCTS**

*In the development of modern technology, regardless of the industry of its application, more and more requirements are put forward for the products. Modern enterprises will not be able to exist in a market economy if they do not produce new products of better quality, lower cost and in a shorter period of time. As a result, the use of electronics in traditional mechanical devices is increasing rapidly. All electronic components must be physically interconnected and linked to the overall structure of the product. Sensors are installed in almost all types of equipment to combine devices into a single system. Signals from these sensors are transmitted via wires to built-in units, nodes and antennas. Individual wires are bundled together.*

*As a result of the fact that electronics and software begin to control the mechanical components of a structure, the complexity of electromechanical systems increases. The best design processes available quickly become obsolete and ineffective, and designers are finding it increasingly difficult to keep up with rapidly evolving market demands. Today it is no longer possible to simply transfer a finished project to the manufacture of a prototype in order to check whether the product works as planned. Engineers have to go beyond their area of expertise. For example, mechanical engineers often deal with electrical equipment, while electrical engineers often deal with mechanical equipment.*

*In the absence of coordination of work processes, electrical engineers develop a set of electrical circuits, specifications and drawings. Mechanical engineers then need to review the documentation and figure out which circuits require mechanical routing. These works are performed manually, therefore, the risk of errors increases. Electrical design is rarely complete the first time. Most often, this is a cyclical process with the participation of electrical engineers and mechanical engineers, while at each cycle the specialist has to re-examine the changes made.*

*As a result, design errors are transferred to the next stages, in connection with which it is necessary to carry out many cycles of manufacturing and testing prototypes.*

*In modern conditions, different departments of the enterprise cannot work efficiently. The electrical and mechanical parts of the project must be combined.*

**Key words:** products, product life cycle, product, product model, CAD.



# АВІАЦІЙНА ТА РАКЕТНО-КОСМІЧНА ТЕХНІКА

УДК 621.311.001.57 (045)

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/04>**Єнчев С.В.**

Національний авіаційний університет

**Цибульська Т.П.**

Національний авіаційний університет

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЗМІННОГО СТРУМУ В MATLAB

Щодня десятки тисяч рейсів здійснюють перевезення людей та вантажів. Поліпшення паливної ефективності та зменшення шкідливих викидів є основною проблемою під час проєктування майбутніх літальних апаратів. Розроблення більш та повністю електрифікованих моделей літака (МЕА/АЕА) – це наступний крок на шляху до створення на порядок ефективніших повітряних суден.

Проєктування та розроблення літака – це складний процес, що може тривати роками. Після затвердження концепту настає етап вивчення та визначення технічних вимог, при цьому складні системи виокремлюються для мінімізації складності інтерфейсу між системами та більш детального розроблення. Якщо говорити про часткову електрифікацію повітряного судна, зрозуміло, що багато компонентів замінюються такими, які мають у своєму складі електропривід. При цьому розподіл між системами нечіткий, оскільки підсистеми стають більш інтегрованими та складнішими, тому необхідний більш комплексний підхід до процесу визначення. Застосування сучасних засобів моделювання та симуляції, що включають інтеграцію та потік енергії між підсистемами, в разі спрощує завдання проєктування конструкцій літальних апаратів, керування польотом та систем літаків.

У цій роботі детально описано зручний набір інструментів на базі MATLAB/Simulink для моделювання та симуляції авіаційної системи електропостачання змінного струму. Усі засоби є інтегрованими інструментами моделювання для проєктування, які фіксують потік енергії між різними підсистемами. Таким чином, можна проаналізувати різні аспекти експлуатації та конструкції літака: розмір компонентів, енергетичні витрати, втрати на рівні підсистеми, умови несправності тощо. Повний набір інструментів включає компоненти теплової, гідравлічної, електричної та механічної підсистем.

В основній частині роботи описано змодельовані електричні компоненти. Їх можна розділити на джерела живлення, перетворювачі та навантаження. Основним джерелом живлення є синхронні генератори, тоді як іншим джерелом живлення – акумулятор. Представлено висновки з роботи та окреслено напрями подальшого дослідження.

**Ключові слова:** система електропостачання, змінний струм, моделювання, синхронний генератор, регулятор напруги.

**Постановка проблеми.** Авіаційна система електропостачання – це складне поєднання компонентів змінного та постійного струму, призначених для формування надійної системи. Систему електропостачання (СЕП) можна умовно розділити на чотири основні складові частини [2]: джерело живлення, розподілення енергії, перетворення енергії та навантаження [1] (Рис. 1).

Напруга живлення надходить від генераторів та акумулятора. Генератори, своєю чергою, вбирають енергію від роботи двигунів за допомогою редуктора. Потім ця енергія розподіляється по

шинах змінного та постійного струму. Перетворення енергії відбувається за допомогою трансформаторів, інверторів та випрямлячів. Основним споживачем енергії є навантаження. Рис. 1 ілюструє потік енергії через конфігурацію електричної системи літального апарату. Генератори перетворюють механічну енергію від двигунів та подають живлення на кілька шин змінного струму, які розподіляють її на різні навантаження змінного струму та на перетворювачі потужності. Перетворювачі перетворюють енергію змінного струму на постійний і подають його на шину

постійного струму для живлення навантаження. Акумулятор також підключений до шини постійного струму і забезпечує живлення навантажень постійним струмом.

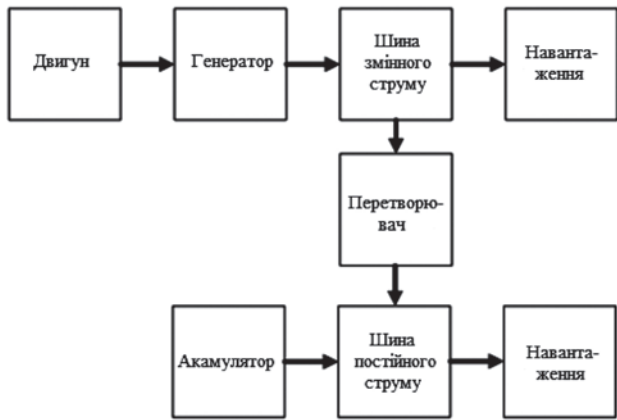


Рис. 1. Структура потоку енергій в авіаційній СЕП

Як правило, більшість операцій контролю здійснюється за допомогою логіки керування. Це схематична програма, призначена для керування системою шляхом з'єднання системних вузлів (підсистем) у формі входів та виходів. Це дослідження спрямоване на пошук оптимальної математичної моделі авіаційної системи електропостачання, принципів та методів. Для розроблення математичного зображення моделі вибрано програмне середовище MATLAB/Simulink [3].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням моделювання систем електропостачання і їх елементів присвячено численні роботи вчених: С.О. Лебедева, А.А. Горєва, В.С. Кулебакіна, А.І. Важнова, М.П. Костенко, В.А. Венікова, В.Т. Морозовського, І.М. Сіндєєва, Д.А. Аветисян, Д.М. Красношапки і багатьох інших.

**Постановка завдання.** Під час моделювання СЕП літаків слід урахувати специфічні особливості: різкі зміни напруги у разі комутацій навантажень і аварій, пов'язані із сумірною потужністю джерел і приймачів електроенергії; значна швидкість і точність регуляторів напруги (РН); великі постійні часу електромеханічних процесів порівняно з електромагнітними; необхідність урахування насичення магнітопроводів електричних машин; наявність істотних нелінійностей параметрів елементів СЕП тощо [5].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Середовище MATLAB/Simulink вибрано через його доступність та можливості, має широкую користувацьку базу – від студентів до професійних інженерів. Це дає змогу створювати графічні накладання, попередження та файли довідки для

кожної моделі компонентів, які покликані допомогти користувачеві у створенні моделі та проведенні успішного моделювання. У більшості моделей компонентів можна отримати доступ до меню властивостей, де можна вказати різні параметри компонента для масштабування компонента до потреб користувача.

MATLAB/Simulink – це середовище блок-схем, де кожен блок взаємодіє та передає змінні з іншими блоками через сигнальні лінії. Змінними зазвичай є фізичні величини, такі як напруга, температура, тиск тощо. Блоки Simulink можуть мати входи, які приймають сигнальні лінії, і виходи, які посилюють сигнальні лінії. Завдяки графічному редактору MATLAB/Simulink можна легко бачити потік змінних між блоками.

Вхід в електричну систему в цілому – це частота обертання валу від двигунів. Виходами електричної системи у цілому є крутний момент валу, що направляється назад у двигуни, і втрати потужності від різних компонентів, що надсилаються в систему контролю навколишнього середовища (ECS) або інші системи керування теплом [4]. Механічна потужність двигуна – це крутний момент валу, помножений на частоту обертання валу.

У межах електричної системи єдиними фізичними величинами, що передаються між різними моделями компонентів, є змінна напруга, змінний струм, напруга постійного струму та струм постійного струму.

**Модель авіаційного генератора.** Математична модель авіаційного генератора складається на основі рівнянь Горєва – Парка для синхронної машини по осях  $d$ ,  $q$ . Ця система диференціальних рівнянь у потокозчепленні представлена у вигляді:

$$p\Psi_d = -u_d - \frac{r}{x_s}(\Psi_d - \Psi_{ad}) - (1 + s)\Psi_q;$$

$$p\Psi_q = -u_q - \frac{r}{x_s}(\Psi_q - \Psi_{aq}) - (1 + s)\Psi_d;$$

$$p\Psi_f = \frac{1}{T_{d0}}u_f - \frac{r_f}{x_{fs}}(\Psi_f - \Psi_{ad});$$

$$p\Psi_{rd} = -\frac{r_{rd}}{x_{rds}}(\Psi_{rd} - \Psi_{ad});$$

де  $\Psi_d$  і  $\Psi_q$  – потокозчеплення відповідно по поздовжній і поперечній осях;  $\Psi_{ad}$  і  $\Psi_{aq}$  – потокозчеплення реакції якоря по поздовжній і поперечній осях;  $\Psi_f$  – потокозчеплення обмотки збудження;  $\Psi_{rd}$  і  $\Psi_{rq}$  – потокозчеплення демпферних контурів по поздовжній і поперечній осях;  $x_s$  і  $x_{fs}$  – індуктивні опори розсіювання

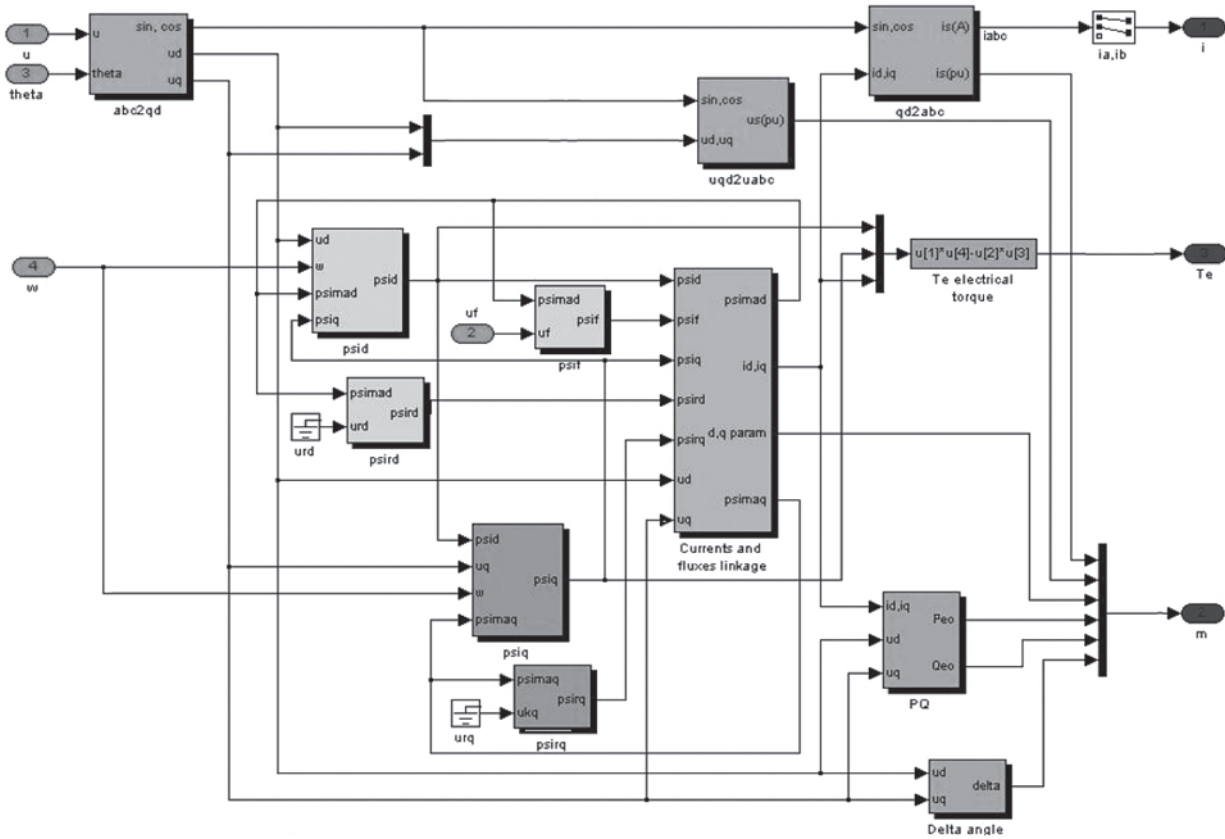


Рис. 2. Модель електричної частини генератора в Simulink

обмотки і роторного ланцюга відповідно;  $x_{rds}$  і  $x_{rqs}$  – індуктивні опори розсіювання демпферних контурів по поздовжній і поперечній осях;  $r_{rd}$  і  $r_{rq}$  – активні опори демпферних контурів по поздовжній і поперечній осях відповідно;  $r$  і  $r_f$  – активні опори статора і обмотки збудження;  $T_{d0}$  – постійна часу ланцюга збудження за розімкнутого ланцюга статора, с.

На Рис. 2 представлено створену на основі цих рівнянь модель синхронного генератора. У реальних умовах експлуатації авіаційних синхронних генераторів (СГ) через насичення сталі магнітопроводів машини значення індуктивних опорів не постійні. Тому розрахунки перехідних процесів в авіаційних СГ, що мають електромагнітні навантаження, близькі до граничних, необхідно враховувати насичення магнітопроводів [5].

У силу несиметрії магнітного ланцюга авіаційних явноплюсних СГ поперечний складник магнітного потоку проходить переважно через повітря і мало залежить від насичення сталі статора і ротора. Тому для явноплюсної машини насичення полюсів позначається на поздовжньому складнику потоку. Одним із способів обліку насичення є введення в рівняння для потокозчеплення

насичених параметрів машини  $x_{ad\text{ нас}}$ ,  $x_{d\text{ нас}}$ ,  $x_{ai\text{ нас}}$ ,  $x_{ii\text{ нас}}$ , що визначаються залежностями виду:

$$x_{\text{нас}} = \eta x,$$

де  $\eta = f(e_\delta)$  – нелінійна функція внутрішньої ЕРС машини  $e_\delta$  (Рис. 3);  $x$  – ненасичені значення параметра.

Під час створення моделі для обліку насичення по поздовжній осі для зменшення числа функціональних блоків, що реалізують нелінійності, доцільно замість залежності  $\eta(e_\delta)$ , заданих відповідно до Рис. 4, скористатися функцією:

$$\varphi(\psi_\delta) = \frac{x_{ad}}{x_{ad\text{ нас}}}.$$

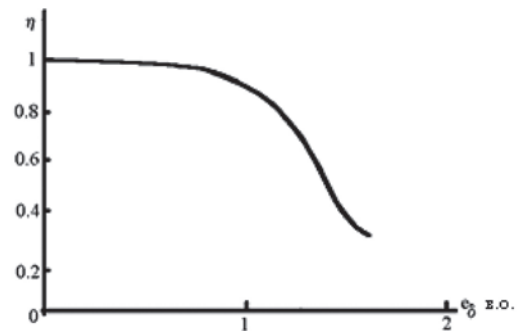


Рис. 3. Нелінійна функція внутрішньої ЕРС СГ  $e_\delta$ .

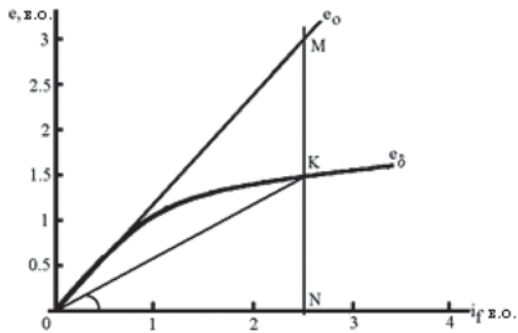


Рис. 4. Залежність ЕРС СГ від струму збудження

Дана характеристика визначена з характеристики холостого ходу генератора. Для основного генератора ГТ30НЖЧ12 ця залежність для більш точного наближення апроксимована двома поліномами 3-го порядку, графіки яких наведено на Рис. 5. Вплив насичення на величину синхронної реактивності за поперечною віссю враховується такою залежністю:

$$x_{aq\text{ нас}} = \frac{x_{aq}}{1 + \frac{3}{4} \left( \frac{x_{ad}}{x_{ad\text{ нас}}} - 1 \right) \frac{x_{aq}}{x_{ad}}}$$

де  $x_{ad}$  і  $x_{aq}$  – індуктивні опору реакції якоря відповідно по поздовжній і поперечній осях, а  $x_{ad\text{ нас}}$  і  $x_{aq\text{ нас}}$  – їх значення з урахуванням насичення.

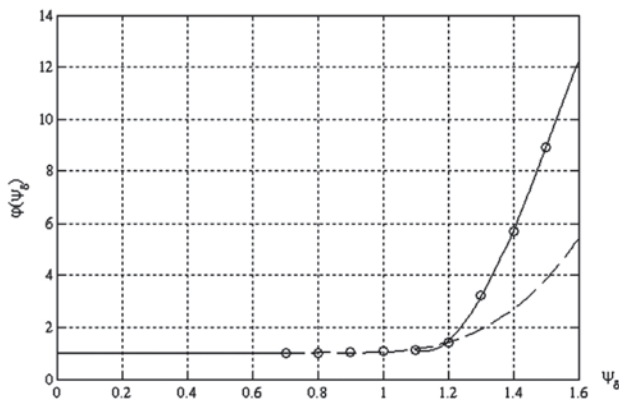


Рис. 5. Залежність  $\phi \Psi_\delta$  від величини результуючого потоку в повітряному генераторі ГТ30НЖЧ12

Взаємні потокозчеплення пов'язані з потокозчепленнями контурів такими відношеннями:

$$\Psi_{ad} = \frac{1}{\frac{1}{x_{ad}} + \frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{fs}} + \frac{1}{x_{rds}}} \left( \frac{\Psi_d}{x_s} + \frac{\Psi_f}{x_{fs}} + \frac{\Psi_{rd}}{x_{rds}} \right) = k_d \left( \frac{\Psi_d}{x_s} + \frac{\Psi_f}{x_{fs}} + \frac{\Psi_{rd}}{x_{rds}} \right),$$

$$\Psi_{aq} = \frac{1}{\frac{1}{x_{aq}} + \frac{1}{x_s} + \frac{1}{x_{rqs}}} \left( \frac{\Psi_q}{x_s} + \frac{\Psi_{rq}}{x_{rqs}} \right) = k_q \left( \frac{\Psi_q}{x_s} + \frac{\Psi_{rq}}{x_{rqs}} \right).$$

На Рис. 6 зображена створена модель. На входи 1 і 2 подаються  $\Psi_{ad}$  і  $\Psi_{aq}$  відповідно, а на виходах виходять їх насичені значення  $\Psi_{ad\text{ нас}}$  і  $\Psi_{aq\text{ нас}}$ . На Рис. 7 зображено модель генератора, що складається з трьох машин: підзбудника, збудника і генератора. Модель збудника відрізняється від основного генератора тим, що в ньому відсутня демпферна обмотка і не враховується насичення. Збудження регулюється за допомогою спрацьовування IGBT транзистора, керування якого здійснює регулятор напруги, що входить до складу генератора. Даний регулятор напруги підтримує в заданих межах середнє по трьох фазах значення напруги в симетричних режимах роботи системи генерування (Рис. 8).

Фазні напруги, що знімаються з точки регулювання, перетворюються на сигнал постійного струму, пропорційний максимальному з фазних напруг, і в сигнал, пропорційний середній напрузі трьох фаз. Ці сигнали надходять на схему виділення найбільшої напруги:

- у повнофазному режимі найбільший сигнал – напруга, середнє по трьох фазах;

- у неповнофазному режимі найбільший сигнал – напруга в одній із фаз.

Після схеми виділення найбільшої напруги сигнал інвертується. Негативне значення вхідного сигналу підсумовується з позитивним опорним сигналом. Отриманий у результаті близький до нуля сигнал похибки подається на інверсний вхід компаратора і на вхід інтегратора. На прямий вхід компаратора подається сума виходу інтегратора і сигналу з генератора «пили». У результаті на виході компаратора маємо ШІМ, керуючий транзистором.

Частота обертання синхронного генератора номінальна, ППЧО відсутній, СГ працює з регулятором напруги. Усі початкові умови нульові. У момент часу 0,3 відбувається підключення номінального статичного навантаження. У момент часу 0,4 с відбувається трифазне коротке замикання (КЗ), яке зникає через 0,2 с. Через 0,2 с (у момент часу 0,8 с) відключається статичне навантаження. На Рис. 9–11 представлено результати, отримані в процесі моделювання каналу генерування.

**Висновки.** Як видно, результати моделювання показали досить гарний результат. Отже, це дає підставу говорити про адекватність розробленої комп'ютерної моделі каналу регулювання змінного струму та дає змогу для практичного застосування під час проведення наукових досліджень і вирішення конструкторських та інженерних завдань, а також може бути застосована в навчальному процесі під час підготовки фахівців з авіаційного електрообладнання.

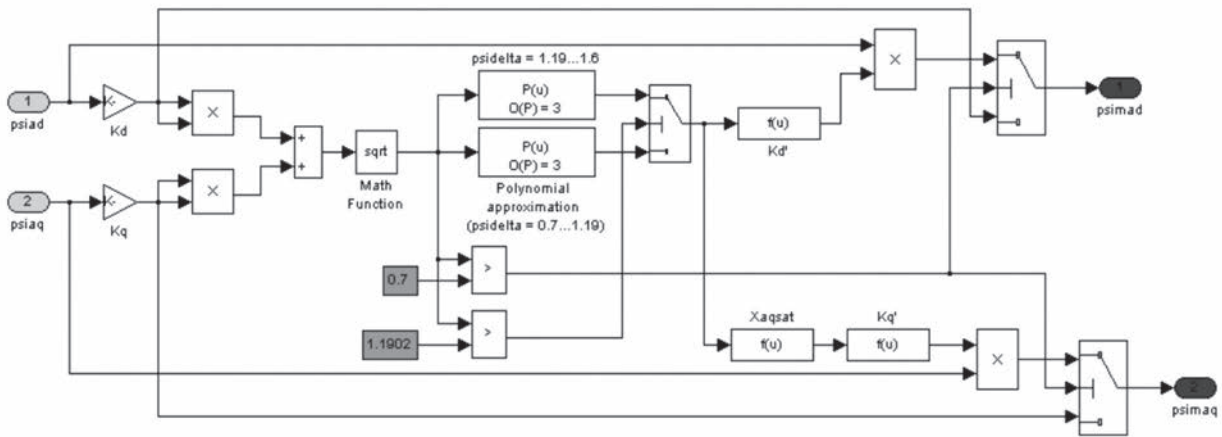


Рис. 6. Модель насичення СГ ГТ30НЖЧ12

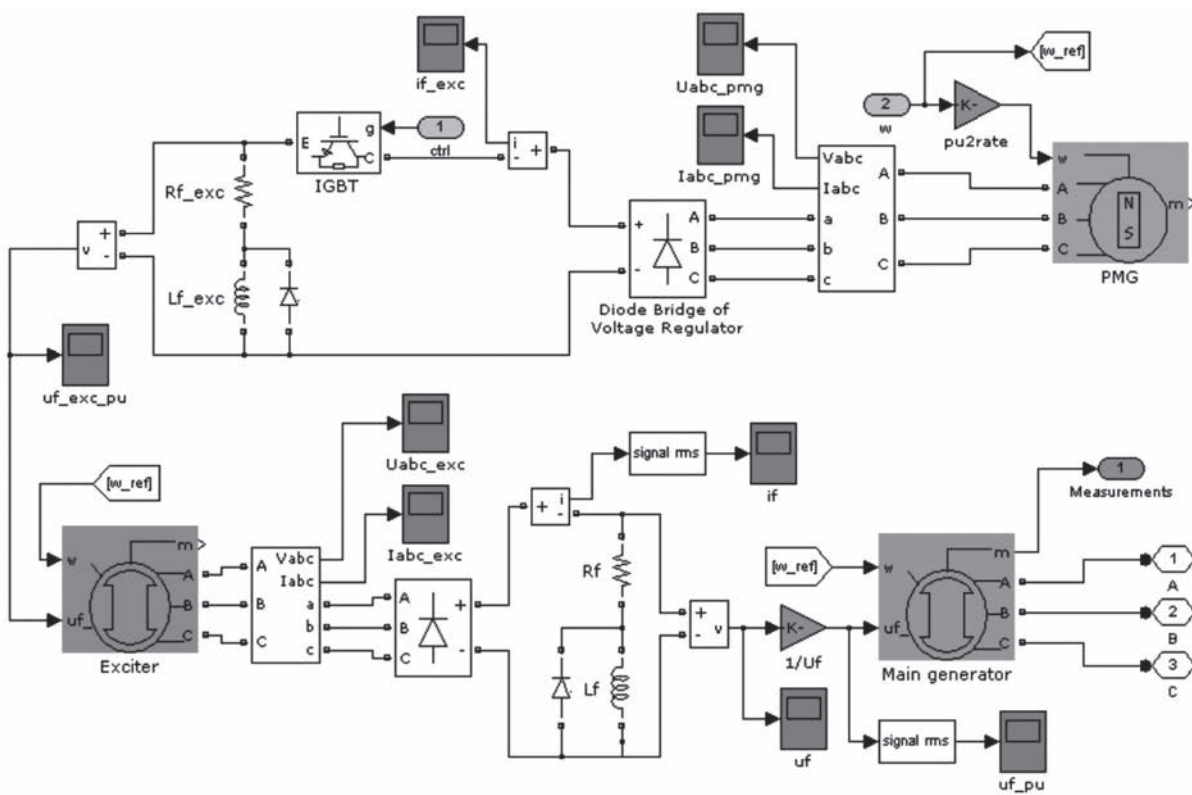


Рис. 7. Модель СГ

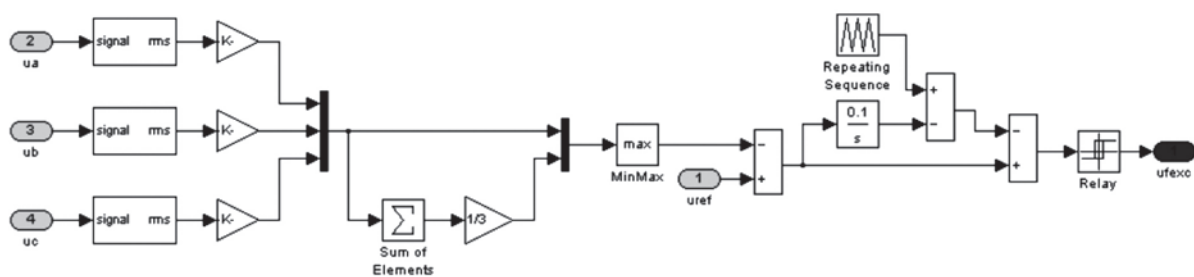


Рис. 8. Модель регулятора напруги

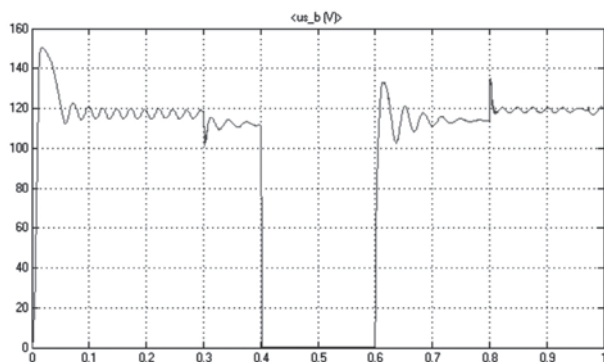


Рис. 9. Зміна діючого значення напруги фази В під час моделювання

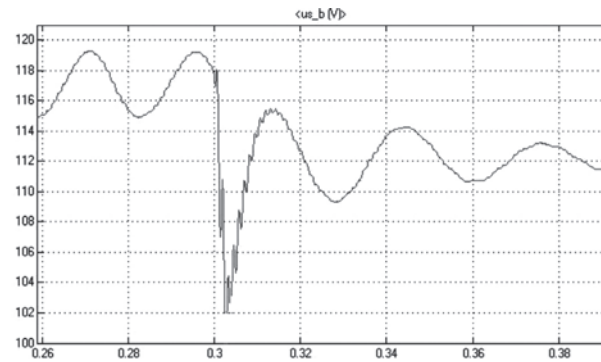


Рис. 10. Зміни діючого значення напруги фази В під час підключення номінального статичного навантаження

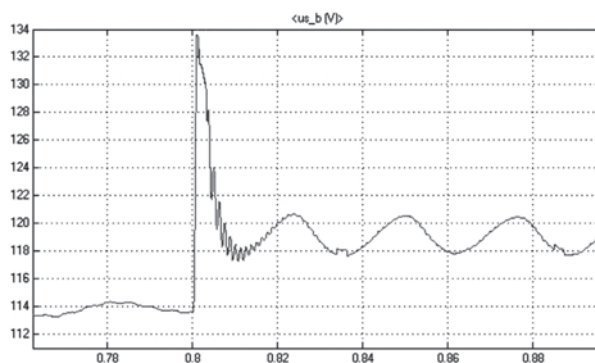


Рис. 11. Зміна діючого значення напруги фази В під час відключення номінального статичного навантаження

#### Список літератури:

1. Krus P., Systems Engineering in Aircraft System Desig, in INCOSE International Symposium. Melbourne, 2001.
2. Moir I, Seabridge A, Design and Development of Aircraft Systems. Chichester: John Wiley & Sons, 2013.
3. Williams M., S. Sridharan S., Banerjee S., Mak C., PowerFlow: A Toolbox for Modeling and Simulation of Aircraft Systems, in SAE AeroTech Congress & Exhibition. Seattle, 2015.
4. Ануфриев И.Е., Смирнов А.Б., Смирнова Е.Н. MATLAB 7. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005.
5. Захарченко В.А., Панов В.И. Оценка динамических свойств авиационных энергоузлов с применением вычислительной техники. Киев : КИИГА, 1984.

#### Yanchev S.V., Tsybulska T.P. MATHEMATICAL MODELING OF AVIATION AC POWER SUPPLY SYSTEM IN MATLAB

*Every day tens of thousands of flights carry people and goods. Improving fuel efficiency and reducing emissions is a major challenge in the design of future aircraft. The development of more and fully electrified aircraft models (MEA / AEA) is the next step towards creating much more efficient aircraft.*

*Aircraft design and development is a complex process that can take years. After approval of the concept comes the stage of studying and defining technical requirements, with complex systems are separated to minimize the complexity of the interface between systems and more detailed development. If we talk about the partial electrification of the aircraft, it is clear that many components are replaced by those that include an electric drive. At the same time, the distribution between the systems is unclear, as the subsystems become more integrated and complex, so a more comprehensive approach to the identification process is needed. The use of modern means of modeling and simulation, including integration and energy flow between subsystems, greatly simplifies the task of designing aircraft structures, flight control and aircraft systems.*

*This paper describes in detail a convenient set of tools based on MATLAB / Simulink for modeling and simulation of aviation AC power supply system. All tools are integrated modeling tools for design, which capture the flow of power between different subsystems. Thus, it is possible to analyze various aspects of the operation and design of the aircraft: the size of the components, energy costs, losses at the subsystem level,*

*fault conditions, and so on. The complete set of tools includes components of thermal, hydraulic, electric and mechanical subsystems.*

*The main part of the work describes the simulated electrical components. They can be divided into power supplies, converters and loads. The main power source is synchronous generators, while the other power source is the battery. At the end, the conclusions of the work are presented and the directions of further research are outlined.*

**Key words:** *power supply system, AC, modeling, synchronous generator, voltage regulator.*

## КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 623.8

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/05>

**Терлич С.В.**

Херсонська філія

Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Татарченко О.Б.**

Херсонський національний технічний університет

### ЕВОЛЮЦІЯ ЕКСТЕР'ЄРУ КОРАБЛЯ У СВІТОВОМУ КОРАБЛЕБУДУВАННІ

*У статті проведено короткий історичний аналіз еволюції екстер'єру бойових ударних кораблів із XVII до XX століття. З'ясовано основні критерії змінення форми корпусу, надбудов, димових труб, щогл корабля. Проаналізовано фактори технологічності форми корпусу, надбудов та конструкцій. Короткий огляд еволюції екстер'єру військового корабля показав, що у всі часи кораблебудівники намагались створити образний та гармонійний силует корабля. Сучасний корабель є складною об'ємно-просторовою структурою. Багато його розмірних співвідношень значною мірою визначені особливостями енергетичної установки та озброєння. З огляду на це, під час розроблення екстер'єру необхідно комплексно враховувати вимоги доцільності, економіки та естетики. Отже, якщо на перших етапах розвитку кораблебудування на екстер'єр кораблів більший вплив мали міфічні та естетичні чинники, то на сучасному етапі значний вплив на зовнішній вигляд флоту мають функціональні чинники, адже застосування передових технологій має вирішальне значення у сучасному кораблебудуванні. Історія еволюції екстер'єру корабля дотепер не стала предметом комплексного вивчення серед дослідників науки та техніки в Україні. Тому метою цієї статті є дослідження еволюції екстер'єру кораблів у світовому кораблебудуванні від найдавніших часів до наших днів. Авторами здійснено історичний, науково-технічний і експлуатаційний аналіз розвитку архітектури судів, на основі якого виявлено та введено в систему основні вимоги та обмеження, що впливають на архітектурно-конструктивний тип бойового корабля. Результати дослідження впроваджено у навчальний процес під час вивчення спеціальних дисциплін суднобудівного профілю та ознайомлення з історією світового кораблебудування.*

**Ключові слова:** екстер'єр корабля, динамічність, технологічність форми, оснащення, озброєння.

**Постановка проблеми.** Враховуючи всі аспекти еволюції суднобудівної галузі світу, вагоме значення (як з ідеологічного, так і з практичного боку) завжди мав екстер'єр корабля. Саме тому це питання залишається актуальним і для сучасних дослідників кораблебудування.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Останніми роками історії розвитку кораблебудування в Україні та світі присвятили праці такі вітчизняні науковці, як Б. Білик, Ю. Крючков, Д. Кобалія, Ю. Павлюченко, Н. Рижева, М. Мордовської та ін. Однак історія еволюції екстер'єру корабля дотепер не стала предметом комплексного вивчення серед дослідників науки та техніки в Україні.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження еволюції екстер'єру кораблів у світо-

вому кораблебудуванні від найдавніших часів до наших днів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Протягом усієї історії військового кораблебудування архітектура зовнішнього вигляду (екстер'єр) корабля була нерозривно пов'язана з особливостями озброєння та тактикою бою. Для давньогрецьких кораблів, які пересувалися акваторією за допомогою весел та вітрил, характерна наявність у носовій частині ватерлінії металевого тарана, за допомогою якого ламали весла та пошкоджували обшивку ворожого корабля. Носовому краю надавали вигляд морського чудовиська з велетенськими зубами та очима. Кормовий край, що високо підіймався над водою, імітував хвіст чудовиська. Для кораблів того часу вітрило відіграло роль допоміжного рушія, але



переміщення його в ніс від міделя візуально підкреслювало спрямованість уперед [1, с. 98].

Майже до XIII століття військово-морський флот складався з гребних кораблів, які були оснащені допоміжним вітрилом. У X–XIII столітті (разом із побудовою гребних кораблів – галер) з'явився та став поступово розвиватися виключно вітрильний тип корабля – неф. За невеликого відношення довжини до ширини ( $\frac{L}{B} \in \{2,61...3,33\}$ ) неф мав дві щогли, оснащені вітрилами, та високі надбудови бака та юта. На кормі обладнувалася платформа для стрільців, а на щоглі – спостережний марс. Швидкохідні нефи мали назву «галіони». На транцевій кормі галіона навішувався руль. Щогли оснащувалися прямими вітрилами.

У XIV–XV століттях вітрильні судна озброювалися гарматами. Окрім гармат, кораблі додатково озброювалися катапультами, балістами та арбалетами з металевими пружинами.

На вітрильних кораблях XVII століття спрямовувалися догори рангоут та вітрила, надаючи ефекту вертикальної динаміки, а нахилений над водою у носовому краї *бушприт* – горизонтальної (рис. 1).

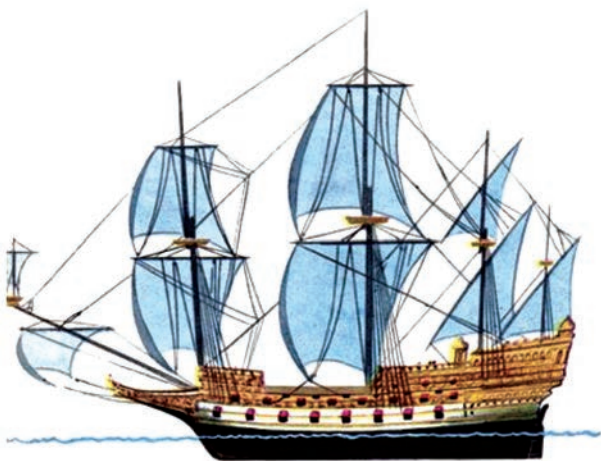


Рис. 1. Вітрильне судно XVII століття (<http://hobbyport.ru>)

Типові парусні кораблі відрізнялися стрункістю та легкістю силуету. Особлива увага приділялася прикрашенню корабля: транцева корма виконувалася у вигляді фасаду палацу, який було прикрашено орнаментним різьбленням укрупненої форми та зображенням алегоричних сцен. Для кріплення швартовного тросу на кормі корабля пристосовувалися бронзові кільця у пащі лева. Зображенням левових голів досить часто прикрашалися також канонерські порти. Ніс корабля завершувався відмінною носовою фігурою, яка отримала назву *галіона*. Традиція прикрашати вітрильні кораблі галіонними фігурами існувала до середини XIX століття.

Використання сталі для побудови корпусу судна, установка механічного двигуна та гребного гвинта призвели до скорочення кількості вітрил, а потім до повної відмови від них. Розвиток озброєння, а саме встановлення гармат із нарізними стволами та збільшення калібру озброєння, викликало появу нового типу корабля – броненосця з невеликою кількістю крупнокаліберних і добре захищених гармат. На броненосцях була прийнята таранна форма носа з розрахунку на нанесення ворожому кораблю пробіни під час зближення та таранного удару.

Екстер'єр корабля різко змінився. Так, наприклад, броненосець США «Indiana» замість красивого кліперського носа мав завал форштевня (рис. 2). Було втрачено візуальну стрімкість та динамізм силуету. Велика висота димових труб створювала ефект спрямованості догори, що компенсував зменшення вертикальної динаміки порівняно з парусними кораблями. Дві броньовані башти, які розташовували симетрично до міделя, обтяжували корпус, чим підкреслювали силу та непохитність. Цьому фактору також допомагали вісім гармат у чотирьох баштах спардека. Єдиним елементом, який зміщував візуальний центр у напрямку руху, була щогла. Вона не передбачала наявності вітрил, але відігравала важливу роль у силуеті корабля.

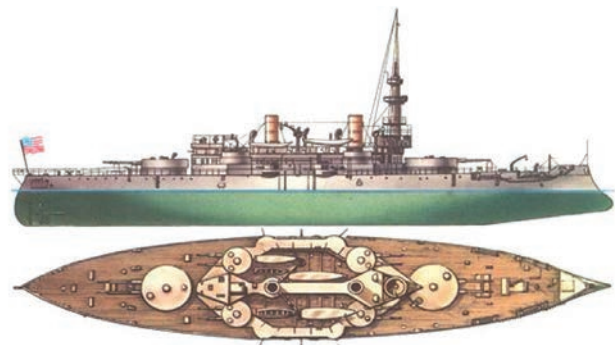


Рис. 2. Броненосець «Indiana» (<http://war-book.ru>)

Бойові дії у XX столітті дали зрозуміти, що за дійсної тактики морського бою таранна форма носового краю не виконувала своєї основної функції. Після введення на кораблях далекомірів та систем керування артилерійським вогнем збільшилася кількість гармат найбільш крупного калібру, а швидкострільні установки малого калібру для контратак міноносців розосереджувалися на всій довжині корпусу.

Далекомірні артилерійські пости та пости наглядання обладнували на щоглах. Результатом цього стало те, що щогли конструювали більш стійкими (три-, чотири-, а іноді й восьминогими).

Досвід установа легких ґратчастих щогл на лінійному кораблі США «Michigan» у 1908 році (рис. 3) завершився невдало. Щогли склалися з тонких трубок, які з'єднувалися кінцевими в'язями. Їх підвищена вібрація під час ходу судна змусила в подальшому перейти до суцільних трубчатих конструкцій. Ажурні трубчаті щогли більш досконалої конструкції були встановлені на низці інших лінійних кораблів США: «Нью-Мексико», «Вест Вірджинія» та ін.

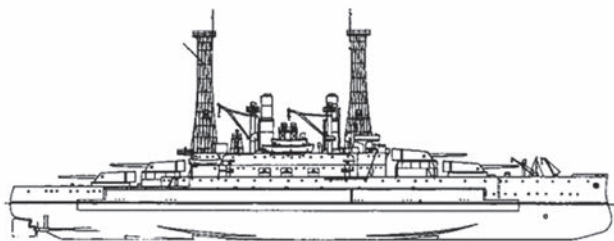


Рис. 3. Лінійний корабель «Michigan» (<http://flibusta.site/>)

Після Першої світової війни кораблебудівники приділяли значну увагу зниженню опору руху корабля, зокрема й повітряного. Для цього надбудовам, озброєнням, баштам, щоглам та трубам надавали обтічних форм.

Ураховуючи нахил форштевня, на носу робилася яскраво виражена сідлуватість палуби, яка підкреслювала горизонтальну динаміку корабля. Труби робилися з нахилом до корми. До озброєння лінійних кораблів стали включати торпедні апарати. Лінкори та крейсери обладнувалися катапультами для злітання гідролітаків.

У період Другої світової війни під час бойових дій на морі брали участь лінійні кораблі з потужним артилерійським озброєнням та потужним броньованим захистом. Баштова артилерія головного калібру встановлювалась у діаметральній площині лінійного корабля в одну лінію з піднесенням. Різноманітні бойові завдання виконували крейсери, на яких, окрім артилерійського озброєння, часто встановлювалися торпедні апарати. На озброєнні ескадрених міноносців, окрім торпедного озброєння, містилися глибинні бомби та артилерія. Протиповітряна та протичовнова оборона на переході морем, як правило, здійснювалась сторожовими кораблями.

Після завершення Другої світової війни припинялося будівництво лінійних кораблів. Велику увагу приділяли проектуванню атомних підводних човнів, авіаносців, крейсерів для базування гелікоптерів та кораблів-ракетноносців. Основним озброєнням надводних кораблів стали керовані ракети,

здатні знищувати кораблі супротивника на відстанях у сотні миль. Швидкострільність корабельної артилерії значно збільшилася.

Значний розвиток отримали протичовнові кораблі. Висока швидкість ходу, сучасні засоби гідроакустичного нагляду, озброєння самонавідними торпедами та бомбометальниками дозволили їм у взаємодії з протичовновою авіацією ефективно боротися з підводними човнами.

Останніми роками багато країн перейшли до будівництва багатоцільових крейсерів-вертольотоносців. До складу їх озброєння входили ракетні, артилерійські установки, штурмові та багатоцільові гелікоптери. Посилені щогли (особливо фермових конструкцій) несли значну кількість громіздких антенних постів радіолокаційних станцій.

Архітектурною особливістю багатьох крейсерів стала наявність подовженого бака та кормового гелікоптерного майданчика. Розміщення гелікоптерів також передбачалося на сучасних фрегатах та сторожових кораблях. Гелікоптери базувалися у спеціальних ангарах або безпосередньо на палубі. Кораблі цього класу мали розвинуті надбудови, щогли фермової конструкції або щогли-труби.

Для французьких фрегатів стала характерною наявність однієї димової труби та досить великої кількості обтічників антенних постів радіолокаційних станцій.

У фрегатів США, які оснащувалися потужними гідролокаційними пристроями, приймально-випромінювані пристрої гідролокаційної станції розташовували у носовій бульбовій надлінці. Для запобігання пошкодження цієї конструкції під час якірних операцій якірний клюз лівого борту конструктивно змістили до форштевня, а клюз правого борту виконали як палубний клюз та значно змістили до носа. Подібно розмістили якірні клюзи на ескадрених міноносцях США.

Відповідно до завдань, передбачених на флоті, ескадрені міноносці озброювали зенітним керованим озброєнням, універсальною та зенітною артилерією, протичовновими керованими ракетами, торпедами, реактивними бомбометами та бойовими гелікоптерами палубного базування.

Ескадрені міноносці, як правило, мали подовжений бак, дві димові труби, фермові щогли. Поєднана ходова рубка з ходовим містком робилася закритою. Головний командний пост розташовувався в ходовій рубці. На цьому ж ярусі надбудови розташовувався бойовий інформаційний пост та штурманська рубка. Ілюмінатори рубок були заklenі броньованим склом [2, с. 88].

Із метою зменшеності заливття палуби в носовій частині на верхній палубі передбачалася велика сідлуватість, а також значний розвал носових шпангоутів.

Для зручності змивання радіоактивних опадів, з'єднання ширстрека з палубним стрингером виконувалося круглим (як на італійських ескадрених міноносцях типу «Імпавідо»). Аналогічне рішення прийнято на деяких сторожових кораблях, які забезпечували протиповітряну оборону. Багато з них мали на озброєнні гелікоптери, торпедні апарати та артилерію калібром до 127 мм. Гелікоптери розміщувалися у кормовій частині. Так, наприклад, на канадських СКР типу «Аннаполіс» злітно-посадочний майданчик розташовувався на палубі кормової надбудови, яка була розширена від борту до борту. Гелікоптерний ангар спланували за димовими трубами, які змістили до бортів для збільшення площі майданчика обслуговування палубної авіації [3, с. 73].

Для боротьби з надводними силами противника призначені швидкохідні ракетні та торпедні катери невеликої водотоннажності. На деяких із них для підвищення швидкісного режиму використовували нові принципи руху (на підводних крилах, на повітряній подушці та на повітряній каверні) [4, с. 67].

Необхідність захисту від ядерної зброї наклала свій відбиток на архітектуру кораблів, які будувалися. Перед проєктантами постало завдання забезпечити достатню герметизацію, створити обтікальні конструкції, з яких легко змити радіоактивний пил та які ефективно сприйматимуть ударну хвилю. Основна увага приділялася герметизації головних постів корабля. На низці кораблів відмовлялися від установлення ілюмінаторів для основного корпусу та надбудови. Із метою протиатомного захисту підвищувалася міцність рубок, щогл, димових труб. Труби та щогли досить часто об'єднували до єдиного комплексу, який становив розвинені димові труби із встановленими на них майданчиками та реями звичайних щогл. Для зменшення ваги таких щогл конструкції виготовляли зі сплавів на основі алюмінію.

Наприкінці ХХ століття під час проєктування та конструювання кораблів більше уваги стали приділяти композиції екстер'єру, намагаючись забезпечити його гармонійність. Гармонійність екстер'єру досягалася супідрядністю основних елементів форми, а також досить яким відображенням у формі особливості призначення корабля, озброєння, швидкості ходу.

Супідрядність елементів композиції екстер'єру виражалася відповідним нахилом носових стінок надбудов, щитів гарматних башт, щогл та труб. Характерними елементами композиції силуету корабля є надбудови, пускові установки, торпедні апарати, щогли, димові труби, гелікоптерні ангари та майданчики. Динаміка форми силуету підкреслювалася характерними лініями – палубною лінією із сідлуватістю на носі та лінією форштевня, яка нахилилася у бік руху. Пониження надбудов у напрямку кормового краю підсилювала динаміку силуету бокового виду.

Під час роботи над просторовою структурою корабля враховувалося, що нормальна трапецевидність надпалубних конструкцій (надбудов, рубок, башт) складала враження завершеної споруди. Нависання верхніх ярусів надбудови над нижніми, як це зроблено на атомному крейсері «Long Beach» (рис. 4), робило його менш естетичним.



Рис. 4. Атомний крейсер «Long Beach» (<http://hobbyport.ru/>)

Під час розроблення екстер'єру корабля як основні засоби композиції широко використовувалися: пропорційність та масштабність, контраст та нюанс, метричне повторення, колір та світлотіньова пластика.

Пропорції виражали кількісний взаємозв'язок частин та цілого, що виступало у вигляді різних математичних співвідношень, у правильності геометричної побудови форм, у чіткому дотриманні єдиної пропорційної міри побудови як окремих частин, так і цілого. Добре скомпоновані у пропорціях кораблі, які побудовано на достатньому інженерному рівні, стали зразком гармонії та краси.

Відношення ступеня детального пророблення силуету до абсолютних розмірів корабля прийнято називати масштабністю [2, с. 88]. У дослідженні професора Ю.М. Павлюченка досить доступно пояснено порівняння екстер'єру ракетного катера та крейсера [4]. У дослідженні стверджувалося, що екстер'єр ракетного катера характеризувався узагальненими чіткими нечисельними елементами форми, а екстер'єр крейсера був насичений різноманітними дрібними деталями композиції.

У разі невиконання вимог масштабності може мати місце спотворення призначення корабля, тобто порушиться його тектоніка. Наприклад, роздрібленість силуету німецького протичовнового катера типу «Albatros» (рис. 5) призвела до порушення масштабності екстер'єру. До екстер'єру багатьох кораблів включено контрастувальні елементи конструкцій (труби, щогли). Принцип контрасту побудовано на протиставленні «високе – низьке», «вертикальне – горизонтальне». Контрастне поєднання у композицію зробило форму помітнішою, виокремило її серед інших. Водночас активація форми не гарантує гармонії. Для її досягнення необхідно підпорядкувати контраст інтересам композиції, знайти до нього міру, додати до нього нюанс [3, с. 67]. Інакше силует візуально «розвалиться» на частини.



Рис. 5. Протичовновий катер «Albatros» (<http://navyword.narod.ru/>)

Так, наприклад, на французькому фрегаті з керованим ракетним озброєнням (фрегат КРО) «Suffren» масивна щогла-труба контрастує з горизонтальною динамікою корпусу, підкреслюючи його функціональне значення. Водночас за допомогою сферичного обтічника антенного посту радіолокаційної станції діаметром 12 метрів, який встановлено на носовій надбудові перед димо-

вою трубою, здійснено нюансування композиції екстер'єру (рис. 6).



Рис. 6. Фрегат КРО Suffren (<http://seaforges.org/>)

У статті виявлення контрасту як основного композиційного елементу розглянуто на прикладі бразильського ескадреного міноносця «Niteroi» (рис. 7) та канадського есмінця «Iroquois» (рис. 8). «Niteroi» має палубні конструкції, які не контрастують із корпусом. Плавні обводи корпусу поєднуються з округленими формами надбудови. Навіть димова труба та гелікоптер на кормовому майданчику вписуються у плавну аеродинамічну криву обтікання, створюючи монолітний силует корабля. Неістотно виокремлюються тільки гарматні башти, що підкреслює функціональне призначення корабля.

Інший корабель – канадський ескадрений міноносець «Iroquois» – характеризується силуетом, побудованим на контрастних співвідношеннях. Плавним обертанням корпусу контрастують вертикальна щогла та вертикальні стінки надбудов, у результаті чого композиційний образ змінюється на користь більш вираженої тектоніки корабля.

На палубах та платформах надбудов есмінця «Iroquois» відображено порівняно сучасний стиль



Рис. 7. Есмінець «Niteroi» (<http://zonewar.ru/>)



Рис. 8. Есмінець «Ірокуойс» (<http://commi.narod.ru/>)

у техніці, за якого кутуватість поєднується з плавними кривими лініями сполучення площин.

**Резюме.** Короткий огляд еволюції екстер'єру військового корабля показав, що у всі часи кораблебудівники намагались створити образний та гармонійний силует корабля.

Сучасний корабель є складною об'ємно-просторовою структурою. Багато його розмірних співвідношень значно визначені особливостями енергетичної установки та озброєння. З огляду

на це, під час розроблення екстер'єру необхідно комплексно враховувати вимоги доцільності, економіки та естетики.

Отже, якщо на перших етапах розвитку кораблебудування на екстер'єр кораблів більший вплив мали міфічні та естетичні чинники, то на сучасному етапі значний вплив на зовнішній вигляд флоту мають функціональні чинники, адже застосування передових технологій має вирішальне значення у сучасному кораблебудуванні.

#### Список літератури:

1. Лебедев А.А. Фрегаты против кораблей. Неизвестный и неоцененный эпизод Русско-турецкой войны 1787–1791 гг. Санкт-Петербург : Гангут, 2011. 144 с.
2. Павлюченко, Ю.Н. История архитектурного проектирования судов // Сб. докл. Всерос. науч.-техн. конф., посвященной 150-летию вицеадмирала С.О. Макарова. Т. 1. Владивосток : ТОВМИ, 1998. С. 87–88.
3. Сахарнов С.В. История корабля. Москва : «Издательский дом Мещерякова». 2016. 136 с.
4. Кацаф А. Корабли и подводные лодки. Санкт-Петербург : «Балтийская книжная компания». 2013. 96 с.

#### Terlych S.V., Tatarchenko O.B. SHIP'S EVOLUTION EXTERIOR IN WORLD SHIPBUILDING

*The article provides a brief historical analysis of the evolution of the exterior of warships from the seventeenth to the twentieth century. The main criteria for changing the shape of the hull, superstructures, chimneys, mast of the ship are clarified. Factors of manufacturability of the form of the case, superstructures and designs are analyzed. A brief overview of the evolution of the exterior of a warship has shown that shipbuilders have always tried to create a figurative and harmonious silhouette of the ship. A modern ship is a complex three-dimensional structure. Many of its size ratios are largely determined by the characteristics of the power plant and armament. Therefore, when designing the exterior, it is necessary to take into account the requirements of expediency, economy and aesthetics. Thus, while in the early stages of shipbuilding the exterior of ships was more influenced by mythical and aesthetic factors, at the present stage functional factors have a significant impact on the appearance of the fleet, because the use of advanced technologies is crucial in modern shipbuilding. The history of the evolution of the ship's exterior has not yet been the subject of comprehensive study among researchers of science and technology in Ukraine. Therefore, the purpose of this article is to study the evolution of the exterior of ships in the world shipbuilding industry from ancient times to the present day. The authors performed a historical, scientific, technical and operational analysis of the development of ship architecture, on the basis of which the main requirements and limitations that affect the architectural and structural type of the warship were identified and brought into the system. The results of the research are introduced into the educational process during the study of special disciplines of shipbuilding and during the acquaintance with the history of world shipbuilding.*

**Key words:** ship exterior, dynamism, manufacturability of form, equipment, armament.

## ПРИЛАДИ

УДК 620.179.118

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/06>

**Альховик О.В.**

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

### СУЧАСНІ МЕТОДИ ТА ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ МІКРОГЕОМЕТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ І ВИРОБІВ

*У статті проаналізовано застосування сучасних приладів, призначених для безконтактного та контактного вимірів мікрогеометрії поверхні деталей та виробів – шорсткості, яка впливає на експлуатаційні властивості механізмів: корозійну стійкість, витривалість, стійкість до зносу.*

*Розглянуто сучасні методи контролю мікрогеометричних параметрів поверхонь деталей – параметрів шорсткості, важливого показника технічної характеристики виробу та точності його виготовлення. Описано контактні та безконтактні методи вимірювання показників шорсткості.*

*Контактний (щуповий) метод вимірювання шорсткості поверхні – це метод, за якого вимірювання шорсткості проводять за допомогою профілометрів та профілографів. Під час застосування контактного методу вимірювання шорсткості можливе пошкодження поверхонь деталей, які підлягають контролю. Оптичний метод – це безконтактний метод вимірювання шорсткості, який складається з групи методів: методу світлового та тіньового світіння, мікроінтерференційного методу, растрового методу. Найбільш поширений оптичний метод вимірювання шорсткості – метод світлового та тіньового світіння. Мікроінтерференційний метод реалізується за допомогою спеціального вимірювального приладу, який складається з мікроскопа та інтерферометра. За растрового методу застосовується скляна пластина з нанесеною растровою сіткою, шорсткість поверхні визначається за допомогою спеціального растрового мікроскопа. Для безконтактного вимірювання шорсткості поверхні матеріалів також застосовуються лазерні прилади. Для оцінювання шорсткості різноманітних важкодоступних поверхонь, та поверхонь, які мають складну будову, застосовується метод зліпків – метод зняття негативних копій поверхні за допомогою воску, парафіну чи гіпсу з подальшим вимірюванням безконтактними або контактними методами.*

*На підставі проведеного аналізу визначено, що для виготовлення якісної та надійної техніки необхідно проводити контроль мікрогеометричних параметрів поверхні деталей – параметрів шорсткості. Вибір методів та засобів вимірювання шорсткості залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів деталей, їхніх геометричних розмірів та форм, а також від сфери та умов їх застосування. Оптичні безконтактні методи контролю більш придатні для використання на виробництві, тому що вони не псують поверхню деталей і на вимірювання шорсткості витрачається значно менше часу, ніж під час проведення вимірювань контактними методами.*

**Ключові слова:** *поверхня, шорсткість, якість, надійність, профілометр, профілограф.*

**Постановка проблеми.** До геометричних параметрів деталей відносять макро- та мікрогеометрію поверхні. Макрогеометрія поверхні характеризується похибками форми (овальність, конусність, бочкоподібність), які відносяться до параметрів точності обробки. Мікрогеометрія поверхні – шорсткість – зумовлена наявністю мікронерівностей, які виникають у результаті взаємодії поверхні, яка обробляється, з робочими інструментами під час фінішних операцій.

Шорсткість поверхні – характеристика нерівностей, виражена у числових величинах, які визначають ступінь їх відхилення на базовій довжині від теоретично гладких поверхонь заданої геометричної форми [3].

Параметр шорсткості поверхні деталей та складових одиниць – один із головних показників якості, надійності та терміну експлуатації виробів. Він – важлива експлуатаційна характеристика рухомих механізмів, вузлів, електричних двигунів, двигунів внутрішнього згоряння та інших

виробів. Від шорсткості залежать стійкість до зносу поверхонь тертя, корозійна стійкість, збереження натягу в нерухомих з'єднаннях та інші механічні характеристики виробів, які впливають на надійність, довговічність і точність роботи механізмів. Вимоги до шорсткості деталей та виробів висуваються залежно від призначення деталей та їхніх конструктивних особливостей; особливо високі вимоги до якості поверхонь деталей та виробів, які працюють із великими швидкостями, за високих температур, а також в агресивних середовищах.

Під час експлуатації на поверхнях робочих деталей відбуваються процеси, які негативно впливають на роботу всього виробу і можуть призвести до виходу його з ладу. Це можлива поява тріщин, корозія й ерозія металів, механічний знос, змінання, поява задирок.

Фінішна технологічна обробка поверхні деталей, яка забезпечує хороші експлуатаційні характеристики, проводиться шляхом шліфування. Перевірку якості результатів такої технологічної обробки необхідно проводити за допомогою приладів, які вимірюють шорсткість поверхні.

Сьогодні застосовуються контактний і безконтактний методи вимірювання шорсткості поверхні. За контактного (супового) механічного методу використовуються спеціальні прилади – профілометри та профілографи. Основні недоліки під час вимірювання шорсткості за допомогою профілометрів та профілографів: безпосередній контакт із поверхнею деталі датчиків, що може призвести до появи подряпин на поверхні деталі, у результаті чого прилади можуть неточно оцінити показники шорсткості; досить тривалий час процесу вимірювання [2, с. 220–224].

Безконтактний (оптичний) метод дає змогу проводити контроль поверхні способом, за якого не пошкоджується деталь або виріб у цілому; затрати часу на проведення вимірювань значно менші, ніж під час вимірювання контактним методом.

У даній роботі проаналізовано методи і засоби, які використовуються для визначення шорсткості поверхні. Приведено переваги застосування оптичних методів вимірювання, указано сфери використання приладів для вимірювання шорсткості, саме тому тема даної наукової роботи є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Важливий етап під час виготовлення та експлуатації механізмів – контроль якості продукції. На якість і надійність засобів техніки великий вплив мають фізико-механічні та геометричні властивості деталей та виробів, передусім точність їх

виготовлення – геометричні розміри і шорсткість деталей, від цього залежать якість, ресурс роботи і експлуатаційні властивості техніки. Тому на виробництві необхідно постійно контролювати геометричні розміри та шорсткість деталей на відповідність указаним у робочих кресленнях.

У 1935 р. К.Л. Аммон (1887–1957), радянський учений-винахідник, к.т.н., сконструював оригінальний прилад – профілограф, призначений для вимірювання шорсткості поверхні і представлення результатів у вигляді кривої лінії (профілограми). Отримана профілограма точно характеризувала хвилястість і шорсткість обробленої поверхні різних виробів. Прилад був названий його ім'ям – профілограф Аммона.

Науковими дослідженнями шорсткості поверхні матеріалів займалися д.т.н. Г.С. Гун, д.т.н. В.Н. Перетяцько, Е.А. Гарбер та інші вчені. У їхніх працях описано методи вимірювання шорсткості поверхні матеріалів та засоби для визначення мікрогеометричних характеристик поверхні матеріалів. Незважаючи на велику кількість публікацій, майже в усіх публікаціях описано контактні методи визначення шорсткості, але мало уваги приділяється приладам, в яких застосовуються безконтактні (оптичні) методи вимірювання, тому існує необхідність у подальших дослідженнях сфер та умов застосування даних приладів.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз сфер застосування контактного і безконтактного методів вимірювання шорсткості матеріалів для підвищення якості та надійності механізмів, які виготовляються на промислових підприємствах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Шорсткість – це сукупність мікронерівностей, які з'являються на поверхнях готових виробів або деталей.

Виділяють три види шорсткості об'єкта:

а) вихідна шорсткість – виникає у результаті технологічної обробки виробу різними інструментами та абразивами;

б) експлуатаційна шорсткість – з'являється під час експлуатації в результаті зносу та робочого тертя;

в) стабільна шорсткість – це вид експлуатаційної шорсткості, яка встановлюється на фрикційному контакті після завершення попереднього притирання.

Шорсткість поверхні деталей та виробів дуже впливає на експлуатаційні характеристики та термін експлуатації двигунів машин, а також деталей та вузлів різного устаткування. Точне визначення значення шорсткості поверхні – одне з найважливіших завдань метрології.

Поверхня обробленої деталі не буває ідеально рівною та геометрично правильною. Вона відрізняється від номінальної (заданої кресленням) мікро- і макрогеометричними відхиленнями. Мікрогеометричні відхилення визначають шорсткість поверхні, макрогеометричні – характеризують хвилястість і відхилення форми. Шорсткість поверхні під час обробки заготовки деталі залежить від технологічного процесу: режимів обробки (швидкості різання, подачі); матеріалу й якості поверхні інструменту; механічних властивостей, хімічного складу і структури матеріалу заготовки; складу мастильно-охолоджувальної рідини та інших чинників. Шорсткість впливає на основні експлуатаційні властивості деталей і вузлів: зносостійкість, опір втомі, надійність посадки, контактну жорсткість і теплопровідність стиків сполучених деталей, корозійну стійкість. Тому характеристики шорсткості поверхні нормуються і піддаються постійному аналізу в технологічних дослідженнях та контролі в процесі виробництва [1, с. 145–147].

Параметри шорсткості визначені в ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури [3].

Стандартом визначено шість параметрів оцінки шорсткості поверхні.

Висотні:

$R_a$  – середнє арифметичне відхилення профілю;

$R_z$  – висота нерівностей профілю по 10 точках;

$R_{max}$  – найбільша висота профілю.

Крокові:

$S$  – середній крок місцевих виступів профілю;

$S_m$  – середній крок нерівностей профілю по середній лінії.

Висотно-кроковий:

$t_p$  – відносна опорна довжина профілю, де  $p$  – значення рівня перерізу профілю.

Шорсткість поверхонь на кресленнях деталей указують для всіх поверхонь, які виконуються по цих кресленнях незалежно від методів їх обробки, крім поверхонь, шорсткість котрих не зумовлена вимогами конструкції.

Оцінку шорсткості можна здійснювати двома способами: поелементно (кількісний метод) – шляхом порівняння окремих параметрів або в комплексі (якісний метод), використовуючи порівняльний аналіз досліджуваного зразка з еталоном.

Кількісний метод проводиться поелементно двома способами:

1. Безконтактно. Способом світлового і тіньового світління, мікроінтерференційним – за допомогою мікроскопа та інтерферометра, растровим – із використанням растрової сітки і променя світла.

2. Контактно. Із використанням спеціальних вимірювачів шорсткості – профілометрів і профілографів.

Якісний метод використовується для всього виробу в комплексі і реалізується декількома способами:

1. Візуальний спосіб. Поверхня виробу, яка підлягає контролю, візуально порівнюється з еталоном шорсткості, а також контроль проводиться за допомогою тактильних відчуттів (обмацування пальцем, нігтем). Візуальний спосіб оцінки шорсткості підходить для виробів із низьким класом чистоти.

2. Безконтактний спосіб. Для контролю поверхні виробів із високим класом чистоти використовують лупу або мікроскоп.

Застосовується також метод зліпків, який використовується для оцінки шорсткості різних важкодоступних поверхонь, а також поверхонь зі складною конструкцією. Метод зліпків базується на знятті негативних копій поверхні за допомогою воску, парафіну, гіпсу або масляно-гутаперчевої маси з подальшим вимірюванням копій щуповим або оптичним методом. Метод зліпків – не самостійний метод, а лише початковий етап під час проведення вимірювань. Він застосовується тільки спільно з одним зі способів вимірювання шорсткості.

Найбільш точний кількісний поелементний спосіб, який може бути здійснений різними методами визначення шорсткості.

Щуповий метод вимірювання шорсткості поверхні – це контактний метод. Вимірювання виконуються за допомогою профілометра. Профілометр – це чутливий датчик, обладнаний тонкою, гостро заточеною алмазною голкою, закріпленою в тримачі. Алмазна голка встановлюється перпендикулярно до поверхні деталі, притискається до виникнення контакту і рухається паралельно поверхні, яка підлягає контролю. У місцях нерівностей (виступів і впадин) виникають механічні коливання вимірювальної голки. Ці коливання передаються на датчик, призначений для перетворення механічної енергії коливання на електричні сигнали, які посилюються перетворювачем і вимірюються. Записані параметри цих сигналів повторюють нерівності на шорсткій поверхні деталі. Профілометри за типом перетворювача сигналів поділяють на п'єзоелектричні, електронні, індукційні та індуктивні. Найбільш поширені прилади з індуктивними перетворювачами сигналів.



У техніці профілометри призначені для вимірювань поверхонь деталей, перетин яких у площині вимірювання становить пряму лінію. До числа таких приладів відносяться електромагнітні профілометри Аббота та Кисельова.

Окрім профілометрів застосовуються також профілографи, які дають змогу виміряти і записати параметри шорсткості профілю у заздалегідь вибраному масштабі. Профілографи – оптико-механічні прилади, засновані на принципі обстеження поверхні датчиком з алмазною голкою. За допомогою оптичного пристрою профіль поверхні записується на фотографічній стрічці. До числа таких приладів відносяться профілографи Аммона та Левіна. У профілографах коливання датчика перетворюються на електричні імпульси за допомогою індуктивних, ємнісних, п'єзоелектричних та інших перетворювачів. Запис профілю у приладах з електричними перетвореннями сигналів найчастіше виконується на металізованому папері. Для зручності розшифрування профілограма виконується у вигляді кресленника в масштабі. Збільшення записів вимірюваних висот нерівностей у вертикальному масштабі можливе в діапазоні від 400 до 200 000 разів. Горизонтальне збільшення здійснюється завдяки більш швидкому переміщенню паперу порівняно зі швидкістю переміщення голки (до 100 000 разів).

Для вимірювання характеристик шорсткості деталей створено комбіновані пристрої – профілографи-профілометри. Вони одночасно обробляють і фіксують результати вимірювань шорсткості у графічному та цифровому вигляді. Такі прилади – універсальні, у комплект їх поставки може входити оснащення, яке забезпечує вимірювання шорсткості поверхні деталей різної конфігурації.

Дослідження поверхонь контактним щуповим методом проводиться в декілька етапів: спочатку профіль об'єкта, який підлягає контролю, обстежують кілька разів і на підставі серії вимірювань обчислюють середнє значення шорсткості.

У зв'язку з достатньо великим тиском алмазної голки на поверхню деталі, яка підлягає контролю, профілометри Кисельова та Аббота і профілограф Аммона пошкоджують верхній шар металу під час контролю поверхні деталі. За багаторазового проходження голки профілометра або профілографа по одному і тому ж місцю в процесі вимірювання голка проходить по подряпинах, що утворилися під час попередніх проходів, і показання приладу можуть мати значну похибку вимірювань. Для контролю шорсткості поверхонь деталей із невисокою твердістю поверхневого шару і під

час визначення шорсткості методом зліпків рекомендується використовувати профілограф Левіна, в якому тиск голки на поверхню деталі нижчий, аніж в інших приладах.

Оптичний метод – безконтактний метод вимірювання шорсткості, який складається з групи методів: методу світлового та тіньового світіння, мікроінтерференційного методу, растрового методу.

Метод світлового світіння – це метод, у якому світловий потік від джерела світла під час проходження скрізь вузьку щілину перетворюється на тонкий, вузький пучок. За допомогою об'єктива він направляється на поверхню, що випробовується, під визначеним кутом. Відбиваючись, промінь знову проходить через об'єктив і формує зображення щілини в окулярі. При цьому абсолютно рівна поверхня матиме ідеально прямий світловий пучок (лінію), а шорстка поверхня – криву лінію.

Тіньовий метод – це вдосконалений метод світлового світіння. На невеликій відстані від досліджуваної поверхні встановлюється лінійка зі скошеним ребром. Пучок світла долає ту ж відстань, але зрізається ребром лінійки. На поверхні, що досліджується, спостерігають тінь, верхня частина якої з точністю повторює профіль, що досліджується. За допомогою мікроскопа таке зображення порівнюють, аналізують та роблять висновки стосовно параметрів та характеристик шорсткості. Методи світлового та тіньового світіння – найбільш поширені методи вимірювання шорсткості безконтактним способом.

Вимірювання шорсткості мікроінтерференційним методом проводиться за допомогою комплексу спеціальних вимірювальних приладів, який складається з інтерферометра та мікроскопа. За допомогою інтерферометра формується інтерференційна картина досліджуваної поверхні з викривленнями смуг у місцях нерівностей. Отримана картина збільшується в мікроскопі до величини, яка дає змогу виміряти параметри шорсткості за викривленням смуг.

Вимірювання шорсткості растровим методом виконують у такій послідовності. На поверхню, яка випробовується, накладають скляну пластину з нанесеною на неї растровою сіткою. За похилого падіння променів у місцях мікроскопічних нерівностей відображена картина растрової сітки накладається на штрихи самої сітки – виникають муарові смуги, які вказують на наявність виступів та впадин на поверхні, яка підлягає контролю. За допомогою растрового мікроскопа визначають параметри нерівності. Растровий метод

застосовують переважно для обстеження поверхонь, сліди нерівностей на яких мають переважно однаковий напрямок (наприклад, подряпини у циліндрах двигунів внутрішнього згорання, гільзах гідравлічних систем).

Також застосовуються прилади для безконтактного вимірювання шорсткості поверхні матеріалів із використанням лазерного випромінювання методом порівняння. У приладі для контролю шорсткості поверхні лазерний промінь за допомогою розділювальної призми ділиться на два промені, одним з яких зондується еталон, а іншим – поверхня, яка підлягає дослідженню. За допомогою напівпрозорих дзеркал розсіяні еталоном і об'єктом вимірювання світлові потоки направляються на фотоперетворювачі, а отримані з них електричні сигнали на пристрій порівняння та індикатор результатів.

Прилади, призначені для реалізації оптичних методів вимірювання шорсткості, знімають інформацію про шорсткість завдяки відобра-

женню світла від поверхні деталі, дана інформація автоматично обробляється за допомогою комп'ютерної техніки. Обробка даних за допомогою комп'ютерів із відповідним програмним забезпеченням суттєво прискорює процес вимірювання, тому оптичні методи вимірювання шорсткості можуть бути застосовані в умовах безперервного виробництва [2, с. 220–224].

**Висновки.** Проведений аналіз методів і засобів вимірювання шорсткості показує, що оптичні методи контролю шорсткості більш придатні для використання у виробничих умовах, тому що їх застосування дає змогу значно прискорити обробку результатів вимірювань. Під час застосування оптичних методів не псується поверхня деталі, що можливо за механічних методів контролю. Обробка даних вимірювань шорсткості оптичними методами за допомогою комп'ютерної техніки суттєво прискорює процес вимірювання, тому оптичні методи можуть бути застосовані в умовах безперервного виробництва.

#### Список літератури:

1. Шкурко В.В., Хейфец И.М., Алексеева Т.А. Анализ технических средств и программного обеспечения для управления физико-механическими и геометрическими параметрами качества продукции. *Инновационные технологии в машиностроении* : электронный сборник материалов Международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научного парка Полоцкого государственного университета, г. Новополоцк, 21–22 апреля 2020 г. / под. редакцией чл.-кор. НАН Беларуси, д.т.н., проф. В.К. Шелега; д. т.н., проф. Н.Н. Попок. С. 145–147.
2. Зенкін М.А., Назаренко А.С. Сучасні оптичні методи контролю шорсткості відповідальних деталей машин. *Вісник Інженерної академії України*. 2014. № 2. С. 220–224.
3. ДСТУ ISO 4287:2012 Технічні вимоги до геометрії виробів (GPS). Структура поверхні. Профільний метод. Терміни, визначення понять і параметри структури (ISO 4287:1997, IDT + ISO 4287:1997/Cor 1:1998, IDT + ISO 4287:1997/Cor 2:2005, IDT).
4. ДСТУ 2409-94 Вимірювання параметрів шорсткості. Терміни та визначення.
5. ДСТУ ISO 10110-8:2018(ISO 10110-8:2010, IDT) Оптика та оптичні прилади. Розроблення креслень оптичних елементів та систем. Частина 8. Текстура поверхні, шорсткість і хвилястість.
6. ДСТУ 2413-94 Основні норми взаємозамінності. Шорсткість поверхні. Терміни та визначення.

#### **Alkhovyk O.V. MODERN METHODS AND MEANS TO CONTROL MICROGEOMETRIC PARAMETERS OF SURFACES OF PARTS AND DEVICES**

*The use of modern devices which are designed for non-contact and contact measurement of microgeometry of the surface of parts and devices - roughness, which affects the operational characteristics of mechanisms - corrosive resistance, durability, wearproof have been analyzed in the article.*

*There have been considered modern methods to control micro geometric parameters of surfaces of parts which are the parameters of roughness, an important indicator of technical characteristic of the device and its precise manufacturing. Contact and non-contact methods of measuring roughness indices have been described.*

*Contact (probe) method of measuring surface roughness is a method in which roughness is measured using profilometers and profilographs. When using the contact method of roughness measurement, the surfaces of the parts to be inspected may be damaged. The optical method is a non-contact method of measuring roughness, which consists of the group of methods: the method of light and shadow glowing, the micro interference method, the raster method. The most common is the optical method of measuring roughness which is the method of light and shadow glowing. The micro interference method is implemented using a special measuring device, which consists of a microscope and an interferometer. Under the raster method a glass plate with a raster grid is used, the surface roughness is determined using a special scanning microscope. Laser devices*

---

are also used for non-contact measurement of material surface roughness. To assess the roughness of various hard-to-reach surfaces, and surfaces that have a complex structure, the method of casting is used which is a method of negative copying of the surface with wax, paraffin or gypsum, followed by measurements via non-contact or contact methods.

It is determined based on the analyses that for the manufacture of high-quality and reliable equipment it is necessary to control the micro geometric parameters of the surface of the parts which are the parameters of roughness. The methods and means of measuring roughness are chosen depending on the physical and mechanical characteristics of the materials of parts, their geometric dimensions and shapes, as well as the field and conditions of their application. Optical non-contact control methods are more appropriate for use in production, because they do not damage the surface of the parts and the measurement of roughness takes much less time than when measuring by contact methods.

**Key words:** surface, roughness, quality, reliability, profilometer, profilograph.

**Овчарук В.Т.**

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

## ЗАПРОВАДЖЕННЯ СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЙ МАРКУВАННЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНОСТІ ДОСЛІДНОГО ВИРОБНИЦТВА

*Сьогодні майже у всіх галузях промисловості продукція підлягає маркуванню. Відповідно до вимог національного законодавства різних країн, регіональних та міждержавних об'єднань на продукцію необхідно наносити різноманітні відомості: товарні, екологічні, попереджувальні, знаки відповідності, штрих коди та ін.*

*Загалом, за різними експертними оцінками, в останні роки щорічно поставка всіх видів маркувального обладнання в Україні досягла \$ 2,4–2,8 млн та знаходиться в цих межах. Вона зросла порівняно, наприклад, із 2005 р. (\$ 1,5 млн) на 60–85% [1].*

*Використання сучасних технологій нанесення маркувальних написів під час проектування і виготовлення виробів різноманітного призначення на дослідному виробництві – це актуальне питання, хоча далеко і не нове.*

*Сучасна технологія маркування продукції реалізується на різній за видами, формою та конструкцією безпосередньо на výroбах або їх складових частинах, споживчій упаковці, транспортних пакетах з різних пакувальних матеріалів.*

*Із кожним новим витком розвитку цифрових технологій все більше зростає інформаційна складова частина щодо необхідності відображення відомостей різного характеру про виріб, його ідентифікацію, умови його експлуатації у вигляді маркувальних позначень, піктограм, QR-кодів, вказівок, та ін. Наявність маркування і логотипу також вже стало ознакою загальної культури виробництва.*

*У статті розглянуто основні сучасні методи нанесення маркувальних знаків в умовах дослідного виробництва у контексті, спрямованому на забезпечення, реалізацію вимог нормативно-технічної документації для правильної і безпечної експлуатації виробів, зручності їх використання, порядку обліку протягом відпрацювання повного ресурсу використання.*

*Розглянуті такі поняття, як «дослідне виробництво», «технологічність». Досліджено тенденції розвитку технологій маркування. Проведено якісний аналіз на технологічність різних способів маркування та визначено найбільш перспективні для впровадження в дослідному виробництві під час розроблення і виготовлення макетів, дослідних зразків виробів.*

*На основі результатів аналізу якісних показників технологічності процесу маркування продукції визначено, що техніко-економічні показники лазерного маркувального комплексу найбільшою мірою відповідають сучасним потребам і вимогам дослідного виробництва.*

**Ключові слова:** дослідне виробництво, деталь, виріб, маркування, гравірування, технологічність, показники технологічності виробу, шовкотрафаретний друк, гравірування різанням або ударом, краплеструменевий друк, термотрансферний друк, лазерне гравірування.

**Постановка проблеми.** На сучасний стан розвитку технологій нанесення маркування значний вплив має активний розвиток технологій комп'ютерного проектування та розширення сфери застосування інформаційних технологій. Крім вищевказаного, питання впровадження сучасних високоєфективних технологій маркування дуже актуальне для дослідного виробництва, яке характеризується широкою номенклатурою виробів та незначною їх загальною кількістю при високих техніко-економічних вимогах до нових зразків виробів. На ефективність дослідного виробництва в цілому також впливає тенденція дефіциту робіт-

ників-верстатників. Для підвищення його загальної ефективності існує потреба в універсальності і мобільності обладнання. Тому ці проблеми займають не останнє місце в дослідженні сучасних технологій маркування для підвищення ефективності такого виробництва в цілому.

У чому ж криються особливості таких технологій? Напевно, головні з них, за кожним способом маркування, висвітлені у цій статті, які і впливають на доцільність їхнього використання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Кожен день по всьому світу мільйони споживачів, купуючи продукцію, саме за допомогою маркування визнача-

ють всю інформацію про неї. Висвітленням питань сучасного стану технології маркування займалися автори Архангельська К., Кривошей В. [2] та інші. У відповідних публікаціях розглянуті різні технології маркування та передумови впровадження їх для маркування продукції. Основним завданням теперішньої роботи є необхідність більш наочно розглянути і проаналізувати можливості основних технологій маркування виробів та виділити, як найбільш перспективні з точки зору дослідного виробництва. Як вважається, це доцільно провести шляхом оцінювання технологічності процесів маркування.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є висвітлення особливостей та формулювання критеріїв щодо вибору маркувального (гравірувального) обладнання і впровадження сучасних технологій при розробці і виготовленні виробів на дослідному виробництві на базі аналізу техніко-економічних складових частин, враховуючи подальші напрямки і перспективи розвитку сучасних технологій маркування.

Перш ніж перейти до розгляду основного матеріалу, уточнимо основні поняття і терміни.

**Дослідне виробництво** – тип виробничої діяльності, спрямований на забезпечення результатів науково-дослідних робіт та впровадження прогресивних технологічних процесів на виробництві. Дослідне виробництво призначене для виготовлення, випробування і доведення до серійного виробництва дослідних зразків відповідно до техніко-економічних характеристик [3].

Усі об'єкти, які є предметом виробництва, відносять до виробів.

**Деталь** – виріб, який виготовляють з матеріалу однієї марки; первинна частина виробу виготовлена за єдиним суцільним процесом.

**Виріб** – одиниця промислової продукції, кількість якої вимірюють у штуках; предмет виробництва, основна його продукція, яка випускається відповідно до затвердженого плану чи програми, призначена для поставки чи реалізації [4].

**Маркування** – процес нанесення на виріб тексту, умовних графічних символів чи малюнків на пакування чи продукцію [5].

**Гравірування, ритування, гравіювання** – метод отримання зображення, як правило, на металевих поверхнях шляхом зняття поверхневого шару матеріалу [5].

**Технологічність** – це сукупність властивостей виробу, які виявляються в можливості витрат матеріалів, праці, засобів та часу при технічній підготовці його виробництва, виготовленні, експлуатації та ремонті [6].

Зважаючи на те, що для підвищення технологічності конструкції виробу було виділено напрямок удосконалення технології маркування, в особливості гравірування деталей і виробів, вважається за доцільне проведення аналізу на технологічність таких процесів для визначення найбільш перспективних серед них.

Залежно від методів оцінювання, що використовуються, розрізняють кількісне і якісне оцінювання технологічності процесу.

Критерії кількісного оцінювання технологічності процесу полягають у застосуванні інженерно-технічних розрахунків щодо порівняння базових та запланованих показників технологічності, розглянуті в роботі Бородачева [7].

Критерії якісного оцінювання наведені в роботах С. Ананьєва [8; 9] та інших авторів і полягають у формулюванні технічних вимог до тих чи інших рішень та їх експертне порівняння.

**Виклад основного матеріалу.** Сучасна технологія маркування продукції реалізується на різній за видами, формою та конструкцією продукції – деталях, виробах, упаковці, транспортних пакетах та ін. Найбільш широкого розповсюдження на сучасному виробництві отримали такі технології нанесення маркування:

- шовкотрафаретний друк, або шовкографія;
- гравіювання різанням або ударом;
- термотрансферний друк;
- краплеструминний друк в т.ч. УФ-друк;
- лазерне маркування.

**Шовкотрафаретний друк, або шовкографія** – один із найбільш відомих методів нанесення написів та зображень на вироби, що використовується в промисловості, дизайні, промислені та ін. Суть методу полягає в продавлюванні пігментуючої речовини (фарби) rakelом через спеціальну трафаретну сітку, звідки і походить назва. Трафарети, що використовують для друку, виготовляють зі спеціальної дрібноструктурованої тканини з отворами сітки. Просочену фоточутливою маскою сітку засвічують, після чого полімеризовані засвічені елементи заповнюють отвори сітки, а речовина, що не була засвічена і не зреагувала на світло, просто вимивається водою, залишаючи тим самим готову «друковану» форму для подальшого пропускання пігментуючої речовини в потрібних місцях сітки. Шовкотрафаретний друк дозволяє виконати написи різних кольорів, насиченості, необхідного об'єму та доступний для нанесення на широку гаму матеріалів – папір, пластик, шкіру, скло, метал та ін. з достатньо високою роздільною здатністю (150–300 мкм)

заданої товщини (до 50 мкм). До недоліків технології можна віднести:

- необхідність наявності допоміжного обладнання для виготовлення трафаретів;
- застосування спеціальних фарб для нанесення маркування та необхідність регулювання і підтримання їх густини у необхідних параметрах;
- достатньо висока трудомісткість процесу.

**Гравірування різанням або ударом** – метод нанесення зображення шляхом механічного зняття або деформації поверхневого шару матеріалу за допомогою використання загостреного інструменту різців чи голок з надтвердого сплаву з використанням копіювально-гравірувального та мікроударного обладнання.

Принцип роботи копіювально-фрезерного верстата полягає в тому, що переміщення виконавчого механізму верстата з встановленою на ньому різцем жорстко узгоджено з переміщенням елемента щупа (наконечника) копіювального пристрою пантографічного типу, траєкторія руху якого визначається профілем копію. Для виконання гравірування написів деталі, що обробляється та копії, закріплюються на робочому столі верстата, а фреза (різець) – в шпинделі. Робочий інструмент – різець, здійснює обертання під дією електромеханічного приводу. Одне плече пантографа з'єднано зі шпинделем, а інше – зі щупом. При переміщенні щупа по поверхні копію шпиндель з інструментом – різцем буде описувати траєкторію на поверхні заготовки, що обробляється, фігуру, яка відповідає поверхні копію. Масштаб копіювання змінюється за рахунок зміни співвідношення плечей важелів, які з'єднані зі щупом і шпинделем.

В основі принципу ударно-точкового гравірування лежить нанесення великої кількості точок, із малим кроком, високоякісною твердосплавною голкою.

Вищевказані технології гравірування є найбільш розповсюдженими і надійними способами, такими, що дозволяють отримати достатньо високу якість зображення, а саме зображення виглядає як «живе» – воно відблискує та іскриться, або, як ще говорять «грає на сонці». Зараз вищевказані способи гравірування дозволяють реалізувати нанесення інформації на деталі і вироби у вигляді глибоко рельєфних написів на глибину (до 100 мкм) середньою шириною елементів (300–500 мкм), які майже неможливо видалити. Їх можна віднести до традиційно основних технологій маркування. Разом із тим ці технології мають свої недоліки:

– необхідність наявності спеціального твердосплавного ріжучого або ударного інструменту, який періодично необхідно заточувати;

– необхідність придбання спеціальних зразків-еталонів шрифтів (цифр, літер);

– обмеження під час гравірування, що пов'язані з товщиною матеріалу, складністю обробки радіальних, осьових поверхонь та нанесення растрових зображень;

– порівняно високі показники трудомісткості процесу гравірування.

Обладнання – *копіювально-фрезерувальні верстати серії K2, голко-ударні маркувальні системи Markator фірми «Shtray».*

**Термотрансферний друк** – це друк за допомогою термопереносу чорнил з фарбової стрічки на основу із гнучких полімерних матеріалів – етикетку з клейкою основою, яка в подальшому переноситься на деталь чи виріб. Така технологія дозволяє наносити маркувальну інформацію з мінімальною шириною елементів 300-500 мкм, Безумовно, важливими перевагами метода є те, що маркування виконується на попередньому етапі, а також дозволяє не лише легко нанести необхідну інформацію на етикетку з паперу чи полімерних матеріалів, але й швидко змінити її, що робить процес маркування універсальним і недорогим та не вимагає значних трудових витрат. Разом із тим серед недоліків термотрансферного друку є:

– обмеження інформації розмірами етикетки, на яку вона наноситься;

– поверхня, що маркується, повинна бути переважно плоскою, до того ж вона не має бути пористою;

– для виконання маркування необхідні витратні матеріали: спеціальні стрічки з фарбами відповідних кольорів – рибонів та полімерні матеріали з клейкою основою;

– виготовлені маркувальні бирки мають недостатню стійкість до впливу потенційно можливих механічних пошкоджень і агресивного середовища.

Завдяки таким властивостям процес термотрансферного маркування має обмежені можливості в маркуванні деталей і виробів.

Обладнання – *принтер термотрансферного друку типу TSC TTP-300.*

**Краплеструмний друк** – технологія нанесення маркування, що реалізується за рахунок подачі маркувальної суміші (фарб, чорнил) в друкарську головку, у якій суміш розбивається на маленькі краплі, які отримують електричні заряди і під дією електричного поля відхиляються від первинної траєкторії, за рахунок чого

утворюються необхідні знаки маркування. Процес відбувається безконтактним методом на відстані від 10 до 50 мм. Спочатку на ПЕОМ розробляється проект ескізу з відповідним маркуванням, яка через вбудований в принтер інтерфейс транслюється на його робочі органи пристрою для маркування. До переваг технології маркування краплеструминним друком можна віднести високу мобільність та універсальність процесу, низьку собівартість та простоту в обслуговуванні обладнання. Як різновид такої технології доцільно окремо виділити УФ-друк з використанням УФ-чорнил, які твердіють (полімеризуються) під дією джерела УФ-випромінювання і таким чином утворюють міцну плівку. У результаті на виході отримуємо яскравий насичений друк (маркування), стійкий до впливу тертя, вологи і перепадам температур. Технологія із застосуванням краплеструминного УФ-принтера та спеціальних чорнил типу «hard inc», «soft inc» дозволяє отримувати стійке якісне, як векторне, так і растрове зображення, як на пласкі, так і циліндричні та осьові поверхні, як кажуть, «на всі смаки», з мінімальною шириною ліній 200–300 мкм та рельєфною товщиною до 80 мкм. Вищевказаний спосіб нанесення маркування може забезпечити нанесення зображення на пластик, скло, дерево, кераміку та камінь, шкіру, метал та ін. матеріали з дуже високою якістю. Саме тому, як для виконання маркування виробів, ця технологія є дуже перспективною та прогресивною.

До пасиву технології можна віднести необхідність придбання витратних матеріалів, а саме УФ-чорнил, які можуть мати обмежений термін придатності.

Разом із тим, урахувавши широкий спектр матеріалів, що можна маркувати, цей метод маркування має дуже широкі перспективи застосування у сфері дослідного виробництва.

Обладнання – *УФ краплеструминний принтер типу CGH 7590, Compact GH 0609*

**Лазерне маркування** – це технологія маркування способом направленої сфокусованої дії лазерного променя на поверхню матеріалу, в результаті чого за рахунок високоінтенсивної теплоенергетичної дії проходить перманентна його реструктуризація (окислення) і, таким чином, з'являється рельєф. Як і в попередніх технологіях, зображення спочатку продукується на ПЕОМ, яке передається в лазерний маркувальник через інтерфейс. Тут задаються необхідні параметри маркувальника залежно від типу матеріалу, що маркується, необхідної глибини зображення.

Серед переваг лазерного гравірування є можливість нанесення маркування зі швидкістю вищою, ніж у будь-якого іншого методу перенесення зображення, з ідеальною точністю і чіткістю та мінімальною шириною ліній при маркуванні до 100 мкм, при глибині до 50 мкм, та можливістю швидкого нескладного редагування зображення. Маркування може успішно виконуватися як на плоску, так і на радіальну чи осьову поверхню деталі чи виробу, а саме маркування важко видалити і майже неможливо підробити. На додаток до вищевказаного доцільно додати про надвисоку надійність лазерного маркувального обладнання, що забезпечує тривалий робочий час (99,8%) його використання без додаткового обслуговування. Такий високий рівень безупинної роботи лазерного маркувального обладнання забезпечується тим, що термін роботи трубки CO<sup>2</sup> лазерного маркувальника становить приблизно 20–25 тис. годин, а це майже 3 роки безперервної роботи. Ймовірність браку при цьому зводиться до нуля. Відсутність класичних витратних матеріалів значно знижує собівартість виконуваних робіт.

Треба зазначити, що лазерна технологія нанесення маркування має обмеження в застосуванні – це стосується скла, міді та елементів, поверхня яких не є контрастною, бо в такому випадку вона майже непомітна.

Обладнання – *лазерний станок типу Compact i9-90W/*

Для вибору варіанту підвищення ефективності дослідного виробництва, шляхом запровадження сучасних технологій, застосовано метод якісного оцінювання технологічності процесу маркування, враховуючи той факт, що етапу запровадження сучасних технологій маркування передували спочатку пошук, вивчення та аналіз експертної інформації щодо технологій. Для цього використані найбільш суттєві технічні ознаки процесу, що дозволять досягти високого рівня його технологічності. Якісне оцінювання рівня технологічності процесу маркування («краще – гірше» : «1» – «0») проведено шляхом інженерно-експертної оцінки, на підставі наявних технічних характеристик обладнання для маркування (див. табл. 1).

**Висновки.** Узагальнюючи зазначене вище, за результатами якісного оцінювання технологічності встановлено, що серед технологій маркування (гравірування) найбільш оптимальною та універсальною за своїми технічними параметрами є технологія лазерного маркування. Для використання інших сучасних технологій маркування продукції необхідно враховувати

Якісні показники технологічності процесу маркування

| Технологія маркування  | Мінімальна ширина ліній, мкм | Максимальна глибина (рельєф), мкм | Потреба використання інструменту та витратних матеріалів | Нанесення векторних зображень | Нанесення растрових зображень | Маркування на плоских поверхнях | Маркування на циліндричних осьових поверхнях | Маркування по металу | Маркування по пластику, дереву, каменю, склі | Стійкість до механічних пошкоджень | Стійкість до впливу хімічних речовин | Сумарна оцінка аналізу |
|------------------------|------------------------------|-----------------------------------|--|-------------------------------|-------------------------------|---------------------------------|--|----------------------|--|------------------------------------|--------------------------------------|------------------------|
| Шовкотрафарет-ний друк | 150-300                      | До +50                            | 0  | 1                             | 0                             | 1                               | 0  | 1                    | 1  | 0                                  | 1                                    | 5                      |
| Гравіювання різанням   | 300-500                      | До -100                           | 0  | 1                             | 0                             | 1                               | 0  | 1                    | 1  | 1                                  | 1                                    | 7                      |
| Гравіювання ударом     | 300-500                      | До -100                           | 0  | 1                             | 0                             | 1                               | 0  | 1                    | 1  | 1                                  | 1                                    | 7                      |
| Термотрансфер-ний друк | 300-500                      | До +10                            | 0  | 1                             | 0                             | 1                               | 1  | 1                    | 1  | 0                                  | 0                                    | 5                      |
| Краплеструменевий друк | 300-500                      | До +80                            | 0  | 1                             | 1                             | 1                               | 0  | 1                    | 1  | 0                                  | 1                                    | 6                      |
| Лазерне маркування     | 50-100                       | До -100                           | 1  | 1                             | 1                             | 1                               | 1  | 1                    | 1  | 1                                  | 1                                    | 9                      |

особливості маркування для вирішення тих чи інших завдань. Наприклад, пріоритетність у нанесення векторних чи растрових зображень, стійкість до механічного і хімічного впливів, вид та стан поверхні матеріалу та ін. Ураховуючи актуальність питання впровадження сучасних

технологій маркування, вважається за доцільне в подальшому провести дослідження з кількісної оцінки технологічності процесу лазерного маркування у порівнянні з базовим традиційним процесом маркування на фрезерувально-гравірувальному верстаті типу K2.

#### Список літератури:

- Архангельская К. Планета штрихкодов. Часть I, 19.02.2013. URL : [article.unipack.ru/43823](http://article.unipack.ru/43823).
- Кривошей В.М. Сучасні технології маркування продукції. *Упаковка*. 2012. № 6. С. 46–49.
- Савченко О.В. Дослідне виробництво / Енциклопедія Сучасної України: електронна версія / гол. редколегія: Дзюба І.М., Жуковський А.І., Железняк М.Г. та ін. ; НАН України, НТШ. Київ : Інститут енциклопедичних досліджень НАН України, 2008. URL : [http://esu.com.ua/search\\_articles.php?id=21110](http://esu.com.ua/search_articles.php?id=21110).
- ДСТУ 2391:2010 Терміни та визначення основних понять. С. 24, 25.
- ДСТУ 2887-94 Пакування та маркування. Терміни та визначення. С. 9.
- ГОСТ 14.205-83 Обеспечение технологичности изделий. Общие требования. С. 2.
- Бородачев Н.А. Анализ качества и точности производства. Москва : Машгиз, 1946. С. 367.
- Ананьев С.Л., Слізаветін М.А., Жих В.А. та ін. Технологічність конструкцій. Бібліотека конструктора / Під ред. Ананьева С.Л., Купровича В.П. Машинобудування, 1969. С. 424.
- Проблеми розвитку технології машинобудування / Під ред. Е.А. Сателя. Москва : Машинобудування, 1967. С. 592.

#### Ovcharuk V.T. INTRODUCTION OF MODERN LABELING TECHNOLOGIES TO INCREASE THE MANUFACTURABILITY EXPERIMENTAL PRODUCTION

*Products are subject to labeling, today in almost all industries. In accordance with the requirements of national legislation of different countries, regional and intergovernmental associations, the products must be applied to different information – product, environmental, warning, barcodes, etc.*

*In general, according to various expert estimates, in recent years the annual supply of all types of marking equipment in Ukraine has reached \$ 2,4–2,8 million and is within these limits. It increased compared to, for example, 2005 (\$ 1,5 million) by 60–80%.*

*Use of modern technologies marking in the design and manufacture of products for various purposes, this is a topical issue although not new.*



*Modern technology of product labeling is implemented on different types, shapes and designs directly on the products or their components, consumer, packaging, transport packages of different packaging materials.*

*The information component about the need to display product is growing, its identification, conditions of its operation in the form of marking symbols, icons, QR-codes, instructions, etc., with each new round of digital technology. The presence of markings and logos has also become a sign of the general culture of production.*

*The main methods of applying marking conditions of experimental production in the context aimed at ensuring the implementation of the requirements of regulatory and technical documentation for correct and safe operation of products, convenience of their use, the order of the account during working off a full resource of use is article considers.*

*The concepts of experimental production, manufacturability are considered. Tendencies of development technologies are investigated. A qualitative analysis of the manufacturability of different labeling methods and indentified the most promising for implementation in experimental production in the development and manufacture of models, prototypes of products.*

*Based on the result of the analysis of qualitative indicators of manufacturability of the product labeling process, it is determined that technical and economic indicators of the laser marking complex to the greatest extent correspond to modern needs and requirements of the experimental production.*

**Key words:** *experimental production, detail, product, marking, engraving, manufacturability, indicators of product manufacturability, silk screen printing, engraving cutting or punching, inkjet printing, thermal transfer printing, laser engraving.*

**Шорнікова С.В.**

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

## ОПТИЧНА СИСТЕМА ВИМІРЮВАННЯ ВІДСТАНІ МІЖ ОБ'ЄКТАМИ: ПРИНЦИПИ РЕАЛІЗАЦІЇ

*Досліджено принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Запропоновано структуру оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами, яка складається з однієї або декількох камер, які можуть бути як цифровими, так і аналоговими, з установленою на них відповідною оптикою для отримання зображень, а також до структури входить засіб для підсвічування та об'єкт, відстань до якого/від якого вимірюється, устаткування введення/виведення або канали зв'язку для виведення отриманих результатів. Розроблено алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою. Схематично представлений алгоритм обґрунтовано математичними виразами та підкріплено описом процесу налаштування оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Наголошено, що алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами включає рішення трьох основних завдань: визначення фокусних відстаней відеокамер, куткових відхилень відеокамер і лінійних відхилень відеокамер. Підкреслено, що допоміжними операціями під час визначення є попередня обробка зображення, вибір калібрувального об'єкта для калібрування куткових відхилень і фокусних відстаней та вибір калібрувального об'єкта для калібрування лінійних відхилень. Схематично зображено принципи встановлення відеокамер оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Зазначено, що представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітора, а введення графічної інформації виконується за таким алгоритмом: пошук зображення на камері, виокремлення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передання цифрового опису елементів зображення на персональний комп'ютер для подальшої обробки.*

**Ключові слова:** оптична система, відеокамера, реалізація, об'єкт, вимірювання, відстань, калібрування.

**Постановка проблеми.** Завдання вимірювання відстані між двома об'єктами було актуальним завжди, проте нині його значущість у техніці особливо зросла, що зумовлено необхідністю високо-точного позиціонування об'єктів у будівництві, геодезії, військовій справі, навігації тощо. Саме таке завдання вирішують оптичні системи вимірювання відстані між об'єктами. Вони можуть бути різними і включають питання розпізнавання об'єктів, визначення фізичних параметрів середовища. Одним із найважливіших є визначення відстані до об'єктів. Наявність оптичної системи в складі сучасного виробничого пристрою дозволяє оцінювати стан навколишнього простору. Це особливо важливо для рухомих технічних пристроїв, оскільки гарантує безпеку і дозволяє ухвалювати рішення про найбільш вигідний спосіб виробництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз наукових надбань за темою дослідження показав масштабність сучасних досягнень.

В.М. Сокурєнко та І.О. Смажко [1] запропонували здійснювати автоматизований розрахунок

оптичної системи об'єктива для короткохвильового інфрачервоного діапазону (short-waveinfrared, SWIR) за допомогою одного із сучасних алгоритмів глобальної оптимізації – адаптивного методу диференційної еволюції Коші.

У [2] запропоновано просту за конструкцією схему сенсора для безконтактних стаціонарних лінійних вимірювань з оптичними волокнами як світловодами. Схема цього сенсора дає змогу також конструктивно зробити головку сенсора у вигляді вимірювального зонда з оптичного волокна, що забезпечить проведення експресконтролю положення контрольованого об'єкта у просторі. Авторами І.О. Брагинєць та Ю.О. Масюренко проведено світлоенергетичний розрахунок оптичної схеми вказаного сенсора з урахуванням параметрів його оптичних елементів та оцінено співвідношення «сигнал – шум» на виході фотоприймача. Обрано та обґрунтовано для запропонованої схеми сенсора застосування частотного фазового методу обробки сигналів на виході фотоприймача для вимірювання відстані до

контрольованого об'єкта та оцінки його положення у просторі.

Р.В. Трембовецька, В.В. Тичков, Ю.А. Петрушко [3] провели дослідження багатокомпонентної оптичної системи для світлолазерної терапії. У роботі представлено один із методів розрахунку двокомпонентної оптичної системи, а саме матричний метод. Розглянуто різноманітні варіації розташування оптичних елементів: опромінюваний об'єкт розташований у нескінченності, джерело світла розташоване в передній фокальній площині освітлювальної системи, оптична система проектує джерело світла безпосередньо на освітлювальний об'єкт, освітлювальна система утворює зображення джерела в площині вхідної зіниці оптичної системи.

Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин розкрив А.С. Дуднік [4]. Автором удосконалено комп'ютеризований лазерний далекомір, до складу якого включено безпроводний сенсорний інтерфейс, що дає змогу оцінювати відстань на основі двох альтернативних показників, та вперше розроблено метод підвищення продуктивності комп'ютеризованих сенсорних вимірювальних систем із метою підвищення точності під час передання даних вимірювання, що можуть викликати недостовірну оцінку похибки в сенсорних приладах.

Із зарубіжних праць варто вказати на роботи таких авторів: Van Trees Harry L. Detection [5], Udd Eric, Spillman William [6], G. Judd, P. Steenkiste [7], P. Poulichet, F. Costa, E. Laboure [8], M. A. Redfern, S. C. Terry, F. V. P. Robinson, Z. Q. Bo [9], T. J. Choi, C. W. Ahn, J. An [10], Choi Tae Jong, C. W. Ahn [11], M. C. Gardner [12], H. Gross, H. Zugge, M. Peschka, F. Blechinger [13], A. Eiben, J. Smith [14], R. Haupt, S. Haupt [15] та ін.

Ураховуючи описані наукові напрацювання з теми, питання реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідити принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Структура оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами складається з однієї або декількох камер, які можуть бути як цифровими, так і аналоговими, з установленою на них відповідною оптикою для отримання зображень, а також до структури входить засіб для підсвічування та об'єкт, відстань до якого/від якого вимірюється (рис. 1), устаткування введення/виведення або канали зв'язку для виведення отриманих результатів.



Рис. 1. Структура оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами

\* Власна розробка автора на основі [10; 12; 15]

Суть алгоритму вимірювання відстані між об'єктами пояснюється на рис. 2, де наведено алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою.

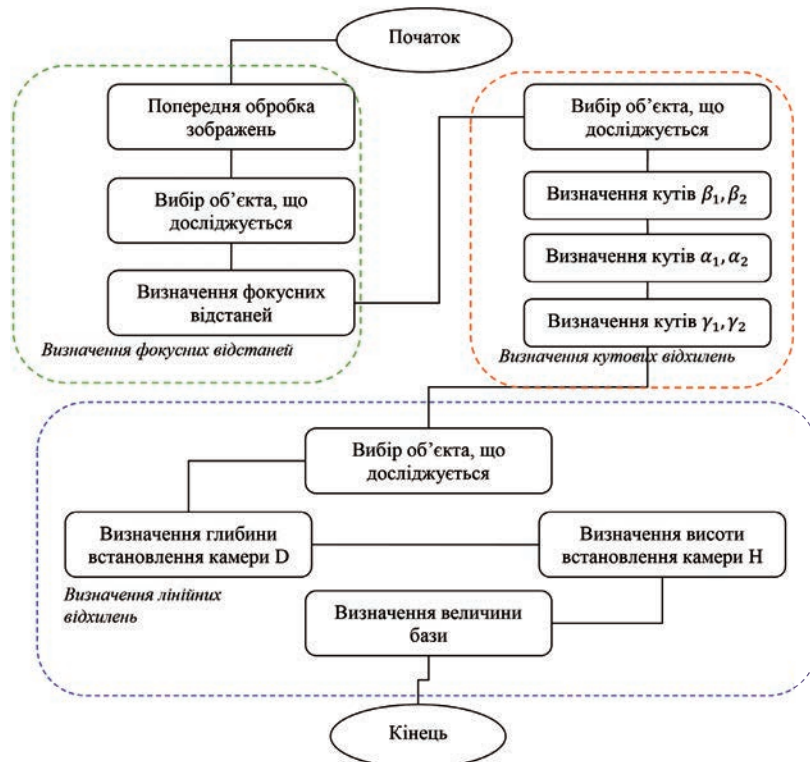


Рис. 2. Алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами

\* Власна розробка автора на основі [8; 11]

Пропонований алгоритм дозволяє оцінювати такі параметри оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами:

- кути відхилення  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$  (рис. 3), що визначають взаємозв'язок головних оптичних осей відеокамер, що входять до складу оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами;
- відношення  $\mathcal{F}$  фокусних відстаней об'єктивів першої та другої відеокамер;
- різниця глибин  $D$  установалення відеокамер (рис. 3);
- різниця висот  $H$  установалення відеокамер (рис. 3);
- відстань по горизонталі (величина бази)  $L$  між відеокамерами (рис. 3).

Алгоритм оцінювання відстані та лінійних розмірів лінійних об'єктів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами (рис. 2) включає рішення трьох основних завдань: визначення фокусних відстаней відеокамер – приведення значення параметра  $\mathcal{F}$  до одиничного, визначення кутових відхилень відеокамер – приведення значень параметрів  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$  до нульових значень, визначення лінійних відхилень відеокамер – приведення значень параметрів  $D, H$  до нульових значень,  $L$  до заданого ненульового значення  $L'$ .

Допоміжними операціями під час визначення є попередня обробка зображення, вибір калібрувального об'єкта для калібрування кутових відхилень і фокусних відстаней та вибір калібрувального об'єкта для калібрування лінійних відхилень.

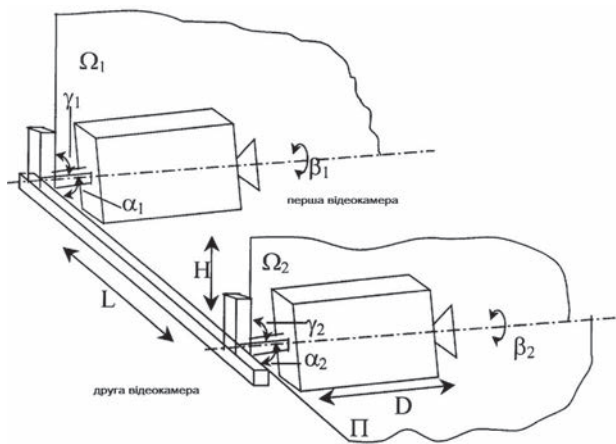


Рис. 3. Визначення параметрів оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами

Попередня обробка зображень (блок 1, рис. 2) полягає у фільтрації зображень за необхідності (як-от методом медіанної фільтрації) і виокремленні контурів.

Виокремлення контурів проводять градієнтним методом, згідно з яким оператор  $B(x, y)$

визначення контуру в точці з координатами  $(x, y)$  дорівнює

$$B(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{при } G(x, y) > L_p \\ 0, & \text{при } G(x, y) < L_p \end{cases}$$

де  $L_p$  – поріг виокремлення контуру, який дорівнює середньому значенню між максимальною і мінімальною яскравістю пікселів зображення;

$$G(x, y) = |I(x+1, y) + I(x-1, y) + I(x, y+1) + I(x, y-1) - 4I(x, y)|,$$

де  $I(x, y)$  – яскравість точки з координатами  $(x, y)$ .

У блоці 2 (рис. 2) проводиться вибір калібрувального об'єкта. Для вибору калібрувального об'єкта, що становить один або кілька контурів, із безлічі виокремлених контурів об'єктів на парі зображень із різних відеокамер міститься контур, чітко помітний на обох зображеннях, що має достатню довжину, розташований у центрі кадру і незмінний у часі. Вибір калібрувального об'єкта проводиться на основі розрахунку значень функцій належності  $\alpha_i$  лінгвістичної змінної «калібрувальний об'єкт» за максимальним значенням  $\alpha_f$

$$\mu_f = \mu_g \wedge \mu_p \wedge \mu_c \wedge \mu_t,$$

де  $\alpha_g$  – функція належності терма «чіткий»,  $\alpha_p$  – функція належності терма «довгий периметр»,  $\alpha_c$  – функція належності терма «центр кадру»,  $\alpha_t$  – функція належності терма «незмінний».

Функція належності  $\alpha_g$  терма «чіткий контур» визначається на основі розрахунку першої похідної зображення об'єкта і дорівнює

$$\mu_g = 1 + (a \cdot (b - \bar{g})^c)^{-1}, \text{ при } a = 2, b = 1, c = 5$$

$$\bar{g} = \frac{1}{N_{kl}} \sum_{i=1}^{N_{kl}} G(x_i, y_i),$$

де  $\bar{g}$  – середнє значення перепадів яскравості на всіх точках контуру,  $N_{kl}$  – кількість складників контурних точок.

Функція належності  $\alpha_p$  терма «довгий периметр» дозволяє вибирати контури за довжиною периметра

$$\mu_p = 1 + (a \cdot (b \cdot P)^c)^{-1}, \text{ при } a = 0,03, b = 100, c = 3$$

де  $P$  – довжина контуру в точках.

Функція належності  $\alpha_c$  терма «центр кадру» дозволяє вибрати об'єкти, розташовані близько до центру кадру

$$\mu_c = 1 + (0,5 \cdot (5 - d_c)^c)^{-1}, \text{ при } a = 0,5, b = 5, c = 4$$

де  $d_c$  – віддалення центру контуру від центру кадру.

Функція належності  $\alpha_t$  терма «незмінний» дозволяє відокремити контури нерухомих об'єктів

від контурів об'єктів, що змінюються в часі, як-от рухомий маніпулятор робота:

$$\mu_t = 1 + \left( a \cdot (\Delta Kb)^c \right)^{-1}, \text{ при } a = 0,5, b = 1, c = 2,5,$$

де  $\Delta K$  – кількість незбіжних точок контуру через фіксований проміжок часу.

Наступним кроком калібрування є досягнення рівності фокусних відстаней першої та другої відеокамер (блок 3, рис. 2).

Для цього вимірюється периметр калібрувального об'єкта на обох зображеннях. Довжина контуру реального об'єкта на його зображенні прямо пропорційна фокусній відстані, тому справедлива формула визначення ставлення фокусних відстаней на ділянці зображення одного і того ж об'єкта на двох кадрах:

$$\Delta f = \frac{P_1}{P_2}$$

де  $P_1, P_2$  – периметр контуру на першому і другому зображеннях відповідно.

Відбувається ітераційний процес зміни фокусних відстаней першої та другої відеокамер, поки відношення фокусних відстаней не стане рівним одиниці з деякою заданою точністю  $\delta_f$ .

Для калібрування кутових відхилень головних оптичних осей відеокамер знову необхідно провести вибір калібрувального об'єкта на зображеннях.

Калібрувальний об'єкт повинен володіти такими властивостями: достатнім віддаленням від оптичної системи (потрібно для ослаблення ефекту впливу оптичної системи), чіткістю, центральним положенням у кадрі, оптимальним розміром.

Вибір калібрувального об'єкта (блок 4, рис. 2) проводиться на основі розрахунку значень функцій належності  $\mu_{kp}$  об'єктів, що перебувають у кадрі, і вибору об'єкта з максимальним значенням  $\mu_{kp}$

$$\mu_{kp} = \mu_g \wedge \mu_p \wedge \mu_c \wedge \mu_\delta,$$

де  $\mu_\delta$  – функція належності, визначальне видалення об'єкта щодо площ об'єктів  $\delta_s$  на зображеннях із різних відеокамер, що дорівнює

$$\mu_\delta = 1 + \left( 5 \cdot (1,0 - \delta_s)^2 \right)^{-1}$$

Після вибору калібрувального об'єкта проводиться калібрування кутових відхилень  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$ .

Необхідною є паралельність осей координат першої та другої відеокамер, що відповідають за висоту (блок 5, рис. 2). Обертанням першої та другої відеокамерами навколо своєї осі змінюємо кути  $\beta_1, \beta_2$  у сторони, спрямовані на зменшення цих кутів.

Калібрування кутів  $\alpha_1, \alpha_2$  проводиться аналогічно (блок 6, рис. 2): на основі аналізу двох кадрів, коли вертикальні осі координат зображень паралельні, але об'єкт займає різні положення на кадрах зображення, здійснюємо поворот першої і другої відеокамер у площині П (рис. 3), домагаючись збігу відповідних координат  $x_i$ , безлічі точок, складників калібрувального об'єкта.

У блоці 7 (рис. 2), повертаючи першу і другу відеокамери в площинах  $|_1, |_2$  відповідно, змінюємо кути  $\gamma_1, \gamma_2$  і отримуємо збіг координат відповідних точок об'єкта на обох зображеннях.

Проведене калібрування кутових параметрів  $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i, i = 1, 2$  визначають напрями головних оптичних осей відеокамер, у результаті якої головні оптичні осі відеокамер оптичної системи паралельні.

Для визначення лінійних параметрів  $H, D, L$  необхідно розмістити калібрувальний об'єкт так, щоб він був на зображенні обох відеокамер (калібрувальний об'єкт новий і не збігається з калібрувальним об'єктом для калібрування кутових відхилень). Розміщення калібрувального об'єкта може здійснюватися автоматично маніпулятором або вручну. Калібрувальний об'єкт на зображенні вибирається оператором або автоматично за відомих геометричних особливостей калібрувального об'єкта (блок 8, рис. 2).

Першим етапом калібрування є визначення різниці глибин установлення відеокамер  $D$  і приведення її до нульового значення (блок 9, рис. 2).

Цей етап калібрування заснований на тому, що різниця глибин встановлення відеокамер дорівнює нулю за виконання двох умов:

1) розмір зображення калібрувального об'єкта по горизонталі однаковий на обох зображеннях (рис. 4,  $r_{01} = r_{02}$ );

2) центри зображень калібрувального об'єкта розташовані на рівній відстані від суміжних країв кадрів (рис. 4,  $x_{01} = x_{02}$ ).

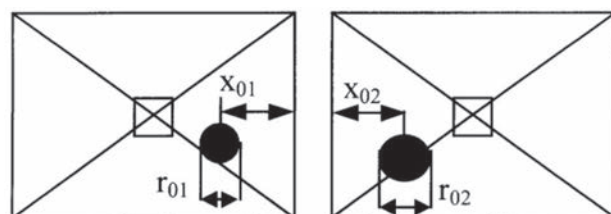


Рис. 4. Визначення положення об'єкта в межах обох камер

Перша умова заснована на тому, що за однакових фокусних відстаней відеокамер (фокусні відстані відкалібровані раніше) розміри зображень

об'єкта на різних зображеннях будуть однаковими за умов рівних відстаней до об'єкта.

Для доказу першої умови розглянемо трикутники  $OFx_1$  і  $OFx_2$  (рис. 5) і зазначимо, що точки  $p_{11}, p_1, p_{22}$  та  $p_{12}, p_2, p_{21}$  відповідно збігаються (це припущення істотно полегшує доказ, але при цьому не впливає на його суть):

$$tg v_1 = \frac{x_1}{f} = \frac{p_1}{d_1 + f}$$

$$tg v_2 = \frac{x_2}{f} = \frac{p_2}{d_1 + f}$$

Таким чином, під час калібрування різниці глибин установа відеокамер  $D$  ітераційно проводиться переміщення тієї відеокамери назад для її видалення від калібрувального об'єкта. Критерієм зупинки ітераційного процесу є досягнення рівностей  $x_{01} = x_{02}$  і  $\Delta x_1 = \Delta x_2$  із заданими точностями.

Наступною з лінійних параметрів калібрується різниця висот установки відеокамер  $H$  (блок 10, рис. 2).

На рисунку 5а показана геометрична модель відеокамер із передніми площинами зображення, яка пояснює процес калібрування різниці висот установки відеокамер  $H$ .

Таким чином, висота калібрувального об'єкта на зображенні верхньої відеокамери буде менше за висоту калібрувального об'єкта на зображенні

нижньої відеокамери. Висоти зображень об'єкта будуть збігатися за  $H=0$ , для чого проводиться підйом тієї відеокамери, висота калібрувального об'єкта на зображенні якої менше, доки висоти зображень об'єкта не збігатимуться.

Останнім із лінійних параметрів калібрується величина бази  $L$ .

Метою калібрування параметра  $L$ , що визначає відстань по горизонталі між відеокамерами, є приведення цього параметра до заданого значення для забезпечення стереоскопічного сприйняття із заданими параметрами.

На відміну від раніше відкаліброваних параметрів калібрування базової відстані може проводитися тільки за умов відомої відстані  $d$  від калібрувального об'єкта до оптичної системи.

Формула для визначення величини бази  $L$  залежно від координат  $x_1, x_2$  калібрувального об'єкта на зображеннях і відстані  $d$  до нього:

$$L = (x_1 + x_2) \frac{X_{mm}}{X_{max}} \cdot \left(1 + \frac{d}{f}\right),$$

де  $X_{mm}$  – половина довжин прийомних матриць відеокамер у метрах, що визначаються за паспортом відеокамер,  $f$  – фокусна відстань відеокамер у метрах,  $X_{max}$  – половина розмірів прийомних матриць відеокамер у точках.

Калібрування величини бази проводиться шляхом розрахунку значення  $L$  за наведеною форму-

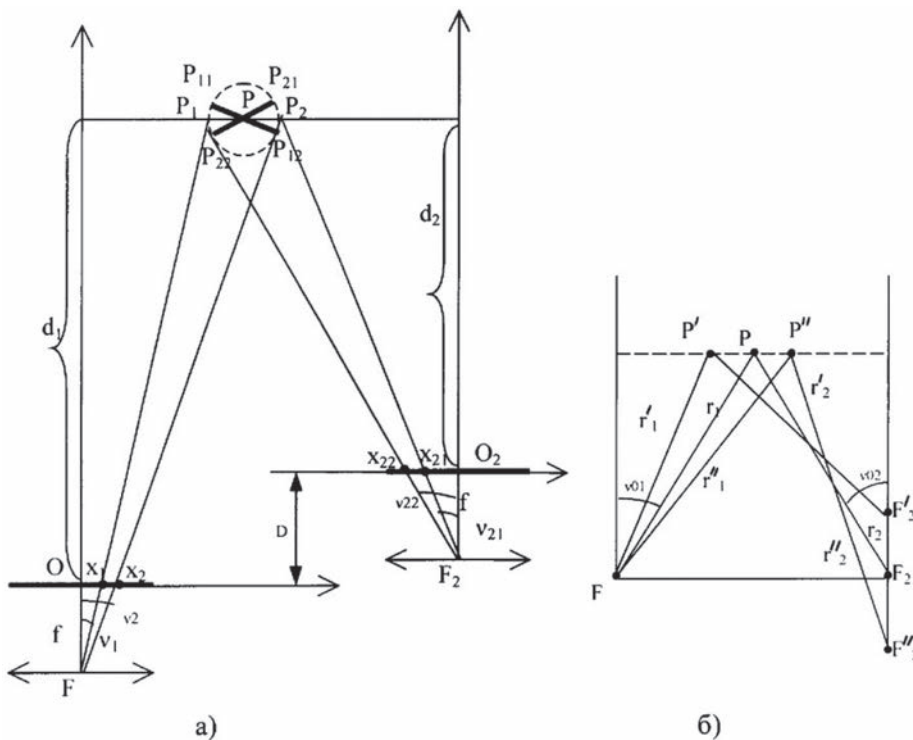


Рис. 5. Координати встановлення відеокамер

лою і зміщення другої відеокамери щодо першої відеокамери праворуч на величину  $\varnothing L$ .

**Висновки.** У роботі досліджено принципи реалізації оптичної системи вимірювання відстані між об'єктами. Наведено алгоритм роботи та налаштування оптичної системи з детальним описом послідовності дій. Представлення отриманих розмірів оптичною системою вимірювання відстані між об'єктами відбувається безпосередньо від камер на екран монітора. Уведення графічної інформації

виконується за таким алгоритмом: пошук зображення на камері, виокремлення елементів зображення, що підлягають кодуванню, перетворення координат точок кодованого зображення в цифрову форму і передання цифрового опису елементів зображення на ЕОМ для подальшої обробки.

Перспективи подільних досліджень ґрунтуються на вдосконаленні алгоритму зчитування відстані від/до об'єктів із подальшою автоматизацією калібрування.

#### Список літератури:

1. Сокурєнко В.М., Смажко І.О. Автоматизований розрахунок оптичної системи SWIR-об'єктива. *Вісник Хмельницького національного університету : Технічні науки*. Хмельницький. 2019. № 6. С. 202–205.
2. Bragynets, I. O., Masjurenko Yu. O. Fiber optical sensor for linear measurements. *Technical Electrodynamics*. 2019. No 6. P. 81–87.
3. Трємбовецька Р.В., Тичков В.В., Петрушко Ю.А. Дослідження багатокомпонентної оптичної системи для світло-лазерної терапії. *Вісник ЧДТУ*, 2018. Вип. 1. С. 122–129.
4. Дуднік А.С. Наукові основи комп'ютеризованих сенсорних систем вимірювання механічних величин : дис. ... д-ра техн. наук. : 05.11.01. Київ, 2019. 276 с.
5. Van Trees Harry L. Detection, Estimation, and Modulation Theory. Part 1: Detection, Estimation, and Linear Modulation Theory. John Wiley & Sons, Inc., 2001. 690 p. doi: <https://doi.org/10.1002/0471221090>
6. Udd Eric, Spillman William. Fiber optic sensors an Introduction for Engineers and Scientists. John Wiley & Sons, Inc., 2011. 506 p. doi:<https://doi.org/10.1002/9781118014103>
7. Judd G., Steenkiste P. Design and implementation of an RF front end for physical layer wireless network emulation. *2007 IEEE 65th Vehicular Technology Conference-VTC2007-Spring*. IEEE, 2007. P. 974–979.
8. Poulichet P., Costa F., Laboure E. High-Frequency Modeling of a Current Transformer by Finite-Element Simulation. *IEEE Transactions on Magnetics*. 2003. Vol. 39(2). P. 998–1007.
9. Redfer M. A., Terry S. C., Robinson F. V. P., Bo Z. Q. Laboratory Investigation into the use of MV Current Transformers for Transient Based Protection. *International Conference on Power Systems Transients. IPST 2003 in New Orleans, USA*.
10. Choi T. J., Ahn C. W., An J. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm for global numerical optimization. *The Scientific World Journal*. 2013. Vol. 2013. 12 p. doi: 10.1155/2013/969734
11. Choi Tae Jong, Ahn C. W. An adaptive Cauchy differential evolution algorithm with bias strategy adaptation mechanism for global numerical optimization. *Journal of Computers*. 2014. Vol. 9, No 9. P. 2139–2145. doi: 10.4304/cp.9.9.2139-2145.
12. Gardner M. C. et al. Challenges and solutions for high performance SWIR lens design. *Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XIII*. International Society for Optics and Photonics, 2016. Vol. 9987. P. 99870C.
13. Gross H., Zugge H., Peschka M., Blechinger F. *Handbook of Optical Systems: Vol. 3. Aberration Theory and Correction of Optical Systems*. Edited by Herbert Gross. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim, 2007. ISBN 978-3527403790.
14. Eiben A., Smith J. *Introduction to Evolutionary Computing*; Springer-Verlag: Berlin, 2003. 300 p.
15. Haupt R., Haupt S. *Practical Genetic Algorithms*. Wiley-Interscience; 2 edition. 2004. 272 p.

#### **Shornikova S.V. OPTICAL SYSTEM MEASURING OF DISTANCES BETWEEN OBJECTS: PRINCIPLES OF REALIZATION**

*A study of the principles of implementation of the optical system for measuring the distance between objects. The structure of an optical system for measuring the distance between objects, which consists of one or more cameras, which can be both digital and analog, with the appropriate optics for image acquisition, is also proposed, the structure also includes a means for illumination and the object distance to which / from which it is measured, input / output equipment or communication channels for output of the obtained results. An algorithm for estimating the distance and linear dimensions of linear objects by an optical system has been developed. The schematically presented algorithm is substantiated by mathematical expressions and supported by a description of the process of setting up an optical system for measuring the distance between objects. It is emphasized that the algorithm for estimating the distance and linear dimensions of linear objects with an*

*optical system for measuring the distance between objects includes solving three main tasks: determining the focal lengths of video cameras, determining the angular deviations of video cameras and determining linear deviations of video cameras. It is emphasized that the auxiliary operations in the determination are image pre-processing, selection of a calibration object for calibration of angular deviations and focal lengths, and selection of a calibration object for calibration of linear deviations. The principles of installation of video cameras of optical system of measurement of distance between objects are schematically represented. It is noted that the representation of the obtained dimensions by the optical system for measuring the distance between objects is directly from the cameras on the monitor screen, and the input of graphic information is performed according to the following algorithm: search for images on the camera, selection of image elements to be encoded. digital form and transfer of the digital description of the image elements to a personal computer for further processing.*

**Key words:** *optical system, video camera, implementation, object, measurement, distance, calibration.*



# РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

UDC 621.396.7

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/09>**Ikhsanov Sh.M**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

**Diakonov O.S.**

Admiral Makarov National University of Shipbuilding

## 8-APSK SIGNAL CONSTELLATION OPTIMIZATION OF THE DVB-S2X STANDARD

*Analysis of 8-APSK signal constellation of the DVB-S2X standard showed that the distance between symbols 0 and 4 is more than 2 times less than the distances between other adjacent symbols of the constellation. This arrangement of symbols leads to distortion of symbols 0 and 4 in the presence of interference in the data channel.*

*To eliminate this drawback, the authors proposed a variant of the uniform distribution of symbols on two circles. Simulations have shown that this distribution of symbols on the complex plane results in a gain of almost 6 dB at a BER of  $10^{-4} - 10^{-5}$ .*

*It has also been shown that increasing the distance between symbols 0 and 4 in a standard constellation, in which symbols 0, 3, 4, 7 are evenly spaced along the real axis of the complex plane, gives the same result in terms of efficiency as the constellation suggested by the authors.*

*An experimental comparison of the standard and proposed constellations was carried out at a frequency of 1.7576 GHz using two ADALM-PLUTO SDR transceivers. The information was transmitted in packets with a length of 1024 symbols (without taking into account the Barker code) with pauses between packets with duration of 1/16 of the packet length. The symbol rate used was 100 kHz, that is, the symbol duration was 10  $\mu$ s.*

*When transmitting and receiving a signal the total sampling rate was 400 kHz. The number of samples in one frame was chosen on the basis of guaranteed reception of at least 3 packets (17616). Note that in all cases of data transmission between two ADALM-PLUTO SDRs, there was a frequency shift of about 2.5 kHz.*

*As a result of the experiment, the gain in the number of corrupted bits from the proposed uniform placement of symbols on the complex plane was 19.8 times with attenuation of -50 dB; 3.3 times at -52 dB and 8.2 times at -54 dB. The study of a real transmission channel using the ADALM-PLUTO SDR platform showed that, on average, for all communication sessions the number of errors decreased by almost 8 times.*

**Key words:** DVB-S2X standard, APSK modulation, signal constellation, MATLAB, ADALM-PLUTO SDR, phase synchronization.

### Overview of recent research and publications.

The abbreviation of the DVB-S2 standard stands for Digital Video Broadcasting via Satellite, Second Generation. Amplitude phase shift keying (APSK) modulation is widely used in digital communication [1, p. 212]. Despite the relative simplicity of signal constellations, their optimization for various communication channels continues to attract the attention of specialists. Often the reasons for optimization are various nonlinearities of the receiving equipment [2, pp. 295-311; 3, 10-13] or even features of signal processing [4, pp. 351-360]. At the same time, in paper [3, 10-13] the authors propose to improve the characteristics of communication system only by renumbering the constellation symbols.

**Problem statement.** The purpose of this paper is to compare the efficiency of the DVB-S2 standard 2+4+2APSK constellation and the proposed constellation with a uniform distribution of symbols on the complex plane. The efficiency evaluation was carried out both on the simplified model of the data transmission channel and on the real channel using the ADALM-PLUTO SDR transceivers.

**Presentation of the main research material.** Conversion of digital information into a complex signal with APSK-modulation is implemented in Matlab by the `dvbsapskmod()` function [5, p. 535] and for an eight symbol alphabet (2 + 4 + 2) the signal constellation is shown in figure 1.

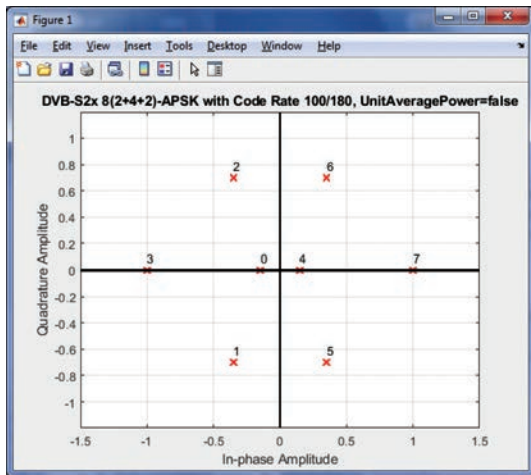


Fig. 1. 8-APSK signal constellation of the DVB-S2X standard, implemented in Matlab

The figure clearly shows that the distance between symbols 0 and 4 is more than 2 times less than between other neighboring symbols, which, when exposed to interference, will lead to distortion, primarily of these symbols. Referring to the European standard [6, p. 26] shows that the Matlab function is implemented in full compliance with standard.

In this paper, a variant of the symbol arrangement by 4 on the inner and outer circles with a phase shift of 45 degrees between symbols placed in different circles is studied. The radius of the outer circle, as in Figure 1, is taken as one unit (figure 2).

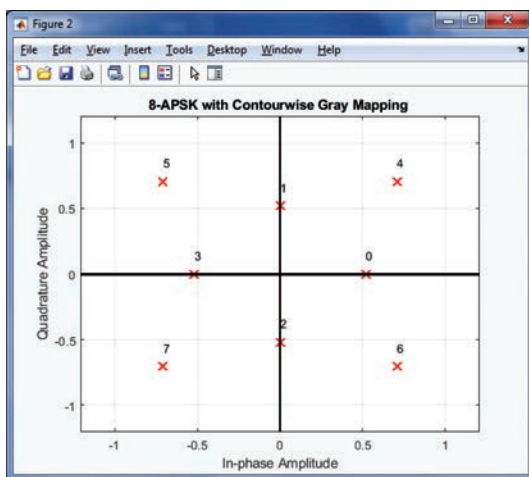


Fig. 2. Proposed constellation for 8-APSK modulation

The radius of the inner circle is taken equal to 0.5176 based on the requirement that the three symbols 0, 1, 4 form an equilateral triangle.

The efficiency of the two considered variants of the signal constellation for 8-APSK modulation was compared on a real data transmission channel using two ADALM-PLUTO SDR platforms [7, pp. 271-300].

First, we present the results of a simplified simulation that makes it easy to plot the dependence of the bit error ratio (BER) on the signal-to-noise ratio (SNR). The model does not introduce a frequency offset and only a signal is present on the amplitude sweep, i.e. there is no need for time synchronization either. A random phase offset that changes the symbol numbering without changing the coordinates of the constellation points is generated. This offset is a multiple of  $\pm\pi$  for the DVB-S2X variant, and a multiple of  $\pm\pi/2$  for the proposed variant of constellation. The elimination of such an offset is carried out by the Barker code 13 embedded before the header of the information block. Additive white Gaussian noise (AWGN) is superimposed on the generated complex signal. The simulation took into account that the average signal power over the proposed constellation is 0.5 dB higher. The SNR was measured using the squares of the signal and noise amplitudes, i.e. over the entire quantization frequency band. Since the `dvbsapskmod()` function does not allow arbitrary placement of symbols on the complex plane, the `apskmod()` function was used to generate the proposed more uniform placement of symbols. The both corresponding demodulation functions `dvbsapskdemod()` and `apskdemod()` do not normalize the average amplitude of the received signal to the average amplitude of the constellation. Thus, when the signal is attenuated it leads to significant destruction of the transmitted data. Moreover, even after the necessary normalization, the signal demodulation using `apskdemod()` function occurs with errors, leading in some cases to an increase in BER by more than 40 times relative to the potentially achievable value. Minor deviations (up to 18%) are also observed in the `dvbsapskdemod()` function, therefore, for both signal variants, the own authors' demodulation functions are used, assigning the bits of the nearest symbol of the original constellation to the complex signal sample. Figure 3 shows the implementation of the signal constellation for the two considered types of modulation for SNR of 16 dB. The white dots in the figures show the initial locations of the symbols, so that for both variants the normalization was performed correctly.

It is clearly seen that for the DVB-S2 standard the signal samples for the two internal symbols 0 and 4 strongly overlap. If for the proposed constellation the number of bad bits is 90 out of  $10^6$ , then for the standard constellation they are 2 orders of magnitude more.

A complete comparative characteristic of the two variants of the constellation is shown in figure 4.

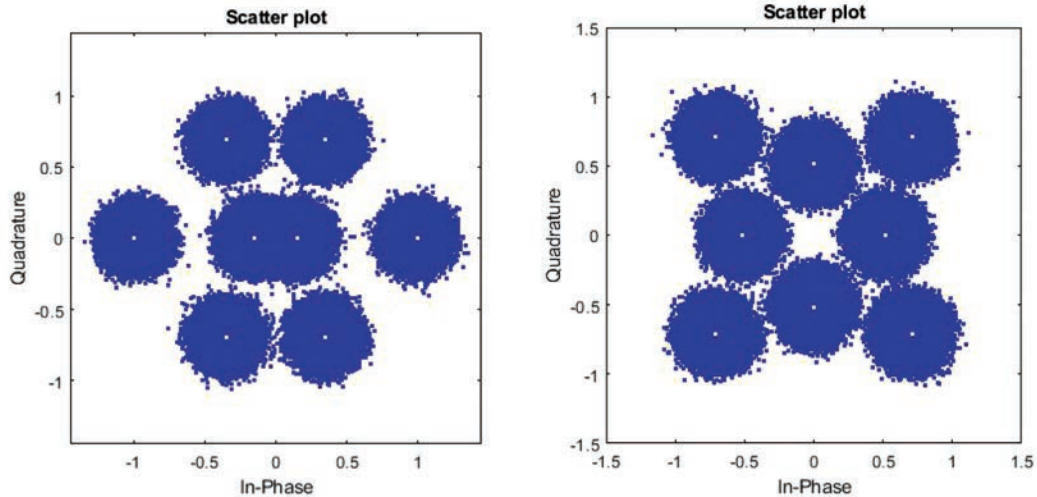


Fig. 3. Realization of a constellation for the two considered types of modulation with SNR of 16 dB

The uniform distribution of symbols on the complex plane leads to a gain of almost 6 dB at the BER level of  $10^{-4}$ - $10^{-5}$ . The authors also conducted an additional study of the signal constellation, in which, relative to the DVB-S2X standard, the central symbols 0 and 4 are spaced apart to 1/3, which ensures a uniform arrangement of symbols 0, 3, 4, 7 on the real axis. The implementation of such a signal constellation with the same signal-to-noise ratio of 16 dB as in Figure 3 is shown in figure 5.

Modelling of such a constellation has shown that in terms of efficiency it is practically equivalent to the proposed version of the uniform distribution of symbols on two circles. During the simulation a software error was found in the `dvbsapskmod()` function, which leads to the permutation of characters in pairs (1,2) and (5,6) when feeding a vector string to the input. Figure 1 corresponds to the standard and is generated when the column vector is fed to the input.

The software for the ADALM-PLUTO SDR transceivers based on QPSK modulation [7, pp. 239-265], available at the Department of Programmable Electronics, Electrical Engineering and Telecommunications (PEET), has been modified to use 8-APSK signals. To simplify the software improvements, the Reed-Solomon correction code, scrambling and interleaving have been removed from the program. The DVB-S2X standard uses symbols 7 and 3 to embed the Barker code into the transmitted signal, for the proposed constellation symbols 4 and 7 are used for this purpose. The basic program with QPSK modulation uses Matlab `comm.CarrierSynchronizer()` function for phase synchronization, which is only intended for 8-PSK, BPSK, OQPSK, PAM, QPSK, and some QAM signals. Therefore, the phase synchronization

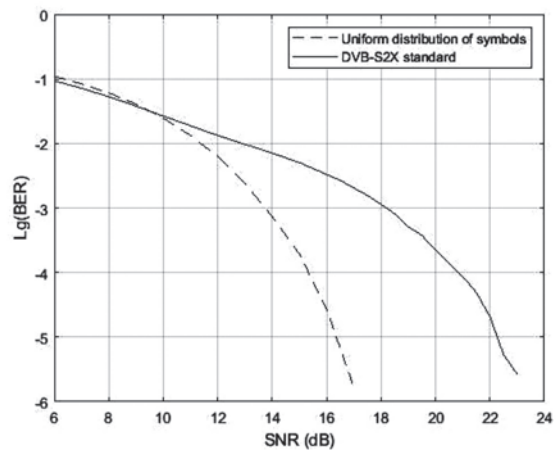


Fig. 4. Dependence of BER on SNR for two variants of signal constellations

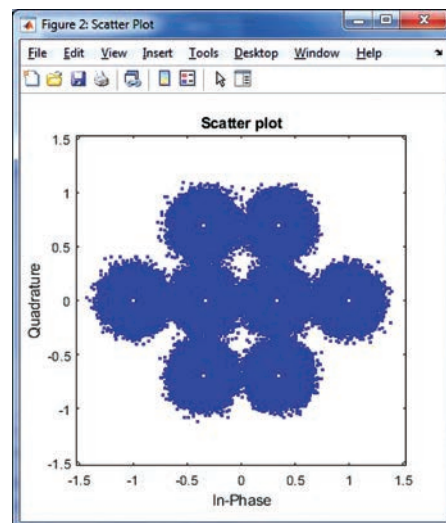


Fig. 5. Implementation of the DVB-S2X signal constellation with uniform arrangement of symbols on the real axis

Table 1

| Packet No | -50 dB ( $q=23,6$ dB) |       | -52 dB ( $q=22,0$ dB) |       | -54 dB ( $q=19,7$ dB) |       |
|-----------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|-----------------------|-------|
|           | APSK1                 | APSK2 | APSK1                 | APSK2 | APSK1                 | APSK2 |
| 1         | 59                    | 7     | 20                    | 0     | 116                   | 0     |
| 2         | 52                    | 7     | 20                    | 2     | 116                   | 0     |
| 3         | 53                    | 8     | 25                    | 1     | 147                   | 0     |
| 4         | 7                     | 0     | 16                    | 0     | 17                    | 0     |
| 5         | 6                     | 1     | 22                    | 0     | 16                    | 0     |
| 6         | 0                     | 0     | 16                    | 0     | 18                    | 0     |
| 7         | 40                    | 0     | 14                    | 0     | 9                     | 37    |
| 8         | 43                    | 0     | 18                    | 0     | 10                    | 21    |
| 9         | 37                    | 0     | 24                    | 0     | 12                    | 27    |
| 10        | 55                    | 0     | 21                    | 26    | 78                    | 0     |
| 11        | 54                    | 0     | 19                    | 26    | 74                    | 0     |
| 12        | 50                    | 0     | 19                    | 15    | 86                    | 0     |
| Total     | 456                   | 23    | 234                   | 70    | 699                   | 85    |

function **PhaseSynchr()** has been developed by the authors. The idea of **PhaseSynchr()** function is to build a histogram of the phase distribution of the received signal and compare it with the basic histogram at zero phase offset. The basic histograms for the two considered variants of the signal constellation are different and obtained using the corresponding models.

The experimental comparison of the two considered signal constellations was carried out at a frequency of 1.7576 GHz. The information was transmitted in 1024-symbol packets (excluding the Barker code) with pauses between packets lasting 1/16 of the packet length. The symbol rate was 100 kHz, i.e. the duration of the symbol transmission was 10  $\mu$ s. The quantization frequency was 400 kHz. The number of samples in one frame was chosen based on the guaranteed reception of at least 3 packets (17616). Note that in all communication sessions, a frequency offset between two ADALM-PLUTO SDRs of about 2.5 kHz was observed.

A graphical interpretation of one of the data transmission sessions is shown in figure 6.

The amplitude sweep is shown after filtering (root of raised cosine) with 2x quantization frequency reduction and Barker code convolution. The sweep clearly shows the Barker code samples at the packet header that determine the start of the packets and perform the final phase synchronization. The constellation realizations are shown after removing the offset in frequency, time, and phase. The frequency offset is estimated from the 6<sup>th</sup> power of the signal spectrum using the whole frame for the DVB-S2X standard and from the 8<sup>th</sup> power of signal spectrum for uniform distribution of symbols. The number of corrupted bits in data transmission is shown in table 1.

The upper row of Table 1 shows the attenuation of the transmitter signal and the measured average SNR  $q$ . For each attenuation value, 4 communication sessions were conducted with the transmission of three data packets in each session. Communication sessions using different constellations were interleaved to provide the closest interference conditions. The table shows the number of corrupted bits in each packet. Column APSK1 corresponds to the DVB-S2X standard constellation, APSK2 – to the uniform distribution of symbols.

It is clear that for both versions of the constellation in a real channel, additional signal energy is required to achieve the same BER. For example, according to Table 1, with an average SNR of  $q=19.7$  dB BER was  $2.3 \times 10^{-3}$  for a uniform distribution of symbols, while in simulation this value is achieved at 13 dB. A significant spread of data is primarily due to the time synchronization procedure, at the input of which we have 2 samples per symbol and choose even or odd ones from them in accordance with the minimum variance of the amplitudes. The method gives a good result if one of the samples is obtained close to the middle of the symbol duration interval. Matlab includes the **comm.SymbolSynchronizer()** function, which also solves this problem and operates in parallel in the software program [7, pp. 256-260]. However, for some packages, this function almost completely destroys the information. So out of 36 packets in the experiment carried out, 8 were destroyed (more than 1000 corrupted bits in a packet), it is very possible that these are software errors. For packets free from these errors, the function provides about 2 times less corrupted bit rate in comparison with the method of selecting even or odd samples.

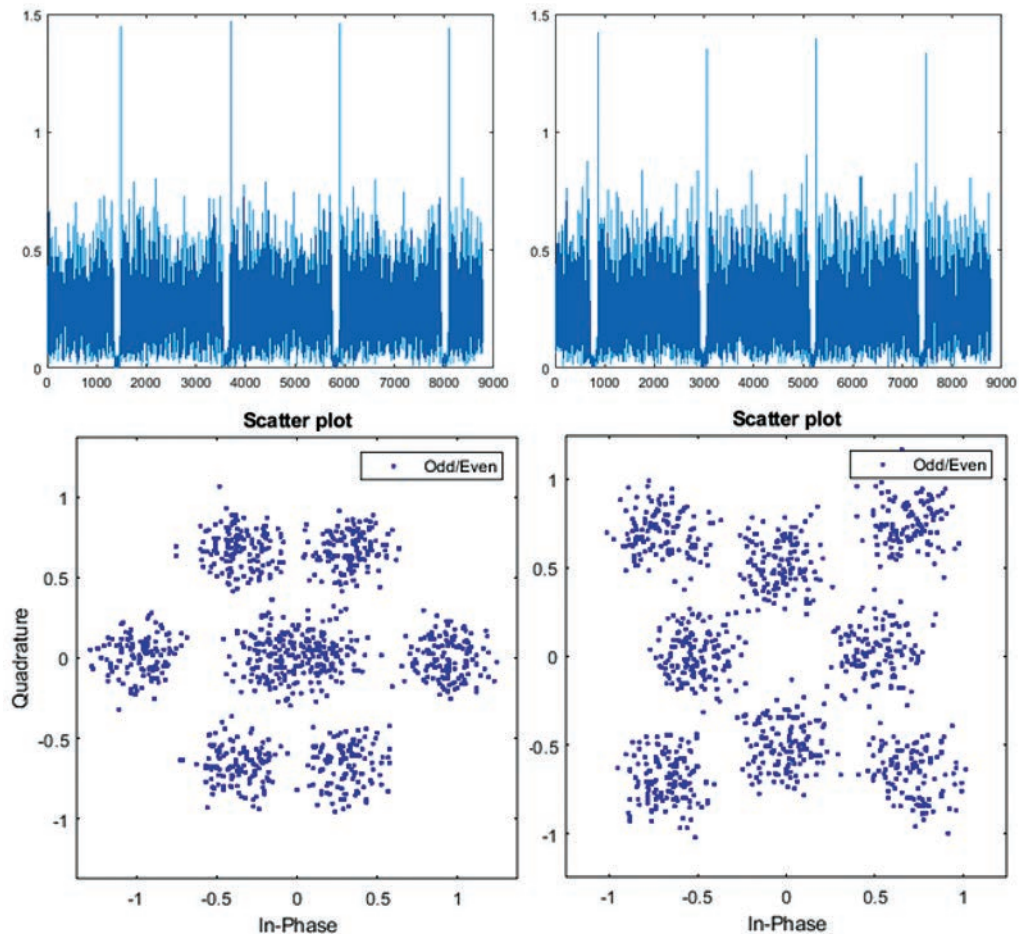


Fig. 6. Amplitude sweeps of data packets and realizations of the compared signal constellations

**Conclusions.** The gain in the number of corrupted bits from the uniform distribution of symbols on the complex plane in accordance with Table 1 was 19.8 times with attenuation of -50 dB; 3.3 times at -52 dB and 8.2 times at -54 dB. On average, the number of errors

has decreased by almost **8 times** for all communication sessions. We emphasize once again that the efficiency of the two variants of constellation can significantly depend on the processing methods used in the receiving channel and the characteristics of the interference.

#### References:

1. Telecommunications Industry Association Standard. IP over Satellite (IPOS). TIA-1008, Revision B. – USA, May 2012. – 314 p.
2. Wonjin Sung, Seokheon Kang, Pansoo Kim, Dae-Ig Chang. Performance analysis of APSK modulation for DVB-S2 transmission over nonlinear channels. — November 2009, International Journal of Satellite Communications and Net-working 27(6): pp. 295–311, DOI: 10.1002/sat.938.
3. Jae-Hyun Kim, Cheon Sig Sin, Sang Uk Lee, & Jae Hoon Kim. Improved performance of APSK modulation scheme for satellite system. — 2007 6th International Conference on Information, Communications & Signal Processing: pp. 10–13, doi:10.1109/iccis.2007.4449734.
4. Mustafa Eroz, Lin-Nan Lee, Nabil Loghin, Ulrik De Bie, Frederik Simoens, Daniel Delaruelle. New DVB-S2X constellations for improved performance on the satellite channel. — INTERNATIONAL JOURNAL OF SATELLITE COMMUNICATIONS AND NETWORKING Int. J. Satell. Commun. Network, 2016; 34: pp. 351–360. DOI: 10.1002/sat.1135.
5. Robert W. Stewart, Kenneth W. Barlee, Dale S.W. Atkinson, Louise H. Crockett. Software Defined Radio using MATLAB & Simulink and the RTL-SDR. // University of Strathclyde, Glasgow, Scotland, UK, 2015, 674 p.
6. Digital Video Broadcasting (DVB); Second generation framing structure, channel coding and modulation systems for Broadcasting, Interactive Services, News Gathering and other broadband satellite applications; Part

2: DVB-S2 Ex-tensions (DVB-S2X) – Draft ETSI EN 302 307-2 V1.1.1 (2014-10). – [Електронний ресурс]. URL: <http://www.etsi.org>.

7. Ихсанов Ш.М., Рябенський В.М., Дьяконов О.С. Исследование сигналов реальных информационных систем с использованием приемников RTL-SDR. LAP LAMBERT Academic Publishing Riga, Latvia, 2020. 317 с. ISBN: 978-620-0-09264-9. URL: <https://www.amazon.com/Исследование-сигналов-реальных-информационных-истем/dp/6200092648>.

### **Ихсанов Ш.М., Дьяконов О.С. ОПТИМІЗАЦІЯ СИГНАЛЬНОГО СУЗІР'Я МОДУЛЯЦІЇ 8-APSK СТАНДАРТУ DVB-S2X**

*Аналіз сигнального сузір'я модуляції 8-APSK стандарту DVB-S2X показав, що відстань між символами 0 і 4 більше ніж у два рази менша порівняно з відстанями між іншими сусідніми символами сузір'я. Таке розміщення символів призводить до спотворення символів 0 і 4 за впливу перешок на канал передачі даних.*

*Для усунення даного недоліку авторами запропонований варіант рівномірного розподілу символів на двох колах. Моделювання виявило, що такий розподіл символів на комплексній площині призводить до виграшу майже в 6 дБ за рівнем BER  $10^{-4}$ - $10^{-5}$ .*

*Також було показано, що збільшення відстані між символами 0 і 4 у стандартному сузір'ї, за якого символи 0, 3, 4, 7 рівномірно розташовані на дійсній осі комплексної площини, дає такий самий результат по ефективності, що і запропоноване авторами сузір'я.*

*Експериментальне порівняння стандартного і запропонованого сузір'їв проводилося на частоті 1,7576 ГГц із використанням двох прийомо-передавачів ADALM-PLUTO SDR. Інформація передавалася пакетами довжиною 1024 символів (без урахування коду Баркера) з паузами між пакетами тривалістю 1/16 від довжини пакета. Частота зміни символів використовувалася 100 кГц, тобто тривалість передачі символу становила 10 мкс. Під час передачі і прийому сигналів використовувалася 4-кратна надмірність частоти квантування, тобто повна частота квантування становила 400 кГц. Кількість відліків в одному фреймі було вибрано з розрахунку гарантованого прийому не менше трьох пакетів (17616). Відзначимо, що у всіх сенсах зв'язку спостерігався зсув частот між двома ADALM-PLUTO SDR близько 2,5 кГц.*

*У результаті експерименту виграш за кількістю збійних біт від запропонованого рівномірного розміщення символів на комплексній площині становив 19,8 рази за ослаблення -50 дБ; 3,3 рази – з  $a$  -52 дБ і 8,2 рази – за -54 дБ. Дослідження реального каналу передачі інформації за допомогою платформи ADALM-PLUTO SDR показало, що в середньому по всіх сеансах зв'язку кількість збоїв зменшилася майже у вісім разів.*

**Ключові слова:** стандарт DVB-S2X, APSK-модуляція, сигнальне сузір'я, MATLAB, ADALM-PLUTO SDR, синхронізація фази.

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/10>**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

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

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Сушин І.О.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ КОНСТРУЮВАННЯ  
КЕРУВАННЯ РУХОМ РОЗПОДІЛЕНОГО  
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО РОБОТА**

*У статті розглянуто теоретичні основи конструювання керування рухом розподіленого інформаційно-телекомунікаційного робота (РІТР), який розглядається як складена динамічна система (СДС), що пересувається по розгалуженій траєкторії з довільною схемою розгалужень.*

*Указано на те, що, узагальнюючи фізичний зміст функціонування мобільних безпроводових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами, їх можливо віднести до класу розподілених (кластерних) інформаційно-телекомунікаційних роботів.*

*Показано, що під час виконання інформаційно-телекомунікаційних функцій, які покладено на РІТР, структура та інформаційно-телекомунікаційні властивості мультисенсорів змінюються в реальному часі (змінюються кількість сенсорів, що входять до складу ситуативно створеного мультисенсора, головний сенсор у складі мультисенсора, а також запас енергії акумуляторної батареї кожного сенсора, обсяг службової і прикладної інформації, яку потрібно передавати через телекомунікаційні аероплатформи у центр керування, і т. д.). Зміна властивостей системи у реальному часі потребує оперативного розрахунку раціональних дій, які керують системою. Таким чином, загальний просторовий рух РІТР являє собою розгалужену траєкторію з довільною схемою розгалужень. Системний підхід до керування РІТР вимагає застосування методів керування складеними динамічними системами, які б дали змогу раціонально і при цьому оперативно узгоджувати рух усіх елементів РІТР (і мобільних сенсорів, і телекомунікаційних аероплатформ).*

*Запропоновано умови аналітичного або алгоритмічного конструювання законів керування розподіленим інформаційно-телекомунікаційним роботом, який розглядається як складена динамічна система, на основі використання функціоналу узагальненої роботи О.А. Красовського. Використання функціоналу О.А. Красовського дало змогу сформулювати умови, які дають можливість конструювати керування РІТР не лише на етапі попереднього синтезу розгалужених траєкторій його руху, а й під час оперативного синтезу, тобто в процесі нормального функціонування РІТР. Запропонований рекурентний алгоритм аналітичного конструювання за О.А. Красовським дає змогу повною мірою використовувати обчислювальні процедури, розроблені для вирішення відомих рівнянь аналітичного конструювання за функціоналом узагальненої роботи.*

**Ключові слова:** мобільна сенсорна мережа, інформаційно-телекомунікаційний робот, складена динамічна система, сенсори, розподілені сенсори, телекомунікаційна аероплатформа.

**Постановка проблеми.** Моніторинг територій із розташованою на них критичною інфраструктурою можливо ефективно виконувати з використанням мобільних сенсорних мереж із телекомунікаційними платформами [1]. Узагальнюючи фізичний зміст функціонування мобільних бездротових сенсорних мереж із телекомунікаційними аероплатформами, можливо віднести їх до класу розподілених (кластерних) інформаційно-телекомунікаційних роботів [2; 3].

Критичною інфраструктурою називають такі засоби, обладнання, мережі та служби, які у разі їх пошкодження чи руйнування будуть значно впливати на здоров'я, безпеку, економічний стан чи ефективне функціонування як окремих об'єктів, так і регіону та країни у цілому. Така інфраструктура у разі її незахищеності може бути вразливою до дій катастроф природного характеру чи спричинених діяльністю людини, а також терористичних атак. Захист критичної інфраструктури є ключовим у заходах цивільного планування будь-якої країни [4; 5]. Таким чином, виникає гостра необхідність розроблення ефективних засобів попередження надзвичайних ситуацій із використанням перспективних інформаційно-телекомунікаційних технологій – розподілених інформаційно-телекомунікаційних роботів (РІТР).

Завдяки використанню РІТР у зоні надзвичайної ситуації (НС) та (або) на об'єктах критичної інфраструктури з'явиться можливість завчасно виявляти уражаючи чинники НС, прогнозувати та приймати рішення з ліквідації небезпеки, що виникла, та своєчасно залучати до реагування чергові підрозділи ДСНС України та інших державних силових структур.

Фактично РІТР – це безпроводова сенсорна мережа з мобільними сенсорами та телекомунікаційними аероплатформами, які узгоджено (раціонально) пересуваються у просторі. Мобільні сенсори збираються у кластери, які можна характеризувати як розподілені мультисенсори. Під час виконання інформаційно-телекомунікаційних функцій, які покладено на РІТР, структура та інформаційно-телекомунікаційні властивості мультисенсорів змінюються в реальному часі (змінюються кількість сенсорів, що входить до складу ситуаційно створеного мультисенсора, головний сенсор у складі мультисенсора, а також запас енергії акумуляторної батареї кожного сенсора, обсяг службової і прикладної інформації, яку потрібно передавати через телекомунікаційні аероплатформи у центр керування, і т. д.). Зміна властивостей системи у реальному часі потре-

бує оперативного розрахунку раціональних дій, які керують системою. Таким чином, загальний просторовий рух РІТР являє собою розгалужену траєкторію з довільною схемою розгалужень [6]. Системний підхід до керування РІТР вимагає застосування методів керування складеними динамічними системами (СДС) [7], які б дали змогу раціонально і при цьому оперативно узгоджувати рух усіх елементів РІТР (і мобільних сенсорів, і телекомунікаційних аероплатформ).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сьогодні бездротова сенсорна мережа (мобільна чи стаціонарна) розглядається окремо від телекомунікаційної платформи. Уважається, що телекомунікаційна аероплатформа виконує допоміжну функцію щодо підтримки зв'язності сенсорної мережі або підвищення її пропускну здатності, або функціональної живучості чи стійкості, або виконує деякі допоміжні функції стосовно сприяння більш точному визначенню координат сенсорів, або подовженню часу життя мережі, або створенню нових чи більш продуктивних маршрутів передачі інформації. Окрім того, телекомунікаційна аероплатформа може використовуватися для збору інформації з вузлів сенсорної мережі. Цілісний (системний) підхід до пошуку в реальному часі раціонального керування рухами всіх елементів сенсорної мережі і телекомунікаційних аероплатформ як єдиної системи з урахуванням усіх видів обмежень, ураховуючи і телекомунікаційні обмеження, поки що жодного разу не застосовувався. Такий підхід конче потрібен у ситуації, коли потрібна точна оперативна інформація про потерпілих у зоні надзвичайної ситуації в умовах практично повного руйнування інфраструктури (пожежі, землетруси, цунамі, торнадо і т. д.). Ця інформація може бути отримана завдяки використанню сенсорів, розміщених на БПЛА (мобільних сенсорів), що утворюють «літаючу сенсорну мережу». Актуальною є проблема оперативної оптимізації «групової поведінки» (оптимізація розгалуженої траєкторії руху) мобільних сенсорів в агресивному середовищі, яке виникає під час надзвичайної ситуації. Алгоритм оперативної оптимізації програмується у бортовому комп'ютері телекомунікаційної платформи, яка керує рухом мобільних сенсорів. Успіх проведення пошуково-рятувальної операції визначається в першу чергу узгодженістю «групової поведінки» елементів РІТР, що, наприклад, побудований на базі «літаючої сенсорної мережі» з телекомунікаційними аероплатформами. РІТР повинен надавати актуальну та якісну (своєчасну і достовірну)



інформацію про потерпілих та необхідну для них термінову допомогу. Неузгодженість «групової поведінки» мобільних сенсорів і телекомунікаційних платформ у складі РІТР може призвести до повного зриву рятувальної операції [8–15].

**Постановка завдання.** РІТР розглядається як складена динамічна система (СДС), що пересувається по розгалуженій траєкторії з довільною схемою розгалужень. Ефективність функціонування СДС залежить від оперативного (у реальному масштабі часу) оптимального вибору просторових координат і моментів часу, у які відбуваються структурні перетворення СДС, а також від оперативного оптимального синтезу керування складовими елементами СДС під час їх руху гілками траєкторії в інтервалах часу між структурними перетвореннями. Завдання полягає у розробленні умов, що дають змогу оперативно (у реальному масштабі часу) конструювати (будувати або синтезувати) керування телекомунікаційними аероплатформами та мобільними сенсорами, що входять до складу розподіленого інформаційно-телекомунікаційного робота.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Згідно із [7], задача оптимізації довільно розгалуженої траєкторії руху СДС зводиться до вирішення задачі оптимізації розривної системи зі змінним розміром векторів стану та керування. Метод динамічного програмування дає змогу вирішити цю задачу в такій постановці:

$$I = I(t_0, \dots, t_N; {}_1X(t_0^+), \dots, {}_N X(t_N^-); {}_1X(t_1^-), \dots, {}_N X(t_N^+); {}_1X(\cdot), \dots, {}_N X(\cdot); {}_1U(\cdot), \dots, {}_N U(\cdot)) = S_0({}_1X(t_0^+), t_0) + \sum_{i=1}^N I_i \rightarrow \inf, \quad (1)$$

де

$$({}_1X(t_0^+), t_0) \in B_0, \quad ({}_N X(t_N^-), t_N) \in B_N; \quad (2)$$

$$({}_i X(t_i^-), {}_{i+1} X(t_i^+), t_i) \in B_i, \quad i = \overline{1, N-1}; \quad (3)$$

$$({}_i X(t), {}_i U(t)) \in W_i(t), \quad t \in [t_{i-1}^+, t_i^-], \quad i = \overline{1, N}; \quad (4)$$

$${}_i \dot{X} = {}_i F({}_i X, {}_i U, t), \quad t \in [t_{i-1}^+, t_i^-], \quad i = \overline{1, N}; \quad (5)$$

$${}_i X \in E^{m_{2i}}, \quad {}_i U \in E^{m_{1i}}, \quad (i = \overline{1, N}), \quad t_i \in E \quad (i = \overline{0, N}); \quad (6)$$

${}_i U(t)$  – кусково-неперервне керування,  $t_{i-1}^+ \leq t \leq t_i^-$ ,

$${}_i U(t) = {}_i U(t+0) = \lim_{\tau \rightarrow t+0} {}_i U(t),$$

$$I_i = S_i({}_i X(t_i^-), {}_{i+1} X(t_i^+), t_i) + \int_{t_{i-1}^+}^{t_i^-} \Phi_i({}_i X, {}_i U, t) dt \quad (i = \overline{1, N-1}),$$

$$I_N = S_N({}_N X(t_N^-), t_N) + \int_{t_{N-1}^+}^{t_N^-} \Phi_N({}_N X, {}_N U, t) dt, \quad (7)$$

$B_0, B_N, B_i, (i = \overline{1, N-1}), W_i(t), (i = \overline{1, N})$  – задані підмножини відповідно з  $E^{m_{2i}} \times E^l, E^{m_{2N}} \times E^l$ ,

$E^{m_{2i}} \times E^{m_{2i+1}} \times E^l (i = \overline{1, N-1}), E^{m_{2i}} \times E^{m_{2i}}, (i = \overline{1, N})$ . Як і в підрозділі 1.1, запис  $f(t_i^+)$  або  $f(t_i^-)$  ( $i = \overline{1, N}$ ) показує, що значення функції розглядається в момент часу  $t = t_i^+ = t_i + 0$  або  $t = t_i^- = t_i - 0$ , тобто відразу праворуч від  $t_i$  або відразу зліва від  $t_i$ . Аналогічний сенс має запис  $t \in [t_{i-1}^+, t_i^-]$  ( $i = \overline{1, N}$ ), тобто  $t \in [t_{i-1} + 0, t_i - 0]$  – розглядається інтервал часу від моменту праворуч від  $t_{i-1}$  до моменту зліва від  $t_i$ .

Через  $D_i({}_i X(t), t_{i-1}, t_i)$  ( $i = \overline{1, N}$ ) позначимо множини всіх допустимих керувань  ${}_i U(\cdot)$ , визначених на відрізку  $[t_{i-1}^+, t_i^-]$ , що задовольняють умовам (3.4), (3.7) і таких, що траєкторія системи (3.5) задовольняє умовам (3.2)–(3.4) ( $i = \overline{1, N}$ ). За визначенням  $D_i \uparrow 0, i = \overline{1, N}$ . Окрім того, позначимо через  ${}_i X(t), {}_i U(t), t_0, t_i, (i = \overline{1, N}), t_0$  "  $t$  "  $t_N$  один із допустимих процесів задачі (3.1)–(3.7).

Розглянемо задачу (1) – (7), в якій функціонал (1) переписемо у такому вигляді:

$$I = S_0({}_1 X(t_0^+), t_0) + \sum_{i=1}^N I_i \leq A, \quad (8)$$

де  $A = \text{const} > I$ .

Сформульована задача (2) – (8) має безліч рішень. У задачах великої розмірності, що вирішуються оперативно, потрібно отримати якомога швидше одне з рішень, що задовольняють нерівності (8). Концепція оперативного синтезу траєкторій СДС у постановці (2) – (8) має сенс, тому що у цьому разі нас не стільки цікавить строго оптимальний рух, скільки рух, який не виводить за межі існуючих у даний момент часу на борту СДС ресурсів. Немає користі в тому, що синтезована із запізненням оптимальна траєкторія заощадить нам більше ресурсів, ніж неоптимальна, але синтезована швидко і в межах допустимих витрат. Використання методики сумісного синтезу керування за О.А. Красовським і В.М. Буковим [16] є одним зі шляхів вирішення задачі (2) – (8).

Переформулюємо задачу (2) – (8) до виду дво-рівневої задачі оптимізації розгалуженої траєкторії, яка, як було показано в [16], включає у себе як окремий випадок задачу О.А. Красовського:

$$I = S_0({}_1 X(t_0^+), t_0) + \sum_{i=1}^N [I_i + \int_{t_{i-1}^+}^{t_i^-} W_{2,i}(\hat{U}, t) dt] \rightarrow \inf, \quad (9)$$

$$I^* = S_0({}_1 X(t_0^+), t_0) + \sum_{i=1}^N I_i \leq A, \quad (10)$$

$$({}_1 X(t_0^+), t_0) \in B_0, \quad ({}_N X(t_N^-), t_N) \in B_N, \quad (11)$$

$$({}_i X(t_i^-), {}_{i+1} X(t_i^+), t_i) \in B_i (i = \overline{1, N-1}), \quad (12)$$

$${}_i \dot{X} = {}_i \Phi({}_i X, t) + {}_i M({}_i X, t) U, \quad t \in [t_{i-1}^+, t_i^-], \quad (13)$$

$${}_i X \in E^{m_{2i}}, U \in E^{m_{1i}}, W_{2,i} : E^{m_{2i}} \times E^1 \rightarrow E^1 (i = \overline{1, N}), \quad (14)$$

де

$$I_i = S_i(\bar{X}(t_i^-), X(t_i^+), t_i) + \int_{t_{i-1}^+}^{t_i} [Q_i(\bar{X}, t) + P_i(U, t)] dt, \quad (15)$$

$$I_N = S_N(\bar{X}(t_N^-), t_N) + \int_{t_{N-1}^+}^{t_N} [Q_N(\bar{X}, t) + P_N(U, t)] dt, \quad (16)$$

$A > 0$ ;  $U$  та  $W_{2,i}$  – керування відповідно першого і другого рівнів на інтервалі часу  $[t_{i-1}^+, t_i^-]$ .

Нехай

$$\{i X^L(t), i U^L(t), t_0, t_i (i = \overline{1, N}), t_0 \leq t \leq t_N\}, L = 0, 1, 2, \dots$$

– послідовність допустимих процесів задачі (9), (11) – (14).

Теорема 1. Для оптимальності елементів послідовності допустимих процесів необхідно існування таких функцій  $V_i(\bar{X}^L, t), t \in [t_{i-1}^+, t_i^-]$  ( $i = \overline{1, N}$ ), які визначені і неперервні на всіх  $(\bar{X}^L, t)$ , що володіють кусково-неперервними частинними похідними і задовольняють рівнянням

$$-\frac{\partial V_i(\bar{X}^0, t)}{\partial t} = Q_i(\bar{X}^0, t) + \left( \frac{\partial V_i(\bar{X}^0, t)}{\partial \bar{X}^0} \right)_i^T \Phi(\bar{X}^0, t), \quad (17)$$

$$\left( \frac{\partial P_i(\bar{U}^0, t)}{\partial \bar{U}^0} \right)^T + \left( \frac{\partial V_i(\bar{X}^0, t)}{\partial \bar{X}^0} \right)_i^T M(\bar{X}^0, t) = 0, \quad (18)$$

$$W_{2,i}^0 + P_i(\bar{U}^0, t) - \left( \frac{\partial P_i(\bar{U}^0, t)}{\partial \bar{U}^0} \right)_i \bar{U}^0 = 0, L = 0, \quad (19)$$

$$-\frac{\partial V_i(\bar{X}^i, t)}{\partial t} = Q_i(\bar{X}^i, t) + \left( \frac{\partial V_i(\bar{X}^i, t)}{\partial \bar{X}^i} \right)_i^T \Phi(\bar{X}^i, t) - \left[ \frac{\partial}{\partial \bar{U}^{L-1}} \left( \frac{\partial P_i(\bar{U}^{L-1}, t)}{\partial \bar{U}^{L-1}} \right)^T \right]_i \bar{U}^{L-1} \left[ \bar{U}_i^L - \bar{U}^{L-1}(t) \right], \quad (20)$$

$$\left( \frac{\partial P_i(\bar{U}^L, t)}{\partial \bar{U}^L} \right)^T + \left( \frac{\partial V_i(\bar{X}^L, t)}{\partial \bar{X}^L} \right)_i^T M(\bar{X}^L, t) = 0, \quad (21)$$

$$W_{2,i} + P_i(\bar{U}^{L-1}(t), t) - \left( \frac{\partial P_i(\bar{U}^{L-1}, t)}{\partial \bar{U}^{L-1}} \right)_i \bar{U}^{L-1}(t) + R_i(\bar{U}^L, \bar{U}^{L-1}(t), t) = 0; \quad L = 1, 2, \dots; i = \overline{1, N}. \quad (22)$$

Доведення. Безпосередньо з теореми 1 доводиться існування функцій

$$V_i(\bar{X}^L, t), \quad t \in [t_{i-1}^+, t_i^-], i = \overline{1, N}, L = 0, 1, 2, \dots,$$

що задовольняють рівнянням Беллмана

$$-\frac{\partial V_i}{\partial t} = \inf_{(X, U) \in W_i(t)} \left[ \Phi_i(X, U, t) + \left( \frac{\partial V_i}{\partial X} \right)^T F_i(X, U, t) \right]_{i, X} \quad (23)$$

всюди на  $[t_{i-1}^+, t_i^-]$  ( $i = \overline{1, N}$ ), де існують похідні, та пов'язаних граничними умовами

$$V_i(\bar{X}(t_i^-), t_i) = \left[ V_{i+1}(\bar{X}(t_i^+), t_i) + S_{i+1}(\bar{X}(t_i^-), X(t_i^+), t_i) \right]_{(X(t_i^-), X(t_i^+), t_i) \in B_i} \quad (i = \overline{1, N-1}), \quad (24)$$

$$V_N(\bar{X}(t_N^-), t_N) = S_N(\bar{X}(t_N^-), t_N) \Big|_{(X(t_N^-), t_N) \in B_N}, \quad (25)$$

і таких, що задовольняють співвідношенню

$$\hat{I} = \inf_{B_0} \inf_{B_1} \dots \inf_{B_N} \left[ S_0(\bar{X}(t_0^+), t_0) + V_1(\bar{X}(t_0^+), t_0; \bar{X}(t_1^-), \dots, \bar{X}(t_{N-1}^-)) \right]; \quad (26)$$

Далі з (23) отримуємо рівняння (18) і (21) для відшукування оптимального рівняння першого рівня  $i \hat{U}^L(t)$   $L = 0, 1, 2, \dots$ .

Відповідно до методики [16], формуємо рівняння (17), (19), (20), (22) для відшукування функцій  $V_i(\bar{X}^L, t)$  та керування другого рівня  $W_{2,i}^L$   $L = 0, 1, 2, \dots$  на кожному з інтервалів часу  $[t_{i-1}^+, t_i^-]$ . Таким чином, теорема доведена.

Доведена теорема 1 дає рішення дворівневої задачі без урахування нерівності (10). Уведемо для кожного елемента послідовності

$$\{i X^L(t), U^L(t), t_0, t_i (i = \overline{1, N}; L = 0, 1, 2, \dots), t_0 \leq t \leq t_N\}$$

перевірку виконання умови (10).

У результаті кожен з елементів послідовності допустимих процесів задачі (9), (11) – (16), що задовольняє нерівності (10), може бути прийнятий за рішення задачі (10) – (14). Відзначимо, що властивості допустимої послідовності, отриманої в результаті рішення задачі (9), (11) – (14) рекурентним методом О.А. Красовського, в кожному конкретному випадку вимагають додаткового дослідження.

**Наслідок 1. Конструювання траєкторії руху складеної динамічної системи зі схемою розгалуження, що містить центральну і бічні гілки, без взаємодії підсистем після розділення**

Поставимо задачу оптимізації траєкторії СДС у вигляді:

$$I = \sum_{i=1}^K \left[ I_i + \int_{t_{i-1}}^{t_i} W_{2,i}(\hat{u}(t), t) dt + \sum_{j=1}^n \left[ I_{ij} + \int_{t_i}^{t_{ij}} W_{2,ij}(\hat{u}(t), t) dt \right] \right] \rightarrow \inf, \quad (27)$$

$$I^* = \sum_{i=1}^K \left( I_i + \sum_{j=1}^n I_{ij} \right) \leq A, \quad (28)$$

$$(\beta x(t_\beta), t_\beta) \in Q_\beta, \quad (29)$$

$$\beta \dot{x} = \beta \varphi(\beta x, t) + \beta \mu(\beta x, t), \beta u, t \in [t_\beta^*, t_\beta], \quad (30)$$

$$\beta x \in E^n, \beta u \in E^{m_\beta}, W_{2,\beta} : E^{m_\beta} \times E^1 \rightarrow E^1, \quad (31)$$

де

$$I_\beta = S_\beta(\beta x(t_\beta), t_\beta) + \int_{t_\beta}^{t_\beta^*} [Q_\beta(\beta x, t) + P_\beta(\beta u, t)] dt \quad (32)$$

$$(\beta = i, \beta^* = i = 1; \beta = ij, \beta^* = ij; i = \overline{1, K}; j = \overline{1, r_i}), \quad A > \hat{I}, t_{i-1} < t_i (i = \overline{1, k}).$$

Відзначимо, що в момент часу  $t_i (i = \overline{1, k})$  фазові координати підсистем рівні між собою і не мають стрибка за винятком  $n$ -ї фазової координати, що описує зміну маси в механічних системах, для якої справедливий закон збереження маси.

Нехай  ${}_{\beta}x^L(t), {}_{\beta}u^L(t), t_{\beta}, t \in [t_{\beta^*}, t_{\beta}]$  ( $\beta = i, \beta^* = i - 1; \beta = ij, \beta^* = i; i = \overline{1, k}; j = \overline{1, r_j}$ ) послідовність допустимих процесів задачі (27), (29) – (32).

Сформулюємо у вигляді першого наслідку з теореми 1 умови оптимальності конструювання траєкторії руху складеної динамічної системи зі схемою розгалуження, що містить центральну і бічні гілки, без взаємодії підсистем після розділення. Для оптимальності елементів послідовності допустимих процесів необхідно існування таких функцій Беллмана  $V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L(t), t) \in [t_{\beta^*}, t_{\beta}]$ , які визначені і неперервні на всіх  $({}_{\beta}\hat{x}^L, t)$ , мають кусково-неперервні частинні похідні, задовольняють рівнянням

$$-\frac{\partial V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^0, t)}{\partial t} = Q_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^0, t) + \left( \frac{\partial V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^0, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{x}^0} \right)^T {}_{\beta}\Phi({}_{\beta}\hat{x}^0, t), \quad (33)$$

$$W_{2,\beta}^0({}_{\beta}\hat{u}^0, t) + P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^0, t) - \left( \frac{\partial P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^0, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{u}^0} \right)^T {}_{\beta}\hat{u}^0 = 0, \quad (34)$$

$$-\left( \frac{\partial V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L, t)}{\partial t} \right) = Q_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L, t) + \left( \frac{\partial V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{x}^L} \right)^T f_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L, t)$$

$$\left[ -\frac{\partial}{\partial {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}} \left( \frac{\partial P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^{L-1}, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}} \right)^T \right] {}_{\beta}\hat{u}^{L-1} \left[ {}_{\beta}\hat{u}^L - {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}(t) \right], \quad (35)$$

$$W_{2,\beta}^L({}_{\beta}\hat{u}^L, {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}, t) + P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^{L-1}, t) - \left( \frac{\partial P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^{L-1}, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}} \right)^T {}_{\beta}\hat{u}^{L-1} \quad (36)$$

$$+ R_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^L, {}_{\beta}\hat{u}^{L-1}, t) = 0, \quad L = 1, 2, \dots,$$

$$\left( \frac{\partial P_{\beta}({}_{\beta}\hat{u}^L, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{u}^L} \right)^T + \left( \frac{\partial V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{\beta}\hat{x}^L} \right)^T {}_{\beta}\mu({}_{\beta}\hat{x}^L, t) = 0, \quad (37)$$

$$L = 0, 1, 2, \dots; \quad \beta = i, ij; \quad i = \overline{1, K}; \quad j = \overline{1, r_j},$$

зв'язаним граничними умовами

$$V_{ij}({}_{ij}x(t_{ij}), t_{ij}) = S_{ij}({}_{ij}x(t_{ij}), t_{ij}) \Big|_{({}_{ij}x(t_{ij}), t_{ij}) \in Q_{ij}},$$

$$V_{(i,j)}x(t_i, t_j) = \left[ \begin{array}{l} \sum_{j=1}^{r_i} V_{ij}({}_{ij}x(t_i), t_i) + \\ + \zeta(i) V_{i+1}({}_{i+1}x(t_i), t_i) + \\ + S_i({}_{i}x(t_j), t_j) \end{array} \right]_{({}_{j}x(t_i), t_i) \in Q_i}, \quad (i = \overline{1, k}, j = \overline{1, r_j}),$$

де

$$\zeta(i) = \begin{cases} 1, & i = \overline{1, k-1}; \\ 0, & i = k, \end{cases}$$

що задовольняють співвідношенням

$$\hat{I} = \inf_{({}_{1}x(t_0), t_0) \in Q_0} \dots \inf_{({}_{k}x(t_{k_r}), t_{k_r}) \in Q_{k_r}} \dots \inf_{({}_{kr}x(t_{kr}), t_{kr}) \in Q_{kr}} \left[ \begin{array}{l} V_1({}_{0}x(t_0), t_0); \\ {}_{1}x(t_1), t_1, \dots, {}_{k}x(t_k), t_k; \\ {}_{11}x(t_{11}), t_{11}, \dots, {}_{kr}x(t_{kr}), t_{kr} \end{array} \right].$$

Доведення записаних вище умов можливо виконати, якщо розглядати ці умови як окремий випадок задачі (2) – (8), розв'язок якої дає теорема 1.

### Наслідок 2. Конструювання розгалуженої траєкторії руху складеної динамічної системи з урахуванням взаємодії підсистем

У даному підрозділі, як наслідок теореми 1, викладено умови оптимальності, що дають змогу оптимізувати методом рекурентного аналітичного конструювання за О.А. Красовським типові розгалужені траєкторії з урахуванням взаємного впливу підсистем після розділення. Математично взаємний вплив підсистем буде відображено як у рівняннях їхнього руху, так і в критерії ефективності.

Задача 1. Розглядалася типова розгалужена траєкторія з розділенням підсистем з урахуванням їх взаємного впливу після розділення.

Постановка задачі:

$$I = I_1 + \int_{t_0}^{t_1} w_{2,1}(\hat{u}, t) dt + I_{12} + \int_{t_1}^{t_{12}} w_{2,12}({}_{11}\hat{u}, {}_{12}\hat{u}, t) dt + I_{11} + \int_{t_{12}}^{t_{11}} w_{2,11}({}_{11}\hat{u}, t) dt, \quad (38)$$

$$I^* = I_1 + I_{12} + I_{11} \leq A, \quad (39)$$

$$({}_1x(t_0), t_0) \in Q_0, \quad ({}_{\beta}x(t_{\beta}), t_{\beta}) \in Q_{\beta} \quad (\beta = 1, 11, 12), \quad (40)$$

$${}_{1}\dot{x} = {}_1\Phi({}_1x, t) + {}_1\mu({}_1x, t)u, \quad t \in [t_0, t_1], \quad (41)$$

$${}_{11}\dot{x} = \begin{cases} {}_{11}^1\Phi({}_{11}x, {}_{12}x, t) + {}_{11}^1\mu^1({}_{11}x, {}_{12}x, t)u + {}_{11}^2\mu^2({}_{11}x, {}_{12}x, t)u, & t \in [t_1, t_{12}]; \\ {}_{11}\Phi({}_{11}x, t) + {}_{11}\mu({}_{11}x, t)u, & t \in [t_{12}, t_{11}], \end{cases} \quad (42)$$

$${}_{12}\dot{x} = {}_{12}\Phi({}_{12}x, {}_{11}x, t) + {}_{12}\mu^1({}_{12}x, {}_{11}x, t)u +$$

$$+ {}_{12}\mu^2({}_{12}x, {}_{11}x, t)u, \quad t \in [t_1, t_{12}],$$

$${}_{\beta}x \in E^n, \quad {}_{\beta}u \in E^{m_{\beta}} \quad (\beta = 1, 11, 12), \quad t_0 < t_1 < t_{12} < t_{11},$$

$${}_1x_r(t_1) = {}_{11}x_r(t_1) = {}_{12}x_r(t_1) \quad (r = \overline{1, n-1}), \quad (44)$$

$${}_1x_n(t_1) = {}_{11}x_n(t_1) + {}_{12}x_n(t_1), \quad (45)$$

де

$$I_{\beta} = S_{\beta}({}_{\beta}x(t_{\beta}), t_{\beta}) + \int_{t_{\beta}}^{t_0} [Q_{\beta}({}_{\beta}x, t) + P_{\beta}({}_{\beta}u, t)] dt \quad (46)$$

$$(\beta = 1, \beta^* = 0; \beta = 11, \beta^* = 12),$$

$$I_{12} = S_{12}({}_{11}x(t_{12}), {}_{12}x(t_{12}), t_{12}) + \int_{t_1}^{t_{12}} [Q_{12}({}_{11}x, {}_{12}x, t) + P_{12}({}_{11}u, {}_{12}u, t)] dt, \quad (47)$$

$n$ -а фазова координата, що описує зміну маси в механічних СДС.

Нехай

$${}_{\beta}x^L(t), {}_{\beta}u^L(t), t_0, t_{\beta} \quad (\beta = 1, 11, 12), \quad t_0 \leq t \leq t_{11} \quad L = 0, 1, 2, \dots$$

послідовність допустимих процесів задачі (38), (40) – (45).

Сформулюємо у вигляді другого наслідку з теореми 1 умови оптимальності конструювання траєкторії руху складеної динамічної системи з урахуванням взаємодії підсистем. Для оптимальності елементів послідовності допустимих процесів необхідне існування таких функцій Беллмана  $V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L(t), t)$

$$t \in [t_{\beta}^* t_{\beta}] (\beta = 1, \beta^* = 0; \beta = 11, \beta^* = 12),$$

$$V_{12}), V_{12}({}_{11}\hat{x}^L(t), {}_{12}\hat{x}^L(t), t) \in [t_1, t_{12}],$$

які визначені та неперервні відповідно на всіх  $({}_{\beta}\hat{x}^L, t)$   $(\beta = 1, 11), ({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)$ , мають кусково-неперервні частинні похідні, задовольняють рівнянням (33) – (37) для  $\beta = 1, 11$  та рівнянням

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t)}{\partial t} &= Q_{12}({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t) + \\ &+ \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^0} \right)_{11}^T \varphi({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t) + \\ &+ \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t)}{\partial {}_{12}\hat{x}^0} \right)_{12}^T \varphi({}_{11}\hat{x}^0, {}_{12}\hat{x}^0, t), \end{aligned} \quad (48)$$

$$\begin{aligned} w_{2,12}^0({}_{12}\hat{U}^0, {}_{12}\hat{U}^0, t) + P_{12}({}_{11}\hat{U}^0, {}_{12}\hat{U}^0, t) - \\ - \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{U}^0, {}_{12}\hat{U}^0, t)}{\partial {}_{11}\hat{U}^0} \right)_{11}^T \hat{U}^0 - \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{U}^0, {}_{12}\hat{U}^0, t)}{\partial {}_{12}\hat{U}^0} \right)_{12}^T \hat{U}^0 = 0, L = 0, \end{aligned} \quad (49)$$

$$\begin{aligned} -\frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial t} &= Q_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^L} \right)^T \times \\ &\times \left[ {}_{11}\varphi({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{12}\hat{x}^L} \right)_{12}^T \varphi({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) - \right. \\ &- \left[ \left( \frac{\partial P_{12}}{\partial {}_{11}u} \right)_{11}^T \varphi({}_{11}\hat{u}^L - {}_{11}\hat{u}^{L-1}(t)) + \left( \frac{\partial P_{12}}{\partial {}_{12}u} \right)_{12}^T \varphi({}_{12}\hat{u}^L - {}_{12}\hat{u}^{L-1}(t)) + \right. \\ &+ \left. \left. \left( \frac{\partial P_{12}}{\partial {}_{12}u} \right)_{12}^T \varphi({}_{11}\hat{u}^L - {}_{11}\hat{u}^{L-1}(t)) + \left( \frac{\partial P_{12}}{\partial {}_{11}u} \right)_{11}^T \varphi({}_{12}\hat{u}^L - {}_{12}\hat{u}^{L-1}(t)) \right]_{11,12}^T \right] \times \end{aligned} \quad (50)$$

$$\begin{aligned} w_{2,12}^L({}_{11}\hat{u}^L, {}_{12}\hat{u}^L, t) + P_{12}({}_{11}\hat{u}^{L-1}, {}_{12}\hat{u}^{L-1}, t) - \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{u}^{L-1}, {}_{12}\hat{u}^{L-1}, t)}{\partial {}_{11}\hat{u}^{L-1}} \right)_{11}^T \hat{u}^{L-1} - \\ - \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{u}^{L-1}, {}_{12}\hat{u}^{L-1}, t)}{\partial {}_{12}\hat{u}^{L-1}} \right)_{12}^T \hat{u}^{L-1} + R_{12}({}_{11}\hat{u}^{L-1}, {}_{12}\hat{u}^{L-1}, t), L = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (51)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{u}^L, {}_{12}\hat{u}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{u}^L} \right)^T + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^L} \right)_{11}^T \mu^{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) + \\ + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^L} \right)_{12}^T \mu^{11}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) = 0, \end{aligned} \quad (52)$$

$$\begin{aligned} \left( \frac{\partial P_{12}({}_{11}\hat{u}^L, {}_{12}\hat{u}^L, t)}{\partial {}_{12}\hat{u}^L} \right)^T + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^L} \right)_{11}^T \mu^{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) + \\ + \left( \frac{\partial V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)}{\partial {}_{11}\hat{x}^L} \right)_{12}^T \mu^{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t) = 0, L = 1, 2, \dots, \end{aligned} \quad (53)$$

зв'язаними граничними умовами

$$V_{11}({}_{11}\hat{x}^L(t_{11}), t_{11}) = S_{11}({}_{11}\hat{x}^L(t_{11}), t_{11}) | ({}_{11}\hat{x}^L(t_{11}), t_{11}) \in Q_{11}, \quad (54)$$

$$V_{12}({}_{11}\hat{x}^L(t_{12}), {}_{11}\hat{x}^L(t_{12}), t_{12}) =$$

$$\left[ V_{11}({}_{11}\hat{x}(t_{12}), t_{12}) + \right. \\ \left. + S_{12}({}_{11}\hat{x}^L(t_{12}), {}_{12}\hat{x}^L(t_{12}), t_{12}) \right]_{({}_{12}\hat{x}^L(t_{12}), t_{12}) \in Q_{12}}, \quad (55)$$

$$V_1(\hat{x}(t_1), t_1) = [V_{12}({}_{11}\hat{x}(t_1), {}_{12}\hat{x}(t_1), t_1) + S_1(\hat{x}(t_1), t_1)]_{({}_{11}\hat{x}(t_1), t_1) \in Q_1} \quad (56)$$

та задовольняють співвідношенню

$$\hat{I} = \inf_{({}_{11}\hat{x}(t_0), t_0) \in Q_0} \inf_{({}_{11}\hat{x}(t_1), t_1) \in Q_1} \inf_{({}_{12}\hat{x}(t_1), t_1) \in Q_{12}} \inf_{({}_{11}\hat{x}(t_1), t_1) \in Q_{11}} [V_1(\hat{x}(t_0), t_0; \\ {}_{11}\hat{x}(t_1), {}_{11}\hat{x}(t_2), {}_{12}\hat{x}(t_2), {}_{11}\hat{x}(t_1); t_1, t_2, t_{11})] \quad (57)$$

для кожного елемента послідовності.

Наведений результат безпосередньо впливає із загальної теореми 1 як окремих випадок.

Рішення задачі (40) – (45) вважається закінченим, якщо знайдений хоча б один елемент послідовності задачі (38), (40) – (45), що задовольняє контрольному нерівності (39).

Задача 2. Розглядалася типова розгалужена траєкторія з групуванням підсистем.

Постановка задачі:

$$I = I_{11} + I_{12} + I_1 + \int_{t_1}^{t_2} w_{2,11}(\hat{u}, t) dt + \int_{t_2}^{t_1} w_{2,12}(\hat{u}, t) dt + \int_{t_1}^{t_0} w_{2,1}(\hat{u}, t) dt + \\ + S_0(\hat{x}(t_0), t_0) + S_1(\hat{x}(t_1), t_1), \quad (57)$$

$$I^* = I_{11} + I_{12} + I_1 + S_0(\hat{x}(t_0), t_0) + S_1(\hat{x}(t_1), t_1) \leq A, \quad (58)$$

$$({}_{11}\hat{x}(t_0), t_0) \in Q_0, ({}_{\beta}\hat{x}(t_{\beta}), t_{\beta}) \in Q_{\beta} (\beta = 1, 11, 12), \quad (59)$$

$${}_{11}\dot{\hat{x}} = {}_{11}\varphi({}_{11}\hat{x}, t) + {}_{11}\mu({}_{11}\hat{x}, t) u, t \in [t_1, t_0], \quad (60)$$

$${}_{11}\dot{\hat{x}} = \begin{cases} {}_{11}\varphi({}_{11}\hat{x}, t) + {}_{11}\mu^{11}({}_{11}\hat{x}, t) u + \\ + {}_{12}\mu^{12}({}_{11}\hat{x}, t) u, t \in [t_2, t_1]; \\ {}_{11}\varphi({}_{11}\hat{x}, t) + {}_{11}\mu({}_{11}\hat{x}, t) u, t \in [t_1, t_2], \end{cases} \quad (61)$$

$${}_{11}\dot{\hat{x}} = {}_{12}\varphi({}_{11}\hat{x}, t) + {}_{12}\mu^{11}({}_{11}\hat{x}, t) u + \\ + {}_{12}\mu^{12}({}_{11}\hat{x}, t) u, t \in [t_2, t_1], \quad (62)$$

$${}_{\beta}\hat{x} \in E^n, {}_{\beta}u \in E^{m_{\beta}} (\beta = 1, 11, 12), t_{11} < t_{12} < t_1 < t_0,$$

$${}_{11}\hat{x}_r(t_1) = {}_{11}\hat{x}_r(t_1) = {}_{12}\hat{x}_r(t_1), \quad r = \overline{1, n-1}, \quad (63)$$

$${}_{11}\hat{x}_n(t_1) = {}_{11}\hat{x}_n(t_1) + {}_{12}\hat{x}_n(t_1), \quad (64)$$

де

$$I_{\beta} = \int_{t_{\beta}^*}^{t_{\beta}} [Q_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}, t) + P_{\beta}({}_{\beta}u, t)] dt \quad (\beta = 0, \beta^* = 1; \beta = 12, \beta^* = 11), \quad (65)$$

$$I_{12} = \int_{t_{12}}^{t_1} [Q_{12}({}_{11}\hat{x}, {}_{12}\hat{x}, t) + P_{12}({}_{11}u, {}_{12}u, t)] dt, \quad (66)$$

$n$ -а фазова координата описує зміну маси в механічних СДС.

Нехай

$${}_{\beta}\hat{x}^L(t), {}_{\beta}u^L(t), t_{\beta}, t_0 (\beta = 11, 11, 1), t_1 \leq t \leq t_0, L = 0, 1, 2, \dots$$

послідовність допустимих процесів задачі (57), (59) – (64).

Сформулюємо у вигляді ще одного наслідку з теореми 1 умови оптимальності конструювання траєкторії руху складеної динамічної системи з урахуванням групування підсистем. Для оптимальності елементів послідовності допустимих процесів необхідне існування таких функцій

$$V_{\beta}({}_{\beta}\hat{x}^L(t), t), \quad t \in [t_{\beta}^*, t_{\beta}] (\beta = 0, \beta^* = 1; \beta = 12, \beta^* = 11),$$

$$V_{12}({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t), \quad t \in [t_{12}, t_1],$$

які визначені та неперервні відповідно на всіх  $({}_{\beta}\hat{x}^L, t)$   $(\beta = 1, 11), ({}_{11}\hat{x}^L, {}_{12}\hat{x}^L, t)$ , мають кусково-неперервні частинні похідні, задовольняють

рівнянням (33) – (37) для  $\beta = 1.11$  та рівнянням (48) – (53), зв'язаних граничними умовами

$$V_1(\hat{x}^L(t_0), t_0) = S_0(\hat{x}^L(t_0), t_0) \Big|_{(\hat{x}^L(t_0), t_0) \in Q_0}, \quad (67)$$

$$V_{12}(\hat{x}^L(t_1), \hat{x}^L(t_1), t_1) = [S_1(\hat{x}^L(t_1), t_1) + V_1(\hat{x}^L(t_1), t_1)] \Big|_{(\hat{x}^L(t_1), t_1) \in Q_1}, \quad (68)$$

$$V_{11}(\hat{x}^L(t_{12}), t_{12}) = [V_{12}(\hat{x}^L(t_{12}), \hat{x}^L(t_{12}), t_{12})] \Big|_{(\hat{x}^L(t_{12}), t_{12}) \in Q_{12}} \quad (69)$$

та задовольняють співвідношенню

$$\hat{I} = \inf_{(\hat{x}^L(t_1), t_1) \in Q_1} \inf_{(\hat{x}^L(t_2), t_2) \in Q_{12}} \inf_{(\hat{x}^L(t_1), t_1) \in Q_1} \inf_{(\hat{x}^L(t_0), t_0) \in Q_0} [V_{11}(\hat{x}^L(t_{11}), \hat{x}^L(t_{12}), 12 \hat{x}^L(t_{12}), \hat{x}^L(t_1); t_{11}, t_{12}, t_1, t_0)]$$

для кожного елемента послідовності.

Наслідок (67) – (69) впливає з положень теореми 1 як окремих випадок. Рішення задачі (57) – (64) завершується відшукуванням елемента послідовності задачі (57), (59) – (64), що задовольняє нерівності (58).

**Висновки.** Запропоновано умови аналітичного або алгоритмічного конструювання законів керу-

вання розподіленим інформаційно-телекомунікаційним роботом (РІТР), який розглядається як складена динамічна система (СДС), на основі використання функціоналу узагальненої роботи О.А. Красовського. Використання функціоналу О.А. Красовського дало змогу сформулювати умови, які дають можливість конструювати керування РІТР не лише на етапі попереднього синтезу розгалужених траєкторій його руху, але й за оперативного синтезу, тобто в процесі нормального функціонування РІТР. Запропонований рекурентний алгоритм аналітичного конструювання за О.А. Красовським дає змогу повною мірою використовувати обчислювальні процедури, розроблені в даний час, для вирішення відомих рівнянь аналітичного конструювання за функціоналом узагальненої роботи.

Запропоновано умови рішення дворівневих задач для різних типів СДС у вигляді наслідків з основної теореми. Ці умови пов'язані з оптимізацією за критерієм О.А. Красовського з побудовою керування за алгоритмом послідовної оптимізації з розглядом ієрархії цільових функціоналів.

#### Список літератури:

1. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях / І.С. Романченко та ін. Київ : НАУ, 2016. 332 с.
2. Tachinina O.M. Method of dynamic programming for information robot's branching path optimization. *Electronics and control systems*. 2017. № 3(53). P. 100–105.
3. Tachinina O.M., Lysenko O.I. Method of path constructing of information robot on the basis of unmanned aerial vehicle. *Proceedings of the National Aviation University*. 2017. № 4(73). P. 60–68.
4. Лисенко А.И., Чумаченко С.М., Шевченко В.Л. Математически модели и информационни технологии за оценка и прогнозиране състоянието на околната среда в изпитателни полигони. Издател: Про Лангс, език: Български. 2017 р.
5. Olexandr Lysenko, StanislavValuiskyi: Secured wireless sensor network for environmental monitoring. *Volume of Scientific Papers, Security forum 2016*. 2016. Vol. 2. P. 528–532.
6. Тачинина О.М., Лисенко О.І., Чумаченко С. М. Условия оптимальности траектории движения носителя при размещении сенсоров в зоне чрезвычайной ситуации. *Техническая механика*. 2016. №. 3. С. 87–93.
7. Тачинина О.М., Лисенко О.І. Метод динамического программирования для оптимизации произвольной ветвящейся траектории движения составной динамической системы. *Проблеми інформатизації та управління*. 2017. Вип. 3(59). С. 38–43.
8. Dan Popescu, Florin Stoican, Grigore Stamatescu, Oana Chenaru, Loretta Ichim. *A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring Sensors*. 2019. № 19(21). P. 4690. URL: doi.org/10.3390/s19214690.
9. Zhen Qin, Aijing Li, Chao Dong, Haipeng Dai and Zhengqin Xu. Completion Time Minimization for Multi-UAV Information Collection via Trajectory Planning, *Sensors*, 2019. № 19(18). P. 4032. URL: doi.org/10.3390/s19184032.
10. Bin Liu and Hongbo Zhu. Energy-Effective Data Gathering for UAV-Aided. *Sensors (Basel)*. 2019. № 19(11). P. 2506. URL: doi:10.3390/s19112506.
11. Safwan Alfattani, Wael Jaafar, Halim Yanikomeroglu, Abbas Yongacoglu. Multi-UAV Data Collection Framework for Wireless Sensor Networks. 2019 IEEE Global Communications Conference (Globecom). URL: <https://arxiv.org/pdf/1910.10792.pdf>.
12. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensor networks using UAV / V. Romaniuk et al. *Information and Telecommunication Sciences*. P. 102–107. URL: doi.org/10.20535/2411-2976.12020.
13. Shams ur Rahman and You-Ze Cho. UAV positioning for throughput maximization. *EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking*. 2018. URL: doi.org/10.1186/s13638-018-1038-0.
14. Romaniuk A. MAC-protocol for data collection in wireless sensors networks with UAV. *Collection of scientific papers MITI*. 2018. № 4. P. 84–91.

15. Muhammad Yeasir Arafat, Md Arafat Habib and Sangman Moh. Routing Protocols for UAV-Aided Wireless Sensor Networks. Appl. Sci. 2020, 10(12), 4077. URL: <https://doi.org/10.3390/app10124077>.

16. Тачинина О.М., Лисенко О.І., Назаренко Е.В. Новая интерпретация функционала обобщенной работы в задачах оптимального управления малогабаритными беспилотными летательными аппаратами. *Проблеми інформатизації та управління*. 2015. Вип. 4(52). С. 88-93.

**Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Guida O.G., Sushyn I.O.**

### **THEORETICAL BASES OF DESIGNING MOTION CONTROL OF DISTRIBUTED INFORMATION AND TELECOMMUNICATION ROBOT**

*The article considers the theoretical foundations of the design of motion control of distributed information and telecommunication robot (DITR), which is considered as a composite dynamic system (CDS), moving along a branched trajectory with an arbitrary scheme of branching.*

*It is pointed out that generalizing the physical meaning of the functioning of mobile wireless sensor networks with telecommunication air platforms, they can be referred to the class of distributed (cluster) information and telecommunication robots.*

*It is shown that when performing information and telecommunication functions assigned to DITR, the structure and information and telecommunication properties of multisensors change in real time. Changing the properties of the system in real time requires prompt calculation of rational actions that control the system. Thus, the total spatial motion of DITR is a branched trajectory with an arbitrary branching scheme. A systematic approach to DITR control requires the use of control methods for complex dynamic systems, which would allow rational and at the same time quickly coordinate the movement of all elements of DITR (mobile sensors and telecommunications air platforms).*

*The conditions of analytical or algorithmic construction of control laws of the distributed information and telecommunication robot which is considered as the made dynamic system, on the basis of use of functional of the generalized work of Krasovsky are offered. Using the functionality of Krasovsky allowed to formulate conditions that allow to design control of DITR not only at the stage of preliminary synthesis of branched trajectories of its movement, but also at operative synthesis, ie in the course of normal functioning of DITR. The recurrent algorithm of analytical designing according to Krasovsky is offered. allows you to make full use of computational procedures currently developed to solve the known equations of analytical design for the functionality of generalized work.*

**Key words:** *mobile sensor network, information and telecommunication robot. composite dynamic system, sensors, distributed sensors, telecommunication air platform.*

УДК 621.36

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/11>**Скакун О.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України**Воскресенський В.Б.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України**Сивобородько А.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України**ОГЛЯД ПОРТАТИВНИХ АНАЛІЗАТОРІВ СПЕКТРУ ТА АНАЛІЗАТОРІВ СИГНАЛІВ, ЩО МОЖУТЬ БУТИ ВИКОРИСТАНІ ПІД ЧАС ВИЯВЛЕННЯ ПОБІЧНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ**

У статті надані приклади класифікації побічних електромагнітних випромінювань та наведень (ПЕМВН) в різних країнах світу та технічних каналів можливого витоку інформації. Розкриті параметри витоку інформації за рахунок ПЕМВН, їхні найменування, одиниці вимірювання та фізичні величини. Показано, що апаратний контроль реально наявних та потенційних загроз несанкціонованого доступу і зняття інформації, що має грифи обмеження доступу, – одна із найбільш важливих задач у сфері інформаційної безпеки, особливо в теперішній час. Авторами відмічено, що апаратний контроль можливо здійснювати як спеціалізованими засобами вимірювальної техніки (ЗВТ), так і ЗВТ універсального призначення.

Основний матеріал дослідження в запропонованій статті присвячений оглядовому аналізу портативних аналізаторів спектру та аналізаторів сигналів, що можуть бути використані під час виявлення ПЕМВН, які властиві засобам персональних електронно-обчислювальних машин (ПЕОМ): флеш-носіям, магнітним дискам, принтерам, клавіатурам та моніторам. Вказано, що перехоплення ПЕМВН базується на широкому використанні найрізноманітніших ЗВТ, засобів аналізу і реєстрації інформації; антено-фідерних пристроїв; широкосмугових антенних підсилювачів.

Проаналізовано особливості параметрів сучасних аналізаторів спектру та сигналів, також внесено пропозиції щодо їх вибору. Наданий лаконічний, але досить ґрунтовний огляд зазначених портативних ЗВТ від наступних провідних виробників: аналізатори спектру компанії Rohde&Schwarz R&S®FSH 4/8/13/20 (Німеччина); ручні аналізатори сигналів FieldFox фірми Keysight Technologies, що входить до корпорації Agilent Technologies (США); прилади 500 серії від компанії MICRONIX (Японія); портативний аналізатор сигналів IDA 3106 з функціями моніторингового приймача та пеленгації від консорціуму NARDA (Німеччина).

Також у статті наведені марки та параметри активних антен, які автори рекомендують використовувати як антено-фідерні пристрої в комплекті із ЗВТ універсального призначення для контролю ПЕМВН.

**Ключові слова:** побічні електромагнітні випромінювання та наведення, канали витоку інформації, аналізатор спектру, аналізатор сигналів, радіосигнали, роздільна спроможність, роздільна здатність, амплітуда, частота, вимірювання, частотний діапазон.

**Постановка проблеми.** Сучасні масиви інформації, що містять державну таємницю або комерційні, технологічні секрети, проходять етап обробки на персональних електронно-обчислювальних машинах (ПЕОМ), яким властиві побічні електромагнітні випромінювання та наведення (ПЕМВН).

Проблемам виявлення ПЕМВН приділяють належну увагу відповідні правоохоронні структури, міністерства та організації в країнах всього

цивілізованого світу. Приклад класифікації ПЕМВН поданий на рис. 1.

Фізичні процеси, що відбуваються в технічних засобах і системах, призначених для передачі, обробки, приймання і збереження інформації, при їх функціонуванні, створюють у навколишньому середовищі побічні електромагнітні, акустичні, оптичні та інші випромінювання, що пов'язані з обробкою інформації. Такі процеси носять назву – технічні канали витоку інформації (ТКВІ). Приклад класифікації ТКВІ подано на рис. 2.



Рис. 1. Приклад класифікації ПЕМВН в країнах світу

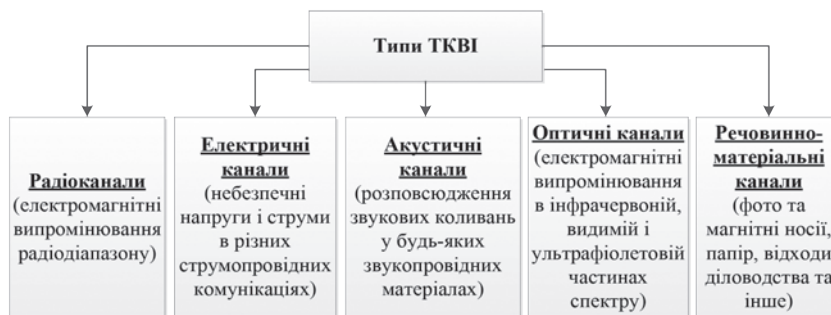


Рис. 2. Приклад класифікації ТКВІ

Водночас перелік каналів витоку інформації за рахунок ПЕМВН тауїй [1]: безпосередньо в оперативній або постійній пам'яті ПЕОМ; на з'ємних магнітних, магнітооптичних, лазерних і інших носіях; на зовнішніх пристроях зберігання інформації колективного доступу (RAID-масиви, файлові сервери і тому подібне); на екранах пристроїв відображення (дисплеї, монітори, консолі); у пам'яті пристроїв введення/виведення (принтери, графічні пристрої, сканери); у пам'яті управляючих пристроїв; в лініях зв'язку комп'ютерних мереж.

Канали витоку інформації утворюються як при роботі ПЕОМ, так і в режимі очікування. Джерелами таких каналів є [2]: електромагнітні поля; струми, що наводяться, і напруга в кабельних системах (живлення, заземлення і сполучних); перевипромінювання інформації, що обробляється, на частотах паразитної генерації елементів і пристроїв технічних засобів ПЕОМ; перевипромінювання оброблюваної інформації, на частотах контрольно-вимірювальної апаратури.

У зв'язку із вищезазначеними проблемами виникає задача аналізу можливості витоку інформації, що обробляється на ПЕОМ через ПЕМВН та його апаратного контролю.

Необхідно враховувати такі особливості радіотехнічних каналів витоку із засобів цифрової електронної техніки [3]: джерелами небез-

печного сигналу (з точки зору можливості витоку інформації) є елементи, вузли і провідники технічних засобів забезпечення виробничої діяльності, а також радіоелектронна та електронна апаратура; кожне джерело небезпечного сигналу за певних умов може утворити технічний канал витоку інформації; кожна електронна система, що містить в собі сукупність елементів, вузлів і провідників, потенційно може утворити значну кількість технічних каналів витоку інформації.

Кожен з цих каналів, залежно від конкретної реалізації елементів, вузлів і виробів в цілому, матиме певний прояв, специфічні характеристики і особливості утворення, пов'язані з умовами розташування і виконання.

Перелік можливих параметрів витоку інформації за рахунок ПЕМВН показаний в табл. 1.

Отже, потрібно реалізувати апаратний контроль можливого витоку інформації, що обробляється на ПЕОМ через ПЕМВН.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідженням проблемних питань обґрунтування вибору та рекомендацій щодо застосування сучасних ЗВТ універсального призначення, що можуть бути використані під час виявлення ПЕМВН, займалися такі вітчизняні науковці, як В. Макаренко [4, с. 50–53], В. Воскресенський, А. Сивобородько, В. Ковальчук, О. Скакун, М. Борисова [5, с. 44–48, 6, с. 73–77, 7, с. 74–78]. Існує велика кількість праць зарубіжних дослідників. Досить ґрунтовними є книги А. Афонського та В. Дьяконова [8; 9]. Також доступні інформаційно-довідкові технічні матеріали, які розміщені на сайтах провідних виробничих та дистриб'юторських компаній різних країн, що спеціалізуються на приладобудівній тематиці.

**Постановка завдання.** Мета цієї статті – надати короткі описи та викласти певні рекомендації щодо застосування універсальних засобів вимірювальної техніки (в комплекті із антенофідерними пристроями та радіочастотними кабелями) як засобів апаратного контролю під час виявлення ПЕМВН.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Комплексний характер актуальних загроз національній безпеці в інформаційній сфері потребує визначення інноваційних підходів до формування системи захисту та розвитку інформаційного



Перелік можливих параметрів витоку інформації за рахунок ПЕМВН

| № з/п | Назва параметру ПЕМВН   | Одиниця вимірювання | Орієнтовна величина параметру ПЕМВН |
|-------|---|---------------------|-------------------------------------|
| 1.    | Частотний діапазон  | Гц                  | 10 ÷ 5×10 <sup>9</sup>              |
| 2.    | Рівень випромінювання в ближній зоні                            | дБ                  | 10 ÷ 30                             |
| 3.    | Орієнтовна максимальна відстань прийому сигналів випромінювання | м                   | 100 ÷ 400                           |
| 4.    | Тактова частота складових компонентів ПЕОМ                      | ГГц                 | 1,5 ÷ 4,8                           |
| 5.    | Номер досліджуваної гармоніки тактової частоти                  | №                   | 4 ÷ 50                              |

простору в умовах глобалізації та вільного обігу інформації [10].

Апаратний контроль наявних та потенційних загроз несанкціонованого доступу і зняття інформації, що має грифи обмеження доступу – одна із найбільш важливих задач у сфері інформаційної безпеки функціонування державних структур [5, с. 44–48; 11].

Апаратний контроль можливо здійснювати, як спеціалізованими засобами вимірювальної техніки (ЗВТ), так і ЗВТ універсального призначення. Приклад класифікації засобів наведено на рис. 3.

До спеціалізованих ЗВТ належать, наприклад, комплект радіомоніторингу типу «Пластун», професійний трьохдіапазонний індикатор поля іPROTECT 1216, комплект виявлення засобів несанкціонованого зняття інформації типу «OSCOR», нелінійні локатори типу «ORION» (рис. 4).

Зразками обладнання універсального призначення, що забезпечують належний рівень контролю та захисту каналів передачі інформації, є сучасні аналізатори спектра (аналізатори сигналів) укомплектовані необхідними радіочастотними кабелями та антенно-фідерними пристроями. До універсальних ЗВТ, наприклад, належать портативні ручні аналізатори



Рис. 3. Приклад класифікації засобів апаратного контролю для виявлення загроз несанкціонованого доступу і зняття інформації

сигналів FieldFox виробництва компанії Keysight Technologies [12], портативні аналізатори спектра FSH 4/8/13/20 корпорації Rohde&Schwarz [13], аналізатори спектра реального часу серій RSA5000B, RSA6100A, RSA7100A фірми Tektronix, аналізатори сигналів MICRONIX [14].



Рис. 4. Приклади спеціалізованих ЗВТ: а) комплект радіомоніторингу «Пластун»; б) індикатор поля іPROTECT 1216; в) комплект «OSCOR»; г) нелінійний локатор «ORION»

Аналізатор спектру (від англ. *spectrum analyzer*) – пристрій для одержання спектрів фізичних процесів, який дозволяє визначати амплітуду й частоту спектральних компонент, що входять до складу аналізованого процесу. Найважливіша характеристика приладу – роздільність (роздільна спроможність, роздільна здатність): найменший інтервал частот між двома спектральними лініями, які ще розділяються аналізатором. Використовуються для аналізу властивостей радіосигналів, для дослідження характеристик радіопристроїв [15].

На думку авторів, охарактеризовані далі за текстом статті портативні повнофункціональні аналізатори можуть бути рекомендовані до застосування при апаратному контролі ПЕМВН.

**Портативні аналізатори спектру компанії Rohde&Schwarz R&S®FSH 4/8/13/20 (Німеччина)** – це конструктивно зручні та міцні прилади, рекомендовані до експлуатації в польових умовах. Мала вага, простий та зрозумілий інтерфейс управління, також великий набір вимірювальних функцій перетворюють ці ЗВТ в незамінний інструмент для тих користувачів, кому потрібен надійний та ефективний прилад для робіт під відкритим небом.

R&S®FSH – це, в першу чергу, аналізатор спектру, але залежно від встановлених опцій він може бути також вимірювачем потужності, кабельним та антенним тестером, двохпортовим векторним аналізатором електричних ланцюгів. Прилад (рис. 5) забезпечує виконання трьох найважливіших функцій високочастотного аналізу, наприклад його можливо використовувати для технічного обслуговування або налагодження радіопередаючих систем, перевірки кабелів та антен, оцінювання якості сигналу в радіокомунікаційних комплексах. Також його успішно застосовують для вимірювання напруженості електромагнітного поля або для вирішення лабораторних задач [13].



Рис. 5. Зовнішній вид аналізаторів спектру

Модельний ряд приладів наступний: FSH4 до 3,6 ГГц; FSH8 до 8,0 ГГц; FSH13 до 13,6 ГГц; FSH20 до 20,0 ГГц.

Основні характеристики: діапазони робочих частот – від 9 кГц до 3,6/8 ГГц та 13,6/20 ГГц відповідно до моделі; висока чутливість – менше мінус 141 дБмВт (1 Гц); менше мінус 161 дБмВт (1 Гц) при експлуатації з попереднім підсилювачем; незначна похибка вимірювання (менше 1 дБ); смуги обзору від

1 Гц до 3 МГц. Максимальна смуга демодуляції до 20 МГц (при аналізі сигналів LTE); вимірювальні функції для всіх основних задач по введенню в експлуатацію та обслуговуванню радіопередаючих систем; вбудовані трекінг-генератор та КСВН-міст із інжектором живлення досліджуваного пристрою по коаксіальній лінії; двопортовий векторний аналізатор електричних ланцюгів; легкозамінна літєво-іонна батарея на 4,5 години роботи; збереження результатів вимірювань на SD-картці; інтерфейси USB та локального ланцюга – для дистанційного управління та переносу вимірюваних даних; міцний вологозахисений корпус для роботи в польових (полігонних) умовах; зручність експлуатації приладів за рахунок легкої ваги (не перевищує 3 кг із акумуляторною батареєю) та доступності функціональних клавіш; ПЗ R&S®FSH4View для простого документування результатів вимірювань; ПЗ R&S®FSH WIZARD – функція автоматичних вимірювань для налагодження оптимальних параметрів та підвищення точності вимірювань.

Отже потенційні користувачі мають доступ до 8 моделей аналізатора R&S®FSH, які розраховані на різні сфери застосування і різні частотні діапазони.

Моделі із вбудованим трекінг-генератором можливо використовувати для визначення передаточних характеристик кабелів, фільтрів, підсилювачів та інше. Виробляються також моделі із вбудованими трекінг-генератором та КСВН-мостом, які можливо використовувати для вимірювання відстані до місця пошкодження кабелю, векторного аналізу електричних ланцюгів та інше.

Весь модельний ряд оснащений попереднім підсилювачем (з функціями налагодження та регулювання), який дозволяє вимірювати сигнали дуже низького рівня.

**Портативні ручні аналізатори сигналів FieldFox від компанії KeysightTechnologies корпорації AgilentTechnologies (США).** Фірма KeysightTechnologies для полігонних випробувань пропонує сімейство ручних аналізаторів FieldFox. Надвисокочастотні аналізатори спектру – моделі N9935A, N9936A, N9937A, N9938A; повнофункціональні 2-х портові векторні аналізатори ланцюгів – моделі N9925A, N9926A, N9927A, N9928A; комбіновані високочастотні та надвисокочастотні аналізатори – моделі N9913A, N9914A, N9915A, N9916A, N9917A, N9918A.

Вищезазначені прилади функціонують в діапазоні від 30 кГц до 26,5 ГГц. Всі вони відповідають

стандарту MIL – PRF – 28800F Class 2. Пилезахищена конструкція без вентиляторів та вентиляційних отворів підвищує надійність приладів при експлуатації в широкому спектрі температур (від мінус 10 до плюс 55 °C), впливу солоного та вологого оточуючого середовища. Усі аналізатори відповідають вимогам стандарту MIL–STD–810G, Method 511.5, Procedure 1 для роботи у вибухонебезпечних середовищах.

Аналізатори спектру забезпечують надвисоку точність вимірювання рівня сигналу (+/-0,5 дБ) без попереднього їх прогрівання. Аналізатори ланцюгів мають найточніші методи калібрування (повне 2-х портове калібрування по невідомій перемичці). Тестування антено-фідерних систем виконується без зовнішніх калібрувальних комплектів (функції QuickCal та CalReady). Прилади оснащені відслідковуючими генераторами та вбудованими незалежними джерелами сигналів з діапазоном частот від 30 кГц до 26,5 ГГц [12].

Аналізатори FieldFox можуть використовуватися в різноманітних сферах діяльності: для полігонних випробувань; для тестування супутникового зв'язку; для налагодження надвисоко-частотної ретрансляції; для технічного обслуговування систем зв'язку військового призначення; для технічного обслуговування радіолокаційних систем та для вирішення інших задач. Засоби вимірювальної техніки FieldFox інтегрують в одному компактному корпусі функції декількох приладів. Окрім того, вони забезпечують гнучкість у використанні коштів: придбавши прилад, сконфігурований під певні задачі, потім можливо його доповнити іншими функціональними можливостями.

Наведемо короткий перелік технічних можливостей ручних аналізаторів сигналів FieldFox (рис. 6): аналізатор антено-фідерних пристроїв; аналізатор спектру; відслідковуючий генератор та вбудоване незалежне джерело сигналів; вбудований вимірювач потужності; вимірювання потужності за допомогою вимірювачів потужності з шиною USB; вимірювання параметрів імпульсів за допомогою вимірювачів пікової потужності з шиною USB; векторний вольтметр.

Аналізатори сигналів FieldFox розроблені у відповідності з потребами користувачів для виконання їх повсякчасної діяльності в різних умовах експлуатації, вони відповідають жорстким вимогам військових стандартів MIL–PRF–28800F Class 2 та MIL–STD–810G, Method 511.5, Procedure 1.

**Аналізатори сигналів MICRONIX (Японія)** нової лінійки серії MSA-500 на сьогодні серійно

виробляються компанією MICRONIX. У приладах одночасно реалізовані система реального часу на основі швидкого перетворення Фур'є та звичайна система розгортки, що для комплексного рішення є досить унікальним явищем [8].

Наведемо деякі переваги системи реального часу: забезпечується можливість аналізу спектра нестійких сигналів, таких як пакетні сигнали або шум; передбачена можливість аналізу в часовій області, наприклад аналіз залежності потужності від часу, частоти від часу, фази від часу, квадратурних сигналів (I і Q); велике значення має функція запуску (trigger), можливий режим захоплення неперіодичних спектрів, що дуже рідко з'являються. Система розгортки має наступні переваги: можливість встановлення широкого частотного інтервалу дозволяє спостерігати за широким діапазоном частот; прилади можуть бути укомплектовані відслідковуючими генераторами; можливе вимірювання електромагнітних завад (EM3) відповідно до вимог стандартів; режим розгортки реалізовано у вигляді системи звичайного аналізатора спектра, що зрозумілий користувачам та забезпечує велику кількість варіантів застосування.

Виробник пропонує п'ять моделей аналізаторів сигналів: MSA-538, MSA-538TG, MSA-538E, MSA-558, MSA-558E.

Типовий представник зазначеної лінійки виробів – аналізатор MSA-538TG з вбудованим тригер-генератором, що дозволяє проводити автоматичне калібрування (самоналагоджування) приладу. Цей аналізатор має діапазон робочих частот від 20 кГц до 3,3 ГГц; діапазон частот функції запуску від 5 МГц до 3,3 ГГц; середній рівень власних шумів складає – 162 дБм/Гц, а в режимі реального часу становить – 140 дБм/Гц.

Технічні характеристики, які властиві всім типам аналізаторів сигналів серії MSA-500 (рис. 7): опорний рівень встановлюється від +10 дБм до –60 дБм; в системі реального часу можуть бути використані функції запуску: за рівнем потужності каналу, за рівнем потужності, за рівнем проміжної частоти (IF) та за зовніш-



Рис. 6. Зовнішній вид ручних аналізаторів FieldFox

ньою подією; аналіз в системі реального часу на основі функції Overwrite (перезапис) із швидкістю 720 кадрів за секунду дозволяє не пропустити навіть паразитні спектри, що рідко з'являються; максимальна ширина частотного інтервалу в режимі реального часу складає 20 МГц; літій-іонний акумулятор типу MB400 забезпечує функціонування протягом чотирьох годин; гарантується виконання шести функцій вимірювань, чотирьох функцій обчислень, вимірювання за допомогою маркерів та функції пошуку пікових значень; вага приладу разом з акумуляторною батареєю не перевищує 1,8 кг; габаритні розміри не перевищують 162(Ш) x 71(В) x 265(Г) мм [16, с. 184].



Рис. 7. Аналізатор сигналів серії MSA-500

Прилади серії MSA-500 мають широкий спектр застосування, зокрема й в експертних дослідженнях у сфері захисту інформації.

Отже, універсальному ЗВТ – аналізатору сигналів MSA-500 властиві функції такого ж рівня, що й лабораторним ЗВТ, а саме функції: вимірювання потужності каналу; потужності сусіднього (суміжного) каналу; ширини смуги частот, що експлуатується; напруженості електричного поля; напруженості магнітного поля; шуму; обчислень MaxHold (фіксація максимального значення), MinHold (фіксація мінімального значення), Averaging (знаходження середнього значення), Overwrite (перезапис); вимірювання за допомогою маркерів; пошуку пікових значень.

Застосування приладів серії MSA-500 дозволить оптимізувати та покращити проведення експертних досліджень у сфері захисту інформації, зокрема й виконувати комплексні перевірки наявних та потенційних загроз несанкціонованого доступу та зняття інформації.

**Засоби вимірювальної техніки компанії NARDA (Німеччина).** Портативний аналізатор

сигналів з функціями моніторингового приймача та пеленгації **NARDA IDA-3106** (рис. 8) призначений для радіомоніторингу спектру частот в діапазоні частот 9 кГц – 6 ГГц, аналізу інтерференції сигналів [17].



Рис. 8. Портативний моніторинговий приймач

Активні направлені антени, оснащені вбудованим компасом. Призначені для визначення напрямку радіовипромінювання в межах частотного діапазону від 20 МГц до 6 ГГц; висока швидкість сканування (12 ГГц/с); смуга аналізу в режимі реального часу 32 МГц; режим пеленгації з автоматичним визначенням азимута; вбудований приймач GPS і електронний компас для полегшення визначення напрямку радіовипромінювання; функція SMARTDF дозволяє отримати результати триангуляції при пеленгації і автоматично обчислювати місце розташування джерела випромінювання; удароміцний малогабаритний легкий корпус (менше 3 кг).

IDA-3106 – високочутливий аналізатор сигналів, що поєднує чудову чутливість з високою швидкістю моніторингу і вбудованими компонентами геолокації, включаючи подвійний компас і картографічне ПО. Портативна система розроблена для використання як у польових умовах, так і для локалізації випромінювань в приміщенні. Дана система є ідеальним рішенням в ситуаціях, що вимагають підвищеної мобільності і швидкого розгортання. У список основних завдань моделі IDA-3106 входить виявлення, класифікація і локалізація високочастотних сигналів. Унікальна направлена антена оснащена вбудованим електронним компасом і системою обміну даних між антеною і аналізатором, що значно спрощує роботу. Відмінними характеристиками портативного приладу є: функція горизонтального сканування (Horizontal Scan) з автоматичним визначенням азимуту і функція SMARTDF для автоматичного обчислення місця джерела випромінювання.

Удароміцний, ергономічний дизайн захищає прилад від механічних пошкоджень, дії поганих погодних умов і високочастотних випромінювань. IDA-3106 був розроблений з метою знаходження та визначення будь-яких високочастотних випромінювань. Можливі сфери застосування приладу: 1) виявлення завод, обумовлених впливом промислових об'єктів; 2) захист комунікацій в період проведення надзвичайно важливих заходів; 3) локалізація аварійних (рятувальних) радіопередавачів; 4) локалізація ВЧ пригнічувачів; 5) контроль спектру радіочастот; 6) локалізація мініатюрних передавачів; 7) моніторинг спектру сигналів; 8) пошук випромінювань в ближній зоні.

Режими роботи: 1) аналізатор спектру; 2) пеленгація; 3) вимір потужності в каналі; 4) вимір рівня сигналу; 5) режим осцилографа; 6) I/Q демодуляція [17].

Режим аналізатора спектру дозволяє дуже швидко сканувати весь діапазон частот, також ідеально підходить для виявлення, контролю і аналізу будь-яких видів сигналів. Повне сканування діапазону 6 ГГц відбувається за 500 мс навіть при високій роздільній здатності із смугою пропускання 500 кГц. При роботі спільно з направленими антенами Narda наднизький рівень шуму що становить до -30 дБμВ/м дозволяє виявити малопотужні передавачі або ПЕМВН. Роздільна здатність смуг пропускання з діапазоном частот від 10 Гц до 20 МГц відповідає вимогам сучасних стандартів до безпроводних комунікацій або імпульсним сигналам. Максимальні (max) середні (avg) і мінімальні (min) значення огинаючої спектру дозволяють класифікувати природу сигналу. Усі підозрілі сигнали можна ізолювати за допомогою функцій зручного маркера, потім сигнали можна збільшити і перенаправити в інший режим роботи приладу для детальнішого аналізу. Представлення даних у вигляді СПЕКТРОГРАМИ («ВОДОСПАД») є ідеальним рішенням для тривалого контролю ВЧ спектру і визначення наявних короткочасних сигналів і сигналів із стрибаючою частотою. Спектрограма також дозволяє визначити джерела випромінювання зі змінною потужністю і/або зі змінною смугою. Найбільш відмітною характеристикою є можливість одночасної реєстрації середньоквадратичних значень (RMS) і пікових значень спектрограми. На великому 7-дюймовому кольоровому екрані результати можуть бути представлені у вигляді: спектру спектрограми, спектру і спектрограми в одному вікні, таблиці з найбільш потужними сигналами.

**Активні антени для контролю ПЕМВН.** У комплекті із універсальними ЗВТ для апарат-

ного контролю ПЕМВН можливо використовувати такі зразки антено-фідерних пристроїв:

**1. Антена вимірювальна магнітного поля П6-119** – призначена для вимірювання напруженості магнітного поля в діапазоні частот від 9 кГц до 30 МГц. Рекомендована для метрологічних додатків і завдань оцінки електромагнітної сумісності (ЕМС) та ПЕМВН (наявні високі динамічні характеристики; діаметр рамки антени – 599 мм; можлива експлуатація в лабораторних і польових умовах, а також на рухомих засобах; конструкція передбачає можливість кріплення антени на опору будь-якого типу).

Технічні характеристики: діапазон частот 9 кГц – 30 МГц; коефіцієнт калібрування від 10 до 27 дБ (1/м); чутливість по полю, не гірше 25 мкА/м; межі похибки ±1,5 дБ; напруга живлення ±15 В; споживаний струм ±100 мА; габарити 84×599×690 мм; вага 2,5 кг.

**2. Антена вимірювальна магнітного поля П6-219** призначена для вимірювання напруженості магнітного поля в діапазоні частот від 20 кГц до 600 МГц. Рекомендована для метрологічних додатків і завдань оцінки ЕМС і ПЕМВН (в наявності високі динамічні характеристики; діаметр рамки антени – 100 мм; можлива експлуатація в лабораторних і польових умовах; конструкція передбачає можливість кріплення антени на опору будь-якого типу).

Технічні характеристики: діапазон частот 20 кГц – 600 МГц; коефіцієнт калібрування від 10 до -6 дБ (1/м); чутливість по полю, не гірше 25 мкА/м; межі похибки ±2 дБ; напруга живлення ±12 (±15) В; споживаний струм ±50 мА; габарити 191×88×69 мм; вага 0,5 кг.

**3. Антена вимірювальна електричного поля П6-120** призначена для вимірювання напруженості електричного поля в діапазоні частот від 9 кГц до 30 МГц. Рекомендована для метрологічних додатків і завдань оцінки ЕМС і ПЕМВН (наявні високі динамічні характеристики; можлива експлуатація в лабораторних і польових умовах, а також на рухомих засобах).

Технічні характеристики: діапазон частот 9 кГц – 30 МГц; коефіцієнт калібрування від -14 до 4,5 дБ (1/м); чутливість по полю, не гірше 25 мкА/м; межі похибки ±1,5 дБ; напруга живлення ±15 В; споживаний струм ±100 мА; габарити 1476×688×688 мм; вага 5 кг.

Також автори вважають за необхідне відмітити, що сайти [www.Tektronix.com](http://www.Tektronix.com), [www.ru.tektronix.com](http://www.ru.tektronix.com), [www.vdmais.kiev.ua](http://www.vdmais.kiev.ua) та багато інших дають змістовну інформацію про різні ручні радіопелен-

гаторні антени, наприклад такі як Alaris Df-A0047. Застосування зазначених антен дає можливість оптимізувати час пошуку місця ПЕМВН.

**Кабелі радіочастотні** – найкращий варіант застосування із нормованими радіочастотними характеристиками. Це унеможливить отримання різного роду невизначеностей при пошуку та вимірюванні джерел ПЕМВН.

**Висновки.** На базі аналізу викладеного матеріалу можливо дійти таких висновків:

- 1) задача аналізу можливості витоку інформації, що обробляється на ПЕОМ, через виникнення ПЕМВН надзвичайно актуальна на теперішній час;
- 2) апаратний контроль наявних та потенційних загроз несанкціонованого доступу та

зняття інформації, що має грифи обмеження доступу, – надважливе питання у просторі інформаційної безпеки функціонування державних та комерційних структур;

3) здійснення апаратного контролю ПЕМВН за допомогою ЗВТ універсального призначення дає можливість їх подвійного використання, як для вирішення зазначених задач, так і для виконання інших вимірювань;

4) матеріали, викладені в цій статті, можуть слугувати логічним доповненням до загальної класифікації засобів негласного отримання інформації та методик їх виявлення, розглянутих у дослідженні українських науковців К. Клименка, О. Костенка та О. Ільченка [18].

### Список літератури:

1. Зайцев А.П., Шелупанов А.А. Технические средства и методы защиты информации : учебное пособие для вузов. Москва : Горячая линия-Телеком, 2009. 616 с.
2. Носов, В.В., Манжай, А.В. Організація та забезпечення безпеки інформації : навчальний посібник. Харків : ХНУВС, 2007. 216 с.
3. Ленков С.В. Методы и средства защиты информации. Киев : Арий, 2010. Т. I. Несанкционированное получение информации. 464 с.
4. USB-анализаторы спектра реального времени Tektronix. CHIP NEWS Украина. *Инженерная микрорелектроника*. 2017. № 2. С. 50–53.
5. Воскресенський В.Б., Сивобородько А.В., Ковальчук В.А. Використання аналізаторів спектра реального часу для апаратного контролю у сфері інформаційної безпеки. Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави. *Збірник матеріалів VI науково-практичної конференції (Київ, 19 березня 2015 року). у 2-х частинах*. Київ : Центр навчальних, наукових та періодичних видань Національної академії СБ України. 2015. С. 44–48. Частина 2, 256 с.
6. Воскресенський В.Б., Скакун О.В., Сивобородько А.В. Портативні аналізатори спектра реального часу, як апаратні інструменти забезпечення контролю інформаційної безпеки на тактичному рівні. *Актуальні проблеми управління інформаційною безпекою держави. Збірник матеріалів VII науково-практичної конференції (Київ, 18 березня 2016 року). У 2-х частинах*. Київ : Центр навчальних, наукових та періодичних видань Національної академії СБ України, 2016, Ч. 1. С. 73–77.
7. Воскресенський В., Борисова М., Сивобородько А. Огляд портативних USB-аналізаторів, що можуть бути використані при вирішенні науково-технічних та судово-експертних завдань. CHIP NEWS Украина. *Инженерная микрорелектроника*. 2018. № 2. С. 74–78.
8. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Цифровые анализаторы спектра, сигналов и логики. Москва : Солон-Пресс, 2009. 247 с.
9. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микрорелектронике / Под ред. проф. В.П. Дьяконова Москва : ДМК Пресс, 2011. 688 с.
10. Про рішення Ради національної безпеки і оборони України від 29.12.2016 «Про доктрину інформаційної безпеки України : Указ Президента України 25.02.2017 №47/2017 / База даних «Законодавство України / ВР України». URL : <http://zakon2.rada.gov.ua/laws/show/47/2017>.
11. Хорошко В.А. Методы и средства защиты информации. Юниор, 2003. 504 с.
12. Keysight Technologies. Контрольно-измерительные решения. Каталог 2016. 377 с. URL : <https://prist.ru> (дата звернення: 22.03.2021).
13. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог 2016/2017. URL : [www.rohde-schwarz.ru](http://www.rohde-schwarz.ru) (дата звернення: 22.03.2021).
14. Офіційний сайт компанії MICRONIX. URL : <https://www.micronix-jp.com>.
15. Вакуленко М.О., Вакуленко О.В. Тлумачний словник із фізики. Київ : Видавничо-поліграфічний центр «Київський університет», 2008. 767 с.
16. Борисова М.О., Воскресенський В.Б. Портативні ручні аналізатори сигналів серії MSA-500. *Приладобудування: стан і перспективи : збірник матеріалів XIX міжнародної науково-технічної конференції (Київ, 13-14 травня 2020 р.)*. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2020. С. 184. URL : <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/33597> Секція 11. Метрологія та інформаційно-вимірювальні технології.

17. Електронний ресурс фірми «Інкотел Системс». URL : <https://incotel.com.ua>.

18. Клименко К.О., Костенко О.В., Ільченко О.М. Загальна класифікація засобів негласного отримання інформації та методик їх виявлення. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* № 6. 2020. С. 6–15.

### **Skakun O.V., Voskresenskiy V.B., Sivoborodko A.V. REVIEW OF PORTABLE SIGNAL ANALYZERS THAT CAN BE USED TO DETECT SPURIOUS ELECTROMAGNETIC RADIATION**

*The article provides examples of classification of incidental electromagnetic radiation and guidance (IEMRG) in different countries and technical channels of possible information leakage. The parameters of information leakage due to IEMRG, their names, units of measurement and physical quantities are revealed. It is shown that hardware control of real and potential threats of unauthorized access and removal of information marked as restricted access is one of the most important tasks in the field of information security, especially now. The authors note that hardware control can be carried out both by specialized measuring equipment (ME) and ME for universal use.*

*The main research material in the proposed article is devoted to a review analysis of portable spectrum analyzers and signal analyzers that can be used to detect IEMRG, which are inherent in personal electronic computers: flash drives, magnetic disks, printers, keyboards and keyboards. It is stated that the interception of IEMRG is based on the widespread use of various ME, means of analysis and registration of information; antenna-feeder devices; broadband antenna amplifiers.*

*The peculiarities of the parameters of modern spectrum and signal analyzers are analyzed, and proposals for their selection are also made. A concise but fairly thorough review of these portable ME from the following leading manufacturers is provided: spectrum analyzers from Rohde & Schwarz R & S®FSH 4/8/13/20 (Germany); manual fieldFox signal analyzers from Keysight Technologies, part of Agilent Technologies (USA); devices of the 500 series from the MICRONIX company (Japan); portable IDA 3106 signal analyzer with monitoring receiver and direction finding functions from the NARDA consortium (Germany).*

*The article also presents the brands and parameters of active antennas, which the authors recommend to use as antenna-feeder devices complete with ME universal purpose for IEMRG control.*

**Key words:** *incidental electromagnetic radiation and guidance, information leakage channels, spectrum analyzer, signal analyzer, radio signals, resolution, resolving power, amplitude, frequency, measurements, frequency range.*

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 681.3.082.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/12>

*Арпендій С.П.*

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

### ЗАСТОСУВАННЯ ВЕКТОРНОЇ МАШИНИ ПІД ЧАС РОБОТИ З МАСИВАМИ ГРАФІЧНИХ ДАНИХ

*Проведено аналіз ефективності застосування сучасних методів розпізнавання візуальних об'єктів у масивах графічних даних. Представлено і класифіковано програмні і нейромережеві алгоритми, що застосовуються у галузі роботи з матрицями зображень, зокрема методику подання квадратної інтегрованої функції за ортонормованою серією, породженою вейвлетом (вейвлет-перетворення), і підходи до зменшення розмірності даних за мінімальних інформаційних утрат, що базуються на методі головних компонент. Для формалізації оцінки ефективності роботи алгоритму під час виділення візуальних образів у процесі обробки масиву графічних даних необхідно ввести цільові функції ефективності. На основі визначення екстремумів цільових функцій ефективності, що репрезентують рівень точності виділення візуального об'єкта, рівень навантаження на обчислювальні ресурси та час обробки запиту відповідно обсягу вхідних даних, можна побудувати систему оцінки загальної ефективності алгоритму і сформулювати методичні рекомендації щодо його оптимізації відповідно до поставленого завдання. В основі моделювання процедури вейвлет-аналізу масивів графічних даних лежить формалізація на математичному рівні функції відповідності роздільної здатності підграфа точності виділення візуальних образів та навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу. Побудовано методологію оцінки ефективності алгоритмів автоматичного аналізу графічних даних із застосуванням нейромережевих алгоритмів, що базується на показнику рівня точності виділення візуального об'єкта, показнику рівня навантаження на обчислювальні ресурси системи та показнику часу обробки запиту відповідно до розміру масиву вхідних даних, які підлягають обробці. Розроблено методику автоматичного розпізнавання візуальних образів, що базується на комбінованому застосуванні машини опорних векторів, вейвлет-перетворення та методу головних компонент для лінійної, поліноміальної ядерної функції і радіальної базисної функції. Проведено аналіз відкритих статистичних результатів досліджень та визначено оптимальну архітектуру організації алгоритмів на основі сімлета для лінійної ядерної функції. Узагальнено методологію оптимізації та оцінки ефективності відповідної програмно-нейромережевих алгоритмів розпізнавання.*

**Ключові слова:** графічні дані, розпізнавання візуальних об'єктів, векторна машина, метод головних компонент, вейвлет-перетворення, нейромережевий алгоритм, ядерна функція.

**Постановка проблеми.** Зростання актуальності завдання обробки великих масивів графічних даних, що спостерігається протягом останніх двох десятиріч, можна пов'язати з набором факторів, що формують відповідний мегатренд. Систематизуємо відповідні фактори у рамках таких груп:

– збільшення загального обсягу та якості графічних даних (роздільної здатності, динамічного діапазону і кольорової схеми), що пов'язано з упровадженням новітніх систем фото- і відеореєстрації;

– масштабування інфраструктури передачі, обробки і збереження даних (експоненційне збільшення показників перепускності інформаційних каналів, потужності обчислювального ресурсу та ємності цифрових носіїв інформації);

– упровадження концепцій автоматизації під час роботи з великими обсягами даних, що зумовило перехід від взаємодії на рівні «людина – людина» (Person-to-Person, P2P) та «людина – машина» (Person-to-Machine, P2M) до повністю автоматизованого способу обробки «машина – машина» (Machine-to-Machine, P2M);



– адаптація та розвиток програмних алгоритмів обробки графічних даних (алгоритми розрахунку власних векторів та власних значень вхідних даних, алгоритми на основі методу головних компонент, алгоритми, що базуються на визначенні опорних векторів і, відповідно, побудові машини опорних векторів, алгоритми, у яких застосовується прихована марківська модель та вейвлет-перетворення);

– поява, впровадження та розвиток нейромережових алгоритмів обробки графічних даних.

Для формалізації оцінки ефективності роботи алгоритму під час виділення візуальних образів у процесі обробки масиву графічних даних необхідно ввести цільові функції ефективності. На основі визначення екстремумів цільових функцій ефективності, що репрезентують рівень точності виділення візуального об'єкта, рівень навантаження на обчислювальні ресурси та час обробки запиту відповідно обсягу вхідних даних, можна побудувати систему оцінки загальної ефективності алгоритму і сформулювати методичні рекомендації щодо його оптимізації відповідно до поставленого завдання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз фахових видань, присвячених тематиці машинної обробки масивів графічних даних із метою виділення візуальних образів, указав на пріоритет методів, що базуються на математичному моделюванні, в основу якого покладено вей-

влет-перетворення [1–8]. Особливість зазначеного підходу полягає у застосуванні процедури циклічного збільшення роздільної здатності масиву даних шляхом обробки високочастотної сфери спектру нестационарного сигналу, що репрезентує матрицю вхідного зображення. Таким чином, було розглянуто методики з оптимізації рівня навантаження на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи під час застосування вейвлет-аналізу графічних даних [3–5] та алгоритми стаціонарного вейвлет-перетворення [4–8]. Крім того, проведений аналіз включав у себе алгоритми, що базуються на впровадженні методів факторного аналізу в статистиці (зокрема, методу головних компонент) за попередньої обробки та аналізу графічних даних [9; 10], застосування комбінованих програмно-нейромережових алгоритмів за ідентифікації обличчя і розпізнавання міміки [11–13]. Зазначені підходи порівнювалися відповідно до вказаних вище показників ефективності з алгоритмами на основі машини опорних векторів [14; 15] та марківських моделей [16; 17].

**Постановка завдання.** Проведений аналіз показав на перевагу алгоритмів, що базуються на вейвлет-аналізі, методі головних компонент та нейромережових алгоритмах. Також було вказано на необхідність побудови комплексної методики машинного аналізу великих масивів графічних даних із метою виділення візуальних образів за умов мінімального навантаження на обчислювальний



Рис. 1. Оцінка методів обробки графічних даних відповідно до розширення запитів та розвитку функціональних можливостей апаратно-програмного комплексу

ресурс апаратно-програмного комплексу та мінімальної затримки під час обробки вхідного запиту, що було поставлено за мету дослідження.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

1. Математичне моделювання вейвлет-аналізу графічних даних

В основі моделювання процедури вейвлет-аналізу масивів графічних даних лежить формалізація на математичному рівні функції відповідності роздільної здатності підграфа точності виділення візуальних образів та навантаженню на обчислювальний ресурс апаратно-програмного комплексу [4; 5]. Відповідно до зазначеної моделі, вхідні графічні дані подаються у вигляді нестационарного сигналу, що поділяється на низькочастотну і високочастотну сфери. Низькочастотна сфера спектру сигналу репрезентує форму зображення, а високочастотна – репрезентує окремі деталі.

Алгоритм проведення вейвлет-аналізу вхідних даних включає у себе послідовне виконання двох процедур:

1. циклічна процедура – розклад часового ряду, що складається з  $i \in [1; I - 1]$  ітерацій;
2. процедура відновлення вхідного сигналу.

Розрахунок на основі масиву вхідних даних вейвлет-коефіцієнтів відповідно до  $I$  вейвлет-метрик може бути проведено за формулою, згідно з якою показники  $a(i)$  (де  $i = I - 1$ ) та  $b(i)$  (де  $i \in [1; I - 1]$ ) обчислюються ітераційним шляхом через низькочастотний та високочастотний коефіцієнти ( $\kappa_L(i)$  та  $\kappa_H(i)$ , відповідно):

$$[a(I-1), b(I-1), b(I-2), \dots, b(1)] : \begin{cases} a(i) = \kappa_L(i-1) \cdot a(i-1) \\ b(i) = \kappa_H(i-1) \cdot b(i-1) \end{cases} \quad (1)$$

для  $i \in [2; I - 1]$ , де низькочастотний та високочастотний коефіцієнти також визначаються ітераційним шляхом через показник кількості нулів у кодівейвлет-фільтри (показник  $\kappa_0$ ):

$$\{\kappa_L(i), \kappa_H(i)\} : \begin{cases} \kappa_L(i) = \kappa_0 \cdot \kappa_L(i-1) \\ \kappa_H(i) = \kappa_0 \cdot \kappa_H(i-1) \end{cases}, \text{де } i \in [2; I - 1]. \quad (2)$$

Також математична модель вейвлет-аналізу включає у себе два оператори субдискретизації:

- непарний оператор субдискретизації  $O_a$ ;
- парний оператор субдискретизації  $O_b$ .

На їх основі можна розрахувати ортогональне перетворення для компонент  $a(i)$  та  $b(i)$ :

$$\begin{cases} a(i) : (O_a \cdot \kappa_L(i-1), O_b \cdot \kappa_H(i-1)) \\ b(i) : (O_b \cdot \kappa_L(i-1), O_a \cdot \kappa_H(i-1)) \end{cases} \quad (3)$$

Аналогічно на основі непарного і парного операторів оберненого перетворення ( $T_a$  та  $T_b$  відповідно) можна визначити рефракторизоване вейвлет-перетворення як функцію  $a(i-1) = f(a(i), a(i), T_a(i-1)T_b(i-1))$ . Зазначений

підхід дає змогу побудувати математичну модель процесу розпізнавання графічних зображень на основі симетричної вейвлет-функції (сімлету) й оптимізувати ефективність відтворення вхідного сигналу шляхом зменшення спотворення фази.

2. Побудова комбінованого алгоритму розпізнавання на основі методу головних компонент

Включення в алгоритм аналізу графічних даних та відповідну математичну модель методу лінійного відображення (зокрема, методу головних компонент) дає змогу розташувати точки вибірки в мультимодальному просторі. При цьому як дискримінантний вектор, що застосовується під час виділення ознак зображення, вибирається напрям, що характеризується найбільшою дисперсією [9; 10].

Адаптація методу головних компонент для аналізу графічних даних із метою виділення ознак візуальних об'єктів полягає у переведенні матриці зображення у набір частотних компонент. На рівні побудови математичного апарату підграф низькочастотної області спектру сигналу може бути представлено як набір векторів графічного зображення  $\mathbf{X}_j : \{x_j\}$ , де  $j \in [1; J]$  — кількість навчальних вибірок. Відповідно, коваріаційна матриця зразків навчальної вибірки визначається як:

$$\mathbf{M} = \sum_{j=1}^J (\Delta \mathbf{X}_j \cdot (\Delta \mathbf{X}_j)^T) \text{де } \Delta \mathbf{X}_j = \mathbf{X}_j - \frac{\sum_{j=1}^J (x_j)}{J}. \quad (4)$$

Якщо записати матрицю  $\mathbf{M}$  як добуток  $\mathbf{M}_0 \times (\mathbf{M}_0)^T$ , то система координат будуватиметься на основі набору векторів ознак, що відповідають ненульовим значенням матриці  $\mathbf{M}_0$ . Оптимізація навантажень на обчислювальний ресурс апаратно-програмної платформи здійснюється через розрахунок власних значень і власних векторів матриці  $\mathbf{M}_0$  за сингулярним розкладом. У процесі виділення візуального образу у матриці зображення здійснюється проєціювання у простір характерних ознак, що надалі використовуються як вхідні дані класифікатора сингулярного розкладу. На основі статистичних даних, представлених у дослідженні застосування алгоритмів візуальних об'єктів [13], було розраховано параметр ефективності розпізнавання (рис. 2–4).

Усі алгоритми, статистичний аналіз результатів виконання яких представлено на графіках, що наведені вище, базуються на машині опорних векторів. Окрім того, алгоритми включають у себе застосування методу вейвлет-перетворення (ВП), методу головних компонент (ГК) або комбінованого методу (КМ). Кожен підхід аналізувався відповідно до набору положень об'єкта аналізу

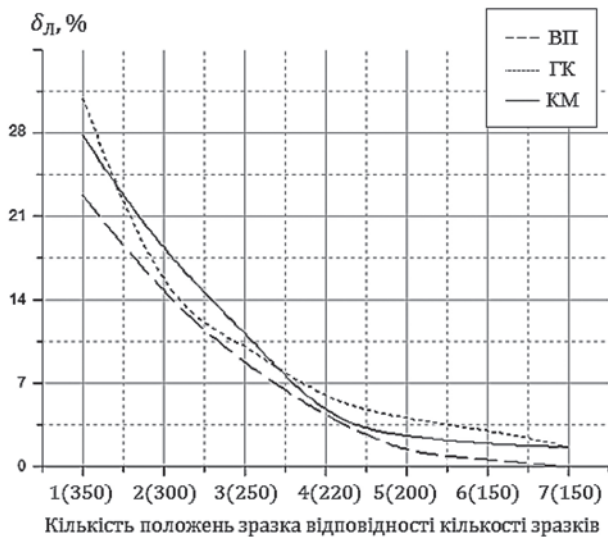


Рис. 2. Залежність показника  $\delta_L$  відносно загальної кількості і кількості положень зразків навчальної вибірки

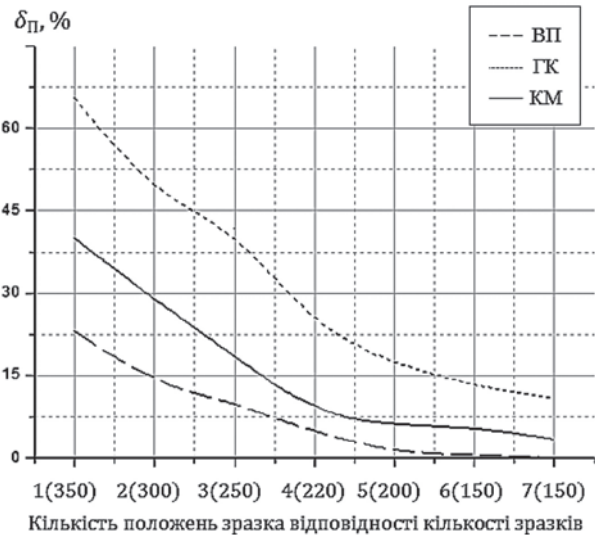


Рис. 3. Залежність показника  $\delta_P$  відносно загальної кількості і кількості положень зразків навчальної вибірки

(у рамках даного дослідження аналізувалося положення обличчя) та кількості зразків, що відповідає даному положенню (загальна кількість зразків при цьому послідовно зростала). Дослідження було проведено для моделей на основі лінійної ядерної функції, поліноміальної ядерної функції і радіальної базисної функції, що адаптувалася як ядерна функція. У результаті дослідження для кожної моделі було отримано залежності показників помилкового виділення візуального об'єкта  $\delta_L$  (моделі на основі лінійної ядерної функції),  $\delta_{LP}$  (моделі на основі поліноміальної ядерної функції) і  $\delta_P$  (моделі на основі радіальної базисної функції). Найбільша ефективність була показана для алгоритмів, що базуються на машині опорних векторів із застосуванням вейвлет-перетворення, тоді як комбінований метод не показав зростання показників ефективності точності виділення візуальних об'єктів.

**Висновки.** У результаті проведеного дослідження ефективності застосування сучасних методів розпізнавання ознак візуальних об'єктів у великих масивах графічних даних було представлено і класифіковано алгоритми, що застосовуються у відповідній галузі. Побудовано методологію оцінки ефективності алгоритмів автоматичного аналізу графічних даних, що базується на показнику рівня точності виділення візуального об'єкта, показнику рівня навантаження на обчислювальні ресурси системи та показнику часу обробки запиту відповідно до розміру масиву вхідних даних, що

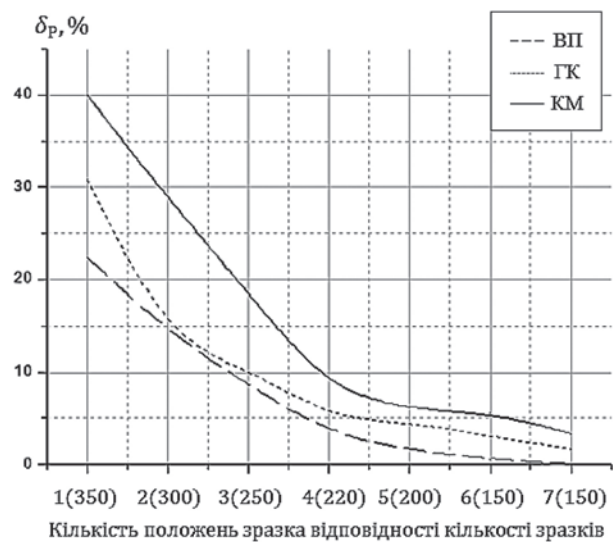


Рис. 4. Залежність показника  $\delta_P$  відносно загальної кількості і кількості положень зразків навчальної вибірки

підлягають обробці. Розроблено методуку автоматичного розпізнавання візуальних образів, що базується на комбінованому застосуванні машини опорних векторів та вейвлет-перетворення і методу головних компонент для лінійної і поліноміальної ядерної функції і радіальної базисної функції. Проведено аналіз відкритих статистичних результатів досліджень та визначено оптимальну архітектуру організації алгоритмів машинного розпізнавання візуальних даних.

**Список літератури:**

1. Chen X., Wu W., Fan J. Overview of face recognition technology. *China Academic Association of Instrumentation Youth Conference*, 2010.
2. Hu H. Variable lighting face recognition using discrete wavelet transform. *Pattern Recognition Letters*. 2011. Vol. 32(13). P. 1526–1534. DOI:10.1016/j.patrec.2011.06.009.
3. Hazra T.K., Mazumder A., & Maity D. A new perspective of wavelet based image denoising using different wavelet thresholding. *International Journal of Science and Research (IJSR)*. 2016. Vol. 5(8). P. 1504–1509. DOI:10.21275/art20161212.
4. Ur-Rehman O., & Zivic N. Discrete Wavelet Transform based Watermarking for Image Content Authentication. *Proceedings of the 6th International Conference on Pattern Recognition Applications and Methods*. 2017. DOI: 10.5220/0006232306200625.
5. Nigam V., Bhatnagar S., & Luthra S. Image denoising using wavelet transform and wavelet transform with enhanced diversity. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 403. P. 866–870.
6. Gasparese G. Data compression of power quality disturbances using wavelet transform and spline interpolation method. *2010 9th International Conference on Environment and Electrical Engineering*. 2010. DOI: 10.1109/eeeic.2010.5489992.
7. Ahanonu E., Marcellin M., & Bilgin A. Lossless image compression using Reversible INTEGER wavelet transforms and convolutional neural networks. *2018 Data Compression Conference*. 2018. DOI:10.1109/dcc.2018.00048.
8. Alorf A.A. Performance evaluation of the PCA versus improved PCA (ipca) in image compression, and in face detection and recognition. *2016 Future Technologies Conference (FTC)*. 2016. DOI:10.1109/ftc.2016.7821659.
9. Mavroeidis D., Vazirgiannis M. Stability based sparse LSI/PCA: incorporating feature selection in LSI and PCA. *ECML 2007. LNCS (LNAI)*. 2007. Vol. 4701. P. 226–237. Springer, Heidelberg.
10. Arasy R., & Basari. Detection of hypertensive retinopathy using principal component analysis (PCA) and backpropagation neural network methods. *MCPRLNCS*. 2019. Vol. 9495. DOI:10.1063/1.5096735.
11. Sharma, S., & Sharma, M.J. Distorted face image segmentation in PCA with neural network. *2015 International Conference on Computer, Communication and Control (IC4)*. 2015. DOI: 10.1109/ic4.2015.7375506.
12. Biswas, S., Sil, J., Maity, S.P.: PCA based face recognition on curvelet compressive measurements. *CICBA 2017. CCIS*. Springer, Singapore. 2017. Vol. 775. P. 217–229. DOI: 10.1007/978-981-10-6427-2\_18.
13. Gumus E., Kilic N., Sertbas A., Ucan O.N. Evaluation of face recognition techniques using PCA, wavelets and SVM. *Evaluation of Face recognition techniques using PCA, wavelets and SVM. Expert Syst.* 2010. Appl. 37. P. 6404.

**Arpentii S.P. APPLICATION OF VECTOR MACHINE FOR GRAPHIC DATA ARRAYS ANALYSIS**

*The analysis of modern method efficiency of graphic data visual objects recognition is carried out. The software and ANNs-algorithms used in the field of working with image matrices are presented and classified, in particular the method of presenting a quadratic integrated function on an orthonormal series generated by a wavelet (wavelet transformation) and approaches to reduce data dimensionality with minimal information losses based on the principal components method. A methodology for evaluating the effectiveness of automatic graphical data analysis algorithms using ANNs-algorithms is based on the level of accuracy of visual object selection, the level of load on the system computing resources and the query processing time according to the size of the input data to be processed. A method of automatic recognition of visual objects based on the combined application of the support-vector machines, wavelet transform and the principal components method for linear, polynomial nuclear function and radial basis function has been developed. To formalize the evaluation of the efficiency of the algorithm in selecting visual images during the processing of the amount of graphic data, it is necessary to involve targeted effectiveness functions. Having determined the extremes of targeted effectiveness functions that represent the level of accuracy of selecting a visual object, the level of loading on computing resources and time processing, in accordance with the volume of input data, there can be constructed a system for assessing the overall efficiency of the algorithm and methodological recommendations can be worked out for its optimization in relation to the task set. The basis of the procedure of wavelet analysis of graphic data lies in mathematical formalization of the correspondence of subcraft's resolution function to the accuracy of selecting visual images and load on the computing resource of the hardware and software complex. The analysis of open statistical results of researches is carried out and the optimum architecture of the organization of algorithms on the basis of a simlet for a linear nuclear function is defined. The methodology of optimization and evaluation of the efficiency of the corresponding software neural network recognition algorithms is generalized.*

**Key words:** graphic data, recognition of visual objects, vector machine, principal components method, wavelet transform, neural network algorithm, kernel function.

**Білевська О.С.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПРОГРАМ СЕРТИФІКАЦІЇ WPA2 ТА WPA3 МЕРЕЖІ WI-FI

Більшість сучасних мереж Wi-Fi використовує програму сертифікації пристроїв бездротового зв'язку для захисту переданих даних WPA2 (Wi-Fi Protected Access). Проте, оскільки WPA2 понад 15 років, Wi-Fi Alliance (WECA) у 2018 р. анонсував новий і більш безпечний протокол WPA3. Wi-Fi Alliance – це неурядова організація, яка займається сертифікацією і випуском Wi-Fi-обладнання та є правовласником марки Wi-Fi. У склад альянсу входить 36 компаній, включаючи Apple, Microsoft, Qualcomm та ін.

Найбільш поширеним методом атаки на мережі Wi-Fi є перехоплення пакетів, які пов'язані з аутентифікацією клієнта (рукоштовання – handshake) із подальшим перебором пароля за словником. На думку розробників, основна перевага WPA3 полягає у тому, що в її основі лежить аутентифікація клієнта Dragonfly, завдяки якій практично неможливо зламати пароль мережі. Проте якщо користувач не використовує додаткові методи захисту, такі як HTTPS (Hyper Text Transfer Protocol Secure), це дає змогу зловмиснику викрасти конфіденційну інформацію, таку як паролі, електронні листи та ін.

У разі використання вразливості зловмисник, що знаходиться в зоні дії мережі жертви, зможе відновити пароль Wi-Fi та проникнути в мережу цілі. Сьогодні бездротові мережі Wi-Fi знайшли своє застосування майже у всіх галузях завдяки високій мобільності користувачів, простоті використання мережі і простоті встановлення даної технології. Ця технологія стає обов'язковим складником не лише домашніх, а й корпоративних мереж. Рукоштовання Dragonfly використовується в корпоративних мережах Wi-Fi, де для контролю доступу потрібні ім'я користувача та пароль.

Практично в будь-якому алгоритмі, для чого б він не був призначений, можна знайти слабкі місця. Оскільки протокол WPA3 знаходиться ще на відносно ранніх етапах упровадження, то є можливість більш детально його дослідити на предмет уразливостей.

**Ключові слова:** Wi-Fi-мережа, аутентифікація, handshake, ідентифікатор, доступ, протокол, точка доступу, Key Reinstallation Attacks, Dragonfly, Dragonblood, Wi-Fi Protected Access.

**Постановка проблеми.** Вади в налаштуваннях безпеки бездротових мереж або поява нелегальних точок доступу, які підключені до бездротової мережі, несуть велику загрозу несанкціонованого доступу до ресурсів корпоративної мережі.

Багато компаній змушені відмовитися від використання бездротових мереж виключно з міркувань безпеки та збереження конфіденційності інформації. Володіючи інформацією про вади протоколів безпеки бездротового зв'язку, Wi-Fi-зловмисники можуть приєднуватися до бездротової мережі і входити в дротову корпоративну мережу, як і офіційний її користувач, та отримувати доступ до внутрішніх ресурсів через мережу Інтернет.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформація про критичні проблеми програми сертифікації бездротового зв'язку WPA2 була розкрита у 2017 р. Ці вади дають змогу оминати захист і, як результат, прослуховувати трафік Wi-Fi, який курсує між точкою доступу і користувачем. Комплекс уразливостей у WPA2 отримав

назву KRACK (Key Reinstallation Attacks). Він був виявлений зведеною групою дослідників із різних компаній і університетів. Керівник групи Меті Ванхоф повідомив про вразливості виробникам техніки та представникам організації US-CERT у липні 2017 р. Виробники обладнання випустили оновлення програмного забезпечення, які усувають цей комплекс уразливості, проте залишається ще достатньо велика кількість обладнання з неоновленим програмним забезпеченням.

Хоча протокол WPA3 покладається на більш безпечне рукоштовання, відоме як Dragonfly, яке спрямоване на захист мереж Wi-Fi від автономних атак за словником, у квітні 2019 р. Меті Ванхоф та Еял Ронен знайшли п'ять вад нової програми сертифікації, які отримали назву Dragonblood, а в серпні 2019 р. було виявлено додаткові дві вразливості.

Водночас, незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам захищеності програм сертифікації Wi-Fi-мереж, стрімкий розвиток систем зв'язку та протоколів їх

захисту зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою статті є огляд уразливостей найбільш поширених програм сертифікації WPA2 та WPA3, які дають змогу отримати паролі мереж Wi-Fi та, відповідно, нелегітимної активності з можливістю блокування несанкціонованих підключень до мережі або оповіщення сторонніх засобів фільтрації і блокування трафіку. Метою аналізу є своєчасне виявлення потенційних загроз і реагування на них, не надаючи негативного впливу на функціонування мережі зв'язку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Першим протоколом безпеки Wi-Fi був WEP (Wired Equivalent Privacy), який забезпечував захист мережі, можна сказати, тими ж методами, що й захист у дротових мережах. Для перехоплення трафіку Wi-Fi-мережі з WEP потрібно перебувати в зоні прийому сигналу. Для шифрування трафіку WEP використовується ключовий потік, який отримується шляхом змішування пароля і вектора ініціалізації. Вектор ініціалізації в WEP – це постійно змінюване 24-бітове число. Зі зростанням обчислювальних потужностей персональних комп'ютерів довжина вектора ініціалізації стала недостатньою. Таким чином, незалежно від складності ключа розкрити будь-яку передачу стало можливо після статистичного аналізу достатньої кількості перехоплених пакетів.

Для вирішення проблеми Wi-Fi Alliance запропонував надбудову над WEP, яка давала змогу усунути уразливість без заміни обладнання. Основною ідеєю була зміна ключів. На базі IEEE 802.11 був розроблений стандарт WPA. Його основою став протокол цілісності тимчасових ключів TKIP (Temporal Key Integrity Protocol). Він значно посилював WEP за допомогою дворівневої системи векторів ініціалізації. Іншим нововведенням у WPA стала технологія WPS (Wi-Fi Protected Setup), яка дає змогу бездротовим пристроям спрощено отримати доступ до Wi-Fi за умови фізичного доступу до маршрутизатора.

У 2006 р. був створений та реалізований у багатьох бездротових пристроях протокол WPA2, який став обов'язковим для всіх сертифікованих пристроїв. Кардинальною відмінністю WPA2 від WPA стало індивідуальне шифрування даних кожного користувача та більш надійний алгоритм шифрування – AES (Advanced Encryption Standard).

Довгий час основними методами зламу маршрутизаторів, які працювали по WPA2, були злам PIN-коду під час підключення через WPS або

перехоплення рукописання і підбір ключа методом підбору. Убезпечити себе можна було, відключивши WPS і встановивши досить складний пароль. Тому до недавнього часу WPA2 вважався надійним. У жовтні 2017 р. було опубліковано опис атаки KRACK (Key Reinstallation Attack), в основі якої лежить уразливість чотирьохелементного рукописання WPA2. Проблема була знайдена у самому протоколі, а не в окремих пристроях, тому ця вразливість притаманна всім користувачам мережі Wi-Fi. Залежно від конфігурації мережі також існує можливість маніпулювання даними.

Рукописання виконується тоді, коли клієнт хоче підключитися до захищеної мережі Wi-Fi. У процесі підтверджується, що обидва боки (клієнт і точка доступу) мають коректні облікові дані. Водночас рукописання використовується для узгодження ключа шифрування, який згодом застосовуватиметься для захисту трафіку. Зловмисник може влаштувати атаку типу man in the middle (людина всередині) і примусити учасників мережі перевстановити ключі шифрування, які захищають трафік WPA2. Якщо мережа налаштована на використання WPA-TKIP або GCM (Galois/Counter Mode Protocol), зловмисник зможе не лише прослуховувати трафік, а й увести пакети в дані жертви.

Цей метод є універсальним і працює проти будь-яких пристроїв, які підключені до мережі та не захищені оновленим програмним забезпеченням. Головна умова цієї атаки полягає у тому, що зловмиснику необхідно перебувати в зоні дії мережі Wi-Fi, тобто атаку не можна проводити віддалено.

Заміна пароля не допоможе уникнути атаки. Для захисту необхідно оновити прошивки роутерів і всіх пристроїв. Також як додаткові заходи безпеки бажано використовувати VPN-мережі, але до їх вибору також варто підходити обережно, оскільки багато з них не можуть гарантувати безпечне підключення. Також для захисту від атаки KRACK у деяких випадках може захистити використання протоколу HTTPS. Сам протокол HTTPS не можна назвати абсолютно безпечним, проте він може бути додатковим елементом шифрування та захисту від атак, заснованих на прослуховуванні мережевого трафіку.

27 червня 2018 р. Wi-Fi Alliance оголосив про закінчення розроблення нового стандарту безпеки – WPA3. Під час розроблення WPA3 стояла необхідність усунути концептуальні недоробки, які були виявлені з появою KRACK. Оскільки ключова вразливість ховалася в чотирьохелементному

рукостисканні, у WPA3 додалася обов'язкова підтримка більш надійного методу з'єднання – SEA (Simultaneous Authentication of Equals), також відомого як Dragonfly. Технологія SEA вже застосовувалася в mesh-мережах і описана в стандарті IEEE 802.11s. Вона заснована на протоколі обміну ключами Діффі – Хеллмана з використанням кінцевих циклічних груп. SEA відноситься до протоколу типу PAKE (Password-authenticated key agreement) і надає інтерактивний метод, згідно з яким дві і більше сторін встановлюють криптографічні ключі, які засновані на знанні пароля однією або декількома сторонами. Результуючий ключ сесії, який отримує кожна зі сторін для аутентифікації з'єднання, вибирається на основі інформації з пароля, ключів і MAC-адрес обох сторін. Якщо ключ однією зі сторін виявиться зкомпрометованим, це не спричинить компрометації ключа сесії. Навіть дізнавшись пароль, зловмисник не зможе розшифрувати пакети. Ще одним нововведенням WPA3 є підтримка PMF (Protected Management Frames) для контролю цілісності трафіку. У WPA3 були розроблені, проте не потребують сертифікації, програми Wi-Fi Easy Connect і Wi-Fi Enhanced Open.

Wi-Fi Easy Connect дає змогу реалізувати спрощене налаштування пристроїв без екрану. Для цього можна використовувати інший пристрій, який уже підключений до бездротової мережі. Easy Connect заснований на застосуванні аутентифікації за відкритими ключами і може використовуватися в мережах з WPA2 і WPA3. Ще одна особливість Wi-Fi Easy Connect – це можливість заміни точки доступу без необхідності переналагоджування усіх пристроїв.

Wi-Fi Enhanced Open забезпечує шифрування всіх потоків даних між клієнтом і точкою доступу. Ця технологія дає змогу захистити приватність користувача в публічних мережах, де не потрібна аутентифікація. Для генерації ключів у таких мережах застосовується процес узгодження з'єднання, який реалізується розширенням OWE (Opportunistic Wireless Encryption).

Підтримка цих технологій не є обов'язковою для сертифікації по WPA3, проте виробник може за бажання сам додати їх підтримку в продукт.

Як і в WPA2, у WPA3 передбачено два режими роботи: WPA3-Personal і WPA3-Enterprise:

– WPA3-Personal забезпечує надійний захист, особливо якщо користувач задав стійкий пароль, який не можна отримати перебором за словником. Але якщо пароль не зовсім складний, то мають допомогти нове обмеження на число спроб аутентифікації в рамках одного рукостискання.

Таке обмеження не дасть змоги підбирати пароль у режимі поза мережею. Замість ключа PSK (Pre-Shared Key) у WPA3 реалізована технологія SEA.

– WPA3-Enterprise забезпечує шифрування на основі мінімум 192-розрядних ключів. Для аутентифікованого шифрування рекомендовано застосування 256-розрядних ключів GCM-256, для передачі і підтвердження ключів використовується HMAC із хешами SHA-384, для узгодження ключів і аутентифікації – ECDH і ECDSA із 384-розрядними еліптичними кривими, для захисту цілісності кадрів – протокол VIP-GMAC-256.

Уразливості протоколу Dragonfly отримали назву Dragonblood та налічують сім різних уразливостей. Перші п'ять були виявлені у квітні 2019 р. Їх можна розділити за принципом на три види, а саме: атака типу «відмова в обслуговуванні», дві атаки зі зниженням стандарту протоколу передачі даних та дві атаки з витоку інформації по каналу передачі службової інформації. У серпні 2019 р. було виявлено додаткові вразливості класу Dragonblood у стандарті WPA3. Подібно попереднім нові вразливості також дають змогу зловмиснику отримувати інформацію через криптографічні операції WPA3 і здійснювати перебор паролів за словником для авторизації в мережах Wi-Fi.

Атака типу «відмова в обслуговуванні» не так важлива, оскільки вона призводить тільки до збою WPA3 сумісних точок доступу, інші чотири можна використовувати для відновлення паролів користувача.

Дві атаки на зниження стандарту протоколу передачі даних, і дві атаки з витоку по службовим каналам використовують недоліки опублікованого проекту обміну ключами Dragonfly стандарту WPA3 – механізму, за допомогою якого клієнти проходять аутентифікацію на маршрутизаторі WPA3 або точці доступу.

У разі атаки зі зниженням на більш ранні версії протоколу мережі з підтримкою Wi-Fi WPA3 можуть бути змушені використовувати більш старі і небезпечні системи обміну паролями, які дають змогу зловмисникам отримувати паролі мережі з використанням існуючих недоліків і уразливостей.

Під час атаки за типом витоку інформації під час використання службового каналу бездротової мережі з підтримкою Wi-Fi WPA3 зловмисник може «обдурити» пристрій, використовуючи більш слабкі алгоритми, які пропускають обмежені обсяги інформації про пароль мережі. За декількох ітерацій у підсумку може бути відновлений повний пароль.

Якщо клієнт і точка доступу підтримують WPA2 і WPA3, зломисник може налаштувати підроблену точку доступу, яка буде обмежена проколом обміну даними WPA2. Це призводить до того, що клієнт підключається за допомогою чотирьохелементного рукоствискання WPA2. Даних, отриманих у процесі обміну рукоствисканнями до моменту зниження протоколу з WPA3 до WPA2, достатньо для запуску атаки за словником в автономному режимі.

Розглянемо атаку по бічному каналу на основі кеша. Алгоритм кодування пароля в Dragonfly, також відомий як алгоритм «полювання та клювання» (hunting and pecking), містить умовні гілки. Якщо зломисник може визначити, яка гілка з гілки if-then-else була взята, він може дізнатися, чи був знайдений елемент пароля в конкретній ітерації цього алгоритму. На практиці було виявлено, якщо зломисник може запустити неперіоритетний код на комп'ютері-жертві, то може використовувати атаки на основі кеша, щоб визначити, яка гілка була зроблена в першій ітерації алгоритму генерації пароля. Ця інформація може бути використана для виконання атаки з поділом пароля (це схоже на автономну атаку за словником).

Ця уразливість відстежується з використанням ідентифікатора CVE-2019-9494. Захист полягає у заміні умовних гілок, які залежать від секретних значень та утилітами вибору з постійним часом. Реалізації повинні також використовувати обчислення символу Лежандра з постійним часом.

У разі атаки по бічному каналу на основі синхронізації, коли рукоствискання Dragonfly використовує певні мультиплікативні групи, алгоритм кодування пароля використовує змінне число ітерацій для кодування пароля. Точна кількість ітерацій залежить від пароля, який використовується, і MAC-адреси точки доступу і клієнта. Зломисник може виконати віддалену тимчасову атаку на алгоритм кодування пароля, щоб визначити, скільки ітерацій знадобилося для кодування пароля. Відновлена інформація може бути використана для виконання паролної атаки, яка також схожа на автономну атаку за словником. Ця уразливість теж відстежується з використанням ідентифікатора CVE-2019-9494 завдяки схожості реалізації атаки.

Під час використання еліптичної кривої Brainpool за кодування пароля алгоритмом Dragonfly виконується кілька попередніх ітерацій із паролем, пов'язаних зі швидким вирахуванням короткого хеша до початку застосування еліптичної кривої. Знаходження короткого хеша операції, яка виконується, безпосередньо залежить від пароля і MAC-адреси клієнта. Час виконання

(корелюється з числом ітерацій) і затримки між операціями під час виконання попередніх ітерацій може бути вимірний і використаний для визначення характеристик пароля, який можна використовувати в offline для уточнення правильності вибору частин пароля в процесі його підбору. Для проведення атаки необхідна наявність доступу до системи користувача, який приєднується до бездротової мережі. Додатково виявлена друга уразливість (CVE-2019-13456), яка пов'язана з витоком інформації в реалізації протоколу EAP-pwd та використовує алгоритм Dragonfly. Проблема специфічна для RADIUS-сервера FreeRADIUS і на підставі витоків відомостей по сторонніх каналах, як і перша уразливість, дає змогу істотно спростити підбір пароля.

У поєднанні з поліпшеним методом відсіювання шумів у процесі вимірювання затримок для визначення числа ітерацій досить провести 75 вимірювань для однієї MAC-адреси. Методи по підвищенню безпеки протоколів дають змогу блокувати виявлені проблеми, які вже внесені в чорнові варіанти майбутніх стандартів Wi-Fi WPA 3.1 і EAP-pwd. На жаль, без порушення зворотної сумісності в поточних версіях протоколів усунути виток по сторонніх каналах не вийде.

Внутрішній протокол EAP-pwd також використовує Dragonfly і забезпечує аутентифікацію на основі імені користувача і пароля у визначених корпоративних мережах Wi-Fi. Він уразливий для тих самих атак, які виявлені проти WPA3.

Відправляючи спеціально створені точки еліптичної кривої, зломисник може повністю обійти аутентифікацію. Це можна використовувати проти сервера для підключення до будь-якої мережі Wi-Fi, яка підтримує EAP-pwd.

**Висновки.** Після публічного розкриття дослідниками Меті Ванхофа та Еяла Ронена недоліків Dragonblood, Wi-Fi Alliance оголосив про оновлення специфікацій безпеки для стандарту WPA3. Усі проблеми можна вирішити за допомогою оновлень програмного забезпечення, не впливаючи на здатність пристроїв працювати спільно. Постачальникам продуктів Wi-Fi необхідно інтегрувати зміни у свої продукти за допомогою оновлень програмного забезпечення.

Оскільки 15-річний протокол WPA2 широко використовувався мільярдами пристроїв, широке поширення WPA3 не може здійснитися водночас. Для підтримки старих пристроїв сертифіковані WPA3-пристрої пропонують «перехідний режим роботи», який можна налаштувати для прийому з'єднань із використанням як WPA3-SAE, так і WPA2.



**Список літератури:**

1. Mathy Vanhoef, Key Reinstallion Attacks. Breaking WPA2 by forcing nonce reuse. URL: <http://www.krackattacks.com>.
2. Mathy Vanhoef, Eyal Ronen, Dragonblood. Analysing WPA3's Dragonfly Handshake of WPA3 and EAP-pwd. URL: <http://wpa3.mathyvanhoef.com>.
3. Stewart S. Miller, Wi-Fi Security –McGraw-Hill Networking Professional Publishing, 2003, 309 p.

**Bilevska O.S. ANALYSIS OF PROTECTION OF CERTIFICATION PROGRAMS WPA2 AND WPA3 WI-FI NETWORK**

*Most modern Wi-Fi networks use the Wi-Fi Protected Access (WPA2) wireless certification program. However, since WPA2 is over 15 years old, the Wi-Fi Alliance (WECA) announced a new and more secure WPA3 protocol in 2018. The Wi-Fi Alliance is a non-governmental organization that certifies and releases Wi-Fi equipment, and is the copyright holder of the Wi-Fi brand. The alliance includes 36 companies, including Apple, Microsoft, Qualcomm and others.*

*The most common method of attacking Wi-Fi networks is packet interception, which is associated with client authentication (handshake) followed by a dictionary search for a password. According to the developers, the main advantage of WPA3 is that it is based on Dragonfly client authentication, thanks to which it is almost impossible to crack the network password. However, if the user does not use additional security methods, such as HTTPS (Hyper Text Transfer Protocol Secure), this allows an attacker to steal confidential information such as passwords, emails, and so on.*

*In case of exploitation of vulnerabilities, an attacker who is in the zone of the victim's network can recover the Wi-Fi password and penetrate the target's network. Today, Wi-Fi wireless networks have found their application in almost all industries due to the high mobility of users, the ease of use of the network, and the ease of installation of this technology. This technology is becoming an indispensable component of not only home, but also corporate networks. The Dragonfly handshake is used on corporate Wi-Fi networks where a username and password are required for access control.*

*Weaknesses can be found in almost any algorithm, whatever it is intended for. Since the WPA3 protocol is still at a relatively early stage of implementation, it is possible to investigate it in more detail for vulnerabilities.*

**Key words:** *Wi-Fi network, authentication, handshake, identifier, access, protocol, access point, Key Reinstallation Attacks, Dragonfly, Dragonblood, Wi-Fi Protected Access.*

**Грیشин М.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Беглов К.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ЗБАГАЧЕННЯ ПАЛИВА ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ РИЗИКУ ВИТРАТ ТЕС

*Використання вугілля на ТЕС для видобутку електроенергії є ключовим джерелом вуглецю за відносно низькою ціною, але використання вугілля викликає низку проблем під час згоряння палива. Основною проблемою є коливання складу вугілля, що йде на горіння. Від різних поставників вугілля відбуваються значні коливання складу палива. Таким чином, від несумлінних поставників, котрі заявляють невеликий показник зольності, на ТЕС може приїхати відверто погане паливо.*

*Дослідження зі спалювання вугілля в котельних установках проводиться дуже давно. У певних дослідженнях є свідчення про шкідливий вплив зольності палива на обладнання топки. Проте ті котли, що експлуатуються, уже розраховані на спалювання зольного палива, причому вважається, що склад палива не змінюється, і запропоновано мало рішень проблеми розходження якості під час закупівлі та якості після поставки.*

*У сучасних енергетичних підприємствах необхідно запровадити надійну схему адаптації до зміни якості палива, бо умовний пріоритет дослідження полягає у тому, що енергоблок неможливо зупини на ремонт раніше необхідного строку.*

*У статті розглянуто вирішення транспортного завдання для групи котлів. Використано математичну модель спалювання неякісного вугільного палива, запропоновано ідею інтеграції технології збагачення палива прямо на території ТЕС і можливість її запустити за необхідністю.*

*Цільова функція висловлюється в сумі дійсних витрат і потенційних витрат з урахуванням дисконтування і спрямована на мінімізацію витрат. Додатково включаються витрати на збагачення палива без урахування витрат на придбання обладнання.*

**Ключові слова:** керування, група котлів, збагачення, нелінійна модель, оптимізація, транспортне завдання, параметрична модель.

**Постановка проблеми.** Сьогодні ведуться дослідження з використання шкідливого впливу вугільного палива на обладнання енергоблоку. Зокрема, розглядаються питання впливу абразивного матеріалу на пошкодження трубок котла. Використання зольного палива викликає низку проблем під час експлуатації. Основною такою проблемою можна вважати значні коливання потужності ТЕС через малу частку вуглецю в паливі та шкідливий вплив на трубки ТЕС під час осадження протягом згоряння палива. Це викликає значні витрати на докупку палива через те, що недостатньо палива для підтримання потужності енергоблоку, також додаткові витрати на ремонт та заміну обладнання ТЕС [1, с. 34–46, 91–120].

За спроб оцінки витрат щодо ремонту та заміни обладнання ТЕС доводиться відмовлятися від неякісного палива, яке є необхідним за умов, коли немає альтернативи і не можна зупинити роботу енергоблоку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Уже певний час існує проблема абразивного пошкодження труб ТЕС під час згоряння вискозольного вугілля в топці електростанції.

У роботах [1, с. 34–46, 91–120] та [4, с. 8–17] дуже добре розглянуто й описано наслідки впливу й як вони виражаються в грошових витратах на ТЕС через необхідність постійного ремонту або заміни обладнання.

У роботах [5, с. 38–75; 7, с. 3–6] розглядаються питання впливу на навколишнє середовище, витрати підприємства з питань екології.

За допомогою досліджень [6, с. 22–35; 8, с. 87–95] стало можливим розрахувати час експлуатації обладнання за подібного складу палива й темпу його згоряння.

У роботі [3, с. 39–45] досліджується можливість збагачення палива для побудови фабрик зі збагачення палива і його подальшого продажу електростанціям

**Постановка завдання.** Однак поки що ніде не розглядалася ідея побудови установки зі збагачення прямо на ТЕС та не розраховувалася схема поставки палива на підприємство за допомогою транспортної задачі, цільова функція котрої буде виражатися у сумі витрат (річні витрати поділені для денного застосування) та спрямована на мінімізацію.

**Виклад основного матеріалу.**

**1. Постановка цільової функції**

Задамо цільову функцію витрат ТЕС:

$$Z = 365 \text{ днів} \cdot B \cdot (x + l \cdot S); \rightarrow \min; \quad (1)$$

де  $B$  – щоденний витрата палива станцією  $[т/день]$ ;

$$B = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p}; \quad (2)$$

де  $Q_n^p$  – найнижча теплота згоряння на кг речовини  $[\frac{МДж}{кг} \text{ або } \frac{ккал}{кг}]$ ;  $\eta_{ТЕС}$  – загальний ККД ТЕС, що в принципі розраховується за формулою,  $N$  – потужність станції,  $x$  – змінна, що позначає вартість палива за тону (у.о./т),  $l$  – тариф перевезення на тону вантажу і кілометр відстані;  $S$  – відстань до пункту доставки (км).

ККД візьмемо за умови повного згоряння палива [2] ISO 1988-75, оскільки ми розглядаємо як приклад палива вугілля, яке крім основних компонентів містить різні негорючі золотворюючі добавки, або, як їх ще називають, «породу». Зола забруднює навколишнє середовище і спікається в шлак на колосниках, що ускладнює горіння вугілля. До того ж золотворюючі добавки зменшують питому теплоту згоряння вугілля, тому чим менше «породи» у вугіллі, тим краще. Залежно від сорту й умов видобутку вугілля кількість мінеральних речовин у ньому дуже сильно розрізняється. Так, наприклад, зольність кам'яного вугілля становить 14–35%, антрациту – 5–20%.

Поки що розглянемо, наскільки сильно змінюється обсяг палива, необхідний для електростанцій, у силу збільшення показника зольності. Так, наприклад, якщо маємо (1), уявімо нову формулу знаходження денної потреби ТЕС у вигляді:

$$B^* = \frac{B}{(1 - A^d)}, \quad (3)$$

де  $B^*$  – це добова потреба ТЕС у вугіллі з урахуванням зольності (обсяги необхідної поставки з урахуванням зольності), показник зольності  $A^d$ . Так, із (3) випливає:

$$B^* = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)}; \quad (4)$$

Візьмемо і наведемо (1) для денної формули

$$Z = \left( \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)} \right) \cdot (x + l \cdot S) \rightarrow \min; \quad (5)$$

де – це встановлена потужність ТЕС  $[МВт = \frac{МДж}{с}]$ ,  $\eta_{ТЕС}$  – ККД ТЕС (%),  $Q_n^p$  – нижча (питома) теплота згоряння  $[\frac{МДж}{кг}]$ ,  $k$  – показник зольності (%),  $S$  – відстань від постачальника до ТЕС (км),  $l$  – залізничний тариф  $[\frac{грн}{т \cdot км} = \frac{грн}{1000кг \cdot км}]$  і  $x$  – змінна описує вартість вугілля  $[\frac{грн}{т} = \frac{грн}{1000кг}]$ .

**2. Додаткові витрати, викликані зносом обладнання ТЕС**

Сутність абразивного зносу полягає у тому, що великі частки золи, що володіють достатньою твердістю і гостротою граней, під час ударів об стінку труби безперервно зрізають із поверхні мікроскопічно малі шари металу, поступово зменшуючи у цьому місці товщину стінки труби. Частки незгорілого палива (частіше у антрациту) також викликають стирання поверхні.

Абразивність вугілля призводить до зносу систем пилоприготування, а абразивність золи – до зносу конвективних поверхонь нагріву котла. Тому річні витрати на ремонт основного і допоміжного котельного обладнання (з урахуванням абразивності вугілля і золи) включають у себе витрати, пов'язані з витратами на ремонт систем пилоприготування і ремонт конвективних поверхонь нагріву котла – **водяного економайзера (ВЕК) і повітропідігрівача (ВЗП).**

Загальні річні витрати ТЕС за умови регулярної заміни обладнання становлять:

$$Z^{ТЕС} = \frac{U_{рем.облад.} + U_{рем.золау.} + U_{золовизал.} + U_{рем.золовизал.} + U_{зберіг.}}{365} \quad (6)$$

У цілому ці витрати будуть не змінні за винятком витрат на ремонт обладнання паропідігрівача, топкових екранів і фестону (детальніше формулу можна знайти в роботі М.В. Гриценко [1, с. 34–46, 91–120]).

Застосуємо ці витрати до нашої цільової функції:

$$Z = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (1 - A^d)} \cdot (x + l \cdot S) + N_{флотат.} + Z^{ТЕС} \rightarrow \min \quad (7)$$

Уточнимо поняття часу експлуатації у разі абразивного пошкодження обладнання внаслідок спалювання палива. Візьмемо формулу з методичних вказівок І.В. Путілової [4, с. 8–17]:

$$T = \frac{(\delta_{ст} - \delta_{ост})}{(3,6 \cdot \delta_{уд.г} \cdot G_M)}, \text{ годин} \quad (8)$$

Оригінальна формула враховує кількість поворотів труб навколо своєї осі, проте наявність поворотів збільшує час експлуатації. Розглянемо максимально песимістичний сценарій горизонтального розташування труб без поворо-

тів навколо своєї осі всередині котла згоряння, де  $\delta_{cm}$  – товщина стінки трубопроводу, мм;  $\delta_{ocm}$  – нормативна мінімальна товщина стінки трубопроводу, мм;  $\delta_{y\partial.h}$  – питома лінійний абразивний знос трубопроводу, мм/т абразиву в потоці палива, що спалюється;  $G_M$  – масова витрата матеріалу, кг/с;  $n_{пов}$  – число, що дорівнює кількості поворотів труб навколо своєї осі.

Розрахунок величини питомої лінійного абразивного зносу трубопроводів пневмотранспортних установок систем пилоприготування і золошлаковидалення ТЕС  $\delta_{y\partial.h}$  виконується для горизонтальних і похилих ділянок за залежністю:

$$\delta_{y\partial.h} = \frac{5,55 \cdot 10^{-7} \cdot K_{II} \cdot U_m^2 \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изм}}, \text{ мм / м}, \quad (9)$$

а для вертикальних ділянок за залежністю:

$$\delta_{y\partial.h} = \frac{1,39 \cdot 10^{-7} \cdot K_{II} \cdot U_m^2 \cdot k_{SiO_2}}{D^2 \cdot m^{0,4} \cdot k_{изм}}, \text{ мм / м}, \quad (10)$$

де  $k_{SiO_2}$  – коефіцієнт відносного вмісту  $SiO_2$  в матеріалі, що транспортується;  $K_{II} = \frac{\rho_s \cdot d_0}{6}$  – критерій аеродинамічної легкості частинок під час пневмотранспортування дрібнодисперсних сипучих матеріалів, кг/м<sup>2</sup>/2/ ( $\rho_s$  – густина матеріалу, що транспортується, кг/м<sup>3</sup>;  $d_0$  – середньозважений еквівалентний діаметр частинок матеріалу, м);  $U_m$  – середня по перетину швидкість потоку частинок матеріалу;  $D$  – внутрішній діаметр трубопроводу, м;  $m$  – масова видаткова концентрація потоку суміші матеріалу і повітря, кг матеріалу / кг повітря;  $k_{изм}$  – коефіцієнт відносної зносостійкості матеріалу трубопроводу.  $k_{изм}$  визначається за залежністю  $HV$  (твердість матеріалу стінки трубопроводу по Віккерсу):

$$k_{изм} = 6,42 \cdot 10^{-5} \cdot HV^2 - 0,0157 \cdot HV + 1,97 \quad (11)$$

Тепер визначимо коефіцієнт відносного вмісту  $SiO_2$  в матеріалі, що транспортується:

$$k_{SiO_2} = \frac{n_{SiO_2}}{\% \text{ вміст } SiO_2 \text{ в кварцовому піску}} = \frac{n_{SiO_2}}{94\%}, \quad (12)$$

де  $n_{SiO_2}$  – % вмісту кварцу в матеріалі, що транспортується:

$$n_{SiO_2} = A^d - n_{пр.мин.}, \quad (13)$$

де  $n_{пр.мин.}$  – % вміст інших мінералів золи в матеріалі, що транспортується.

Отже, і витрати ТЕС теж будуть залежною від цього показника функцією.

$$Z_{ТЕС} = Z(T(n_{SiO_2})) \quad (14)$$

$$Z = N_{збагач}(A^d) + L_{логист}(V_{закуп}) + Z_{ТЕС}(T_{облад}); \quad (15)$$

Ефективність роботи золоуловителів характеризується такими показниками:

$$h = (G_{вх} - G_{вых}) / G_{вх} = (c_{вх} - c_{вых}) / c_{вх}$$

де  $h$  – ступінь уловлювання золи в золоуловлювачів;  $G_{вх}$ ,  $G_{вых}$  – кількість золи на вході і на виході із золоуловителя в одиницю часу;  $c_{вх}$ ,  $c_{вых}$  – концентрація золи на вході і на виході із золоуловителя. Більш детально розписано в Інформаційному збірнику за редакцією В.Я. Путилова [5, с. 38–75].

Для підрахунку об'ємної витрати газу внаслідок реакції уявімо хімічну формулу вугілля і повітря у вигляді повітряно-вугільної суміші у вигляді  $z_1 C + z_2 SiO_2 + z_3 (Fe_2O_3 + CaSiO_3)$  – вугільне паливо, де  $z_2 + 2 \cdot z_3 = A^d$ , а  $z_2 = n_{SiO_2}$ , тоді як у реакції прийматимуть участь вуглець і кисень (для спрощеної формули повітря використовуємо співвідношення 20%/80% кисень/азот).

### 3. Збагачення палива

Розглянемо варіант збагачення вугілля за допомогою збагачувальної фабрики.

Візьмемо для прикладу якусь збагачувальну фабрику (за прототип візьмемо проекти НПП «Гравікон», які надають різні варіанти зі збагачення вугілля). Прорахуємо вартість і втрату корисної вуглецевої маси під час збагачення палива, якщо фабрика використовує механічну флотаційну машину МФУ-25 [3, с. 39–45].

Згідно з технічними характеристиками, маємо такі параметри:

|  |      |
|--|------|
| Вихід концентрату, %                                       | 87,6 |
| Потужність електродвигуна приводу аератора, кВт, не більше | 37   |
| Продуктивність по твердому продукту, т • год <sup>-1</sup> | 85,8 |

У процесі збагачення сировина поділяється на продукти збагачення з максимальним змістом корисної копалини (концентрат) і максимальним змістом зольних домішок (так звані «хвости»). Вихід концентрату, згідно з технічними характеристиками обладнання, становить  $I_{конц} = 87,6\%$  (отже, вихід хвостів – 12,4%).

Витяг цінних компонентів у концентрат під час збагачення корисних копалин становить від 60% до 95% і вище. Візьмемо для прикладу витяг  $\varepsilon_{витяг.вугл.} = 95\%$  і порахуємо масу концентрату, масу хвоста й їхні показники зольності на 100т вугілля за показника зольності 30%.

$$\varepsilon_{витяг.вугл.} = \frac{M_{концентрату} \cdot I_{збагач}}{M_{вугл.}}$$

де  $M_{концентрату} = I_{конц} \cdot M$  – вихід концентрату,  $\varepsilon_{витяг.вугл.}$  – витяг цінних компонентів,  $M_{вугл.} = M \cdot (1 - A^d)$ ; – зміст корисних копалин у первісному обсязі,  $I_{збагач}$  – зміст корисних копалин у концентраті.

$$A_r^d = \begin{cases} A_r^d > A_{допуст}^d : r = r + 1 \\ 1 - \left( \frac{(1 - A_n^d) \cdot \varepsilon_{вугл.вугл}}{I_{конц.}} \right); n = \overline{1, r} \end{cases}; \quad (16)$$

$$A_r^d \rightarrow 0; M_{збагач} = M \cdot (I_{конц.})^r$$

$$V_{закуп} = \begin{cases} \frac{B_{ТЕС}}{(I_{конц.})^n}; n = \overline{1, r} \text{ при } A_r^d > A_{допуст}^d : r = r + 1 \\ B_{ТЕС}; \text{ при } A_r^d = A_{допуст}^d \end{cases}; \quad (17)$$

#### 4. Включення витрат на збагачення палива ТЕС до цільової функції

Ускладнимо нашу цільову функцію і транспортну задачу.

Закупівля вугілля залежить від процедури очищення і може здійснюватися в такий спосіб:

цільова функція буде мати вигляд:

$$Z = \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (I_{конц.})^r} \cdot (x + l \cdot S) + N_{флотаци.} \cdot \sum_{m=0}^r \left[ \frac{N}{\eta_{ТЕС} \cdot Q_n^p \cdot (I_{конц.})^m \cdot M_{пропуск.}} \right] \cdot 24 \cdot t_{эл.} \rightarrow \min, \quad (18)$$

де  $r$  – кількість очисток. Отже, витрати із закупівлі і доставки становитимуть:

$M_{пропуск}$  – пропускна здатність флотаційної машини. Вартість отримуємо у такий спосіб.

$N_{флотаци.}$  – потужність машини,  $t_{эл.}$  – тариф за кВт\*г.

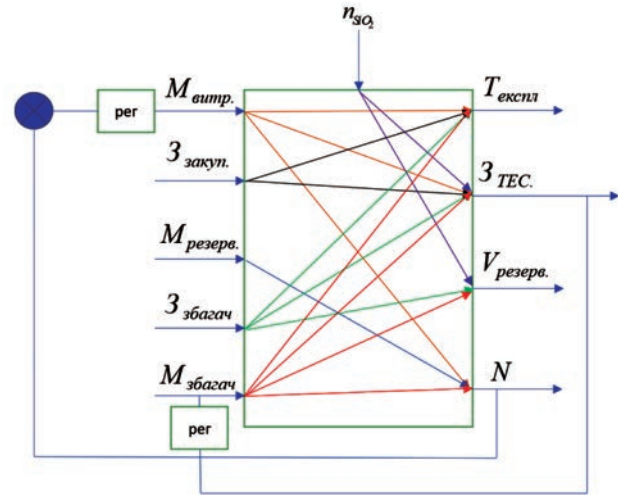
Досліджуємо, як змінюється динаміка закупівлі вугілля за підвищення зольності і подальшого очищення.

| $A^d$ | $d_{МФУ}$ | $A_{МФУ}^d$ | $k_{МФУ}$ | $M_{МФУ}$ | $Q_{МФУ}$ | $B_{МФУ}$ | $K_{МФУ}$ | $P_{МФУ}$ |
|-------|-----------|-------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 15    | 87,60     | 7,80        | 1         | 3'558,60  | 2'160     | 4'637,36  | 3         | 3'749,76  |
| 20    | 87,60     | 13,24       | 1         | 3'558,60  | 2'160     | 4'637,36  | 3         | 3'749,76  |
| 25    | 76,74     | 11,79       | 2         | 3'117,33  | 4'320     | 5'293,79  | 6         | 7'499,52  |
| 30    | 67,22     | 10,72       | 3         | 2'730,70  | 7'920     | 6'043,34  | 11        | 13'749,12 |
| 35    | 58,89     | 10,09       | 4         | 2'392,17  | 7'200     | 6'898,57  | 10        | 12'499,20 |
| 40    | 51,58     | 10          | 5         | 2'095,54  | 8'640     | 7'875,07  | 12        | 14'999,04 |
| 45    | 45,19     | 10,53       | 6         | 1'835,69  | 10'080    | 8'989,81  | 14        | 17'498,88 |
| 50    | 39,58     | 11,79       | 7         | 1'608,07  | 7'920     | 10'262,34 | 11        | 13'749,12 |
| 55    | 34,68     | 13,91       | 8         | 1'408,67  | 12'240    | 11'715    | 17        | 21'248,64 |
| 60    | 26,61     | 10          | 10        | 1'080,98  | 13'680    | 15'266,31 | 19        | 23'748,48 |
| 65    | 20,42     | 7,38        | 12        | 829,52    | 15'120    | 19'894,17 | 21        | 26'248,32 |
| 70    | 17,89     | 13,91       | 13        | 726,66    | 15'840    | 22'710,25 | 22        | 27'498,24 |
| 75    | 12,02     | 8,49        | 16        | 488,47    | 18'000    | 33'783,88 | 25        | 31'248    |
| 80    | 9,23      | 13,90       | 18        | 374,84    | 19'440    | 44'025,20 | 27        | 33'747,84 |

Де  $A^d$  – зольність, %;  $d_{МФУ}$  – частка від початкової маси палива після збагачення палива, %;  $A_{МФУ}^d$  – зольність після збагачення, %;  $k_{МФУ}$  – кількість ітерацій збагачення;  $M_{МФУ}$  – фінальна маса палива після збагачення, т;  $Q_{МФУ}$  – кількість енергії, що споживається для збагачення палива,

кВт\*ч;  $B_{МФУ}$  – потрібно закупити із розрахунком утрати частки палива під час збагачення, т;  $K_{МФУ}$  – кількість МФУ-25 за умови цілодобової роботи;  $P_{МФУ}$  – вартість використаної електроенергії, грн.

#### 5. Параметрична схема й опис залежностей у вугільному котлі



Ми можемо описати залежності, що вказані раніше.

Система з чотирьох рівнянь.

$$\begin{cases} T_{експл.} = -M_{випр.} \cdot k_1 - n_{SiO_2} \cdot k_2 - Z_{закуп.} \cdot k_3 + Z_{збагач.} \cdot k_4 + M_{збагач.} \cdot k_5 \\ Z_{ТЕС.} = M_{випр.} \cdot t_1 + n_{SiO_2} \cdot t_2 + Z_{закуп.} \cdot t_3 - Z_{збагач.} \cdot t_4 - M_{збагач.} \cdot t_5 \\ V_{резерв.} = Z_{збагач.} \cdot l_1 + M_{збагач.} \cdot l_2 - M_{резерв.} \cdot l_3 \\ N = M_{випр.} \cdot j_1 + M_{збагач.} \cdot j_2 \end{cases}$$

де  $k_n, t_n, l_m, j_m$  – коефіцієнти;  $n = \overline{1,5}; m = \overline{1,3}$

$M_{расх.}$  – витрати палива;

$M_{обогащ.}$  – витрати збагаченого палива;

$M_{резерв.}$  – витрати резервного палива

$Z_{закуп.}$  – вартість закупівлі палива;

$Z_{обогащ.}$  – витрати на збагачення палива;

$T_{експл.}$  – час експлуатації до заміни спорядження;

$Z_{ТЕС.}$  – витрати ТЕС на ремонт;

$V_{резерв.}$  – об'єм палива на резервному складі;

$N$  – потужність станції

#### 6. Приклади

##### 6.1. Транспортна задача

Візьмемо для побудови завдання три приклади ТЕС:  $A_1, A_2$  і  $A_3$ , які наведені по прототипам Запорізької ТЕС, Вуглегірської ТЕС і Бурштинської ТЕС. Усі ці ТЕС працюють на вугіллі (розглянемо для прикладу поки ситуацію, що поставляються і споживані марки вугілля підходять для даних ТЕС). Оскільки питома теплота згоряння кам'яного вугілля приблизно 31 МДж/кг, матимемо такі результати за потреби:

| ТЕС   | Встановлена електрична потужність, МВт (МДж/с) | Споживання вугілля, кг/с | Споживання млн т/рік |
|-------|--|--------------------------|----------------------|
| $A_1$ | 3600   | 290,32                   | $9,16 = V_1$         |
| $A_2$ | 3600   | 290,32                   | $9,16 = V_2$         |
| $A_3$ | 2400   | 193,55                   | $6,10 = V_3$         |

Розглянемо питання постачальників. За прототип постачальників у транспортній задачі розглянемо деякі шахти з існуючих на підконтрольній території (інформацію взято зі статистики за 2008 і 2009 рр. У силу того, що більшість із них знаходиться поблизу одна від одної на території Донецького вугільного басейну, виберемо ті, які максимально підходять до умов потреб ТЕС, і для отримання транспортної задачі представимо результати видобутку максимально наближені до споживання ТЕС) (див. табл. нижче).

Розглянемо варіант дефіциту товару на внутрішньому ринку. У цьому разі будемо імпортувати вугілля з ПАР. Відповідно до [6, с. 22–35], середня ціна за тону вугілля на умовах CIF порт з ПАР \$112,00 (2 724,96 ₴, якщо за курсом 24,33 ₴).

З огляду на середні відстані від портів Одеської області (порт Південний і ТІС) до розглянутих ТЕС (555 км до Запорізької ТЕС, 845 км – до Світлодарська та 764 км – до міста Бурштин).

З огляду на відносну дешевизну вугілля з ПАР і розташування глибоководного Південного порту по відношенню до ТЕС  $A_1$ ,  $A_2$  і  $A_3$ , схема з імпортом вугілля з ПАР через порт Південний виходять дешевше і вигідніше для ТЕС у закупівлі. Однак два вкрай важливі чинники в безперебійному постачанні вугілля поки що не розглянуть: час і якість товару.

Транспортна задача була вирішена з урахуванням річних потреб ТЕС, річного видобутку з шахт і постачання вугілля сумарно на рік. Фактор часу розглянемо пізніше, а на разі для зручності наведемо розрахунки потреб і видобутку і постачання у щоденному форматі.

Припустимо, що для нашої поставки була здійснена закупівля вугілля з ПАР, яке виявилось неякісним із високим показником зольності 50%. Отже, вугілля, що доставляється цим шляхом, потрібно в два рази більше.

З огляду на високе споживання вугілля через високу зольність на ТЕС  $A_3$  бракує 4,06 тис т на день. Залучимо джерело  $B_2$  (шахта міста Сокаль), яке ми замінили імпортом вугіллям через недорогий вартості. Однак у шахті міста Сокаль вугілля теж виявилось зольним із показником 30%. Маємо лише 5,6875 тис т корисної маси з видобутих щодня 8,125 тис т. Оскільки нам не вистачає 4,06233 тис т корисного вантажу без зольної домішки, реального вантажу

млн грн на перевезення на рік із кожної шахти постачальнику

|             |             |             |         |       |                   |
|-------------|-------------|-------------|---------|-------|-------------------|
| 127,1801847 | 45,53740265 | 25,05064244 | 0,525   | $B_1$ | Волиньвугілля     |
| 744,1657721 | 733,8540063 | 112,856549  | 2,9655  | $B_2$ | Львіввугілля      |
| 66,7066685  | 19,85776548 | 242,3418564 | 0,998   | $B_3$ | Мирноград-вугілля |
| 101,2467087 | 34,75224867 | 350,532524  | 1,4165  | $B_4$ | Селидів-вугілля   |
| 185,097695  | 65,47338679 | 610,4285685 | 2,5483  | $B_5$ | м. Добропілля     |
| 62,04281552 | 6,4617811   | 8,502343553 | 0,2515  | $B_6$ | м. Соснівка       |
| 61,55068896 | 19,52414327 | 221,7148473 | 0,8565  | $B_7$ | м. Вугледар       |
| 71,45735598 | 80,15046498 | 156,475962  | 0,9     | $B_8$ | м. Олександрія    |
| 628,2408455 | 585,0998432 | 3084,581662 | 13,9575 | $B_9$ | м. Павлоград      |
| $A_1$       | $A_2$       | $A_3$       | $Z$     |       |                   |

$$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 24,42$$

з урахуванням зольності знадобиться 5,80333 тис т. При цьому ні ціна на закупівлю, ні транспортні витрати не зміняться, тому що реальна маса залишається незмінною.

Поставимо три механічні флотаційні машини МФУ-25 і проведемо процедуру тричі, у нашому разі концентрат у кінцевому підсумку становитиме 67,2% від початкової маси і 32,8% – хвости за всі три етапи очищення.

Далі отримаємо для нашого прикладу з умовою початкової зольності 30% для 100 т вугілля після всіх трьох етапів очищення матимемо показник зольності 10,8% для 67,2 т концентрату.

МФУ-25 може щогодини проводитися 67,2 т збагаченого палива і на добу ми отримаємо 1 612,8 т вугільного палива з 2 400 т вугілля, що поставляється на фабрику.

З огляду на потужність установки 30кВт на кожен агрегат маємо, що потужність збагачувальної фабрики 90кВт і за день споживається 2 160кВт \* год.

Установлений в Україні тариф для електроенергії, що виробляється на ТЕС, – 0,67 грн/кВт \* год.

Отже, згідно із середньою собівартістю, на початок 2020 р. – 173,6 коп. за кВт \* год електроенергії, обробка 2 400 т вугілля на добу становить 3 749,76 грн.

Поставимо на фабриці п'ять установок для обробки 500 т вугілля на годину й отримаємо переробку 12 тис т вугілля із зольністю 30% на добу для отримання 8,064 т палива із зольністю

10,8%. Експлуатація даної фабрики буде обходитися в 10,8 МВт\*год на добу, що буде еквівалентно 18,749 грн на добу.

Нескладно помітити, що, на перший погляд, спалювання палива без очищення виходить вигідніше, тому що відсутнє формування хвостів, однак приходить абразивний знос конвективних поверхонь нагріву через незгоріле паливо і частинки золи.

Якщо порівнювати результати транспортних завдань за цільовими функціями (11) і (27), нескладно помітити, що вигідніше поставити збагачувальну фабрику й очищати вугілля за зольності 30%, ніж удаватися до регулярного ремонту і заміни обладнання на ТЕС. Більше того, якщо взяти в приклад експлуатацію турбіни К-300 (10 років), то економія виходить у середньому більше ніж на 25,5 млн грн.

Отже, ми зменшили показник зольності з 30% до 24,1%, проте і загальна маса палива зменшилася зі 100 т до 87,6 т.

Візьмемо за витрати по заміні і ремонту ТЕС розрахунки з дисертації М.В. Гриценко для Єрківського вугілля (показники зольності даного вугілля у цій статті схожі з показниками нашого завдання) [1, с. 34–46, 91–120], а саме: знос конвективних поверхонь нагріву котлоагрегату при роботі на Єрківському вугіллі, середньорічний знос конвективних поверхонь нагріву, термін служби поверхонь нагріву, питомі сумарні витрати по ТЕС. Курс валюти був прийнятий на 02.03.2020 за даними НБУ: 1 руб. = 0,366 грн.

**Транспортна задача:**

|             |             |             | корисний об'єм | реальний обсяг |         |
|-------------|-------------|-------------|----------------|----------------|---------|
| 348,45      | 124,77      | 68,64       | 1,438356       | 5,803326811    | $B_1$   |
| 1652,383592 | 1631,363195 | 365,4681826 | 4,062329       |                | $B_2$   |
| 757,6973391 | 1096,359289 | 1001,767503 | 4,062329       |                | $B^*_2$ |
| 182,78      | 54,42       | 663,97      | 2,734247       |                | $B_3$   |
| 277,42      | 95,24       | 960,39      | 3,880822       |                | $B_4$   |
| 507,17      | 179,43      | 1 672,46    | 6,981644       |                | $B_5$   |
| 169,99      | 17,71       | 23,30       | 0,689041       |                | $B_6$   |
| 168,65      | 53,51       | 607,45      | 2,346575       |                | $B_7$   |
| 195,79      | 219,61      | 428,72      | 2,465753       |                | $B_8$   |
| 1 721,48    | 1 603,28    | 8 451,18    | 38,23973       | $B_9$          |         |
| 25,08705259 | 25,08705259 | 16,72470172 | $Z$            |                |         |

$A_1$

$A_2$

$A_3$

$\Sigma A_n = \Sigma B_m = 66,9$

Аналіз оптимального плану.

- 1) З 1-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 2) З 2-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 3) З (2\*) портового складу необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 4) З 3-ї шахти необхідно вантаж направити до 2-ї ТЕС (1.073928417 тис т), до 3-ї ТЕС (1.660318158 тис т).
- 5) З 4-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 2-ї ТЕС.
- 6) З 5-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 2-ї ТЕС.
- 7) З 6-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 8) Із 7-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 9) Із 8-ї шахти необхідно весь вантаж направити до 3-ї ТЕС.
- 10) З 9-ї шахти необхідно вантаж направити до 1-ї ТЕС (25.08705259 тис т), до 2-ї ТЕС (13.150658419 тис т).
- 11) На 9-й шахті залишився незатребуваним вантаж в кількості 2 т.

Оптимальний план є виродженим, оскільки базисна змінна  $x_{104} = 0$ .

### 6.2. Абразивне пошкодження труб та зменшення часу експлуатації

Наведемо інформацію, щоб розрахувати час експлуатації обладнання:

- 1) кількість споживаного вугілля на день;
- 2) кількість електроенергії, що виробляється на день;
- 3) маса абразивного матеріалу на день виділяється внаслідок згорання вугілля;
- 4) товщина абразивного пошкодження труби на день.

Дано:

А) ТЕС А1, прототипом якої є ТЕС у Запоріжжі (Енергодар);

Б) кам'яне вугілля Донбаського басейну марки Г.

Із погляду хімічного складу головний компонент золи та шлаку – діоксид кремнію SiO<sub>2</sub> (45–60%) і так званої «породи»: йдуть оксид алюмінію Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15–25%), оксиди заліза Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (5–15%), оксид кальцію CaO (1,5–4,5%), оксид калію K<sub>2</sub>O (2,0–4,5%) і деякі інші оксиди, зміст яких зазвичай не перевищує одного відсотка [6, с. 22–35].

Візьмемо нормальний для Донбаського вугілля показник зольності 15–20% [7, с. 3–6].

$A^d = 20\%$  та нехай зміст кварцу в ньому буде 60%, тобто матимемо:

$$A^d = n_{SiO_2} + n_{порода} = 12\% + 8\% = 20\%.$$

Використовуючи як приклад станцію А1, будемо розглядати турбіни, які експлуатуються на Запорізькій ТЕС: 2 турбіни К-300-240-2 і 2 турбіни К-325-23,5 з конденсаційною електричною потужністю 317 і 337,3 МВт [8, с. 87–95].

Раніше ми використовували ККД ТЕС 40%.

Спільна потужність чотирьох турбін буде  $W = 2 \cdot (317 + 337,3) = 1308,6$  МВт.

Ураховуючи (4) витрати «ідеального вугільного палива» для ТЕС А1, маємо  $V = 379,91$  т/час.

Електроенергія, що виробляється в день за ККД 40% і під час згорання «ідеального» палива буде:  $q = W \cdot 40\% \cdot 24 = 12565,56$  МВт\*ч

### Розв'язок для донецького вугілля марки Г.

1)  $V = 25,08$  т/день : 80% = 31,3545 т/день;

2)  $A^d = n_{SiO_2} + n_{порода} = 12\% + 8\% = 20\%$ , значить, матимемо на 20% вуглецевого матеріалу, що спалюється, проте ми компенсуємо зольність палива збільшенням спалюваного обсягу, отже, потужність турбін залишається колишньою,  $q = 12565,56$  МВт\*ч/день;

3)  $n_{SiO_2} = 12\% \Rightarrow m_{SiO_2} = V \cdot n_{SiO_2} = 31,3545$  т/день \* 12% = 3,76254 т/день;

4) абразивний знос на т у. п.  $\delta_{уд.г}$  буде дорівнювати = 3,003 нм/т у.п., тобто  $\delta_{уд.г/день}$  на день = 3,003 нм/т у.п. \* 31,3545 т/день = 94,1575635 нм/день.

У задачі зольність 20%, де 12% – абразивність і 8% – порода. Будемо мати за масової витрати: 14 кг/с: вуглецю  $m_C = 11,2$  кг; абразивного матеріалу  $m_{SiO_2} = 1,68$  кг; гематиту і стільки ж силікату кальцію  $m_{Fe_2O_3} = 0,56$  кг,  $m_{CaSiO_3} = 0,56$  кг.

Переведемо для реакції масу вуглецю в кількість речовини:

$$v_C = 932,479 \text{ моль}$$

Для отримання вуглекислого газу нам необхідно використовувати аналогічну кількість кисню і, отже, в чотири рази більше азоту (у силу припущення вище):

$$932,479 C + 932,479 O_2 + 3729,916 NO_2 = 932,479 CO_2 + 3729,916 NO_2$$

$$v_{CO_2} = 932,479 \text{ моль} \Rightarrow m_{CO_2} = 41,037 \text{ кг};$$

$$v_{NO_2} = 3729,916 \text{ моль} \Rightarrow m_{NO_2} = 171,595 \text{ кг}$$

$$\rho_{SiO_2} = 2,65 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{SiO_2} = 633,96 \text{ см}^3$$

$$\rho_{Fe_2O_3} = 5,24 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{Fe_2O_3} = 106,87 \text{ см}^3$$

$$\rho_{CaSiO_3} = 2,915 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{CaSiO_3} = 192,11 \text{ см}^3$$

$$\rho_{CO_2} = 1,9768 \cdot 10^{-3} \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{CO_2} = 20,741 \cdot 10^6 \text{ см}^3$$

$$\rho_{NO_2} = 1,45 \text{ г/см}^3 \Rightarrow V_{NO_2} = 118,276 \cdot 10^3 \text{ см}^3$$

$$V_{пакс} = v_{вещ} \cdot \rho$$

$$V_{пакс} \approx 20,860 \cdot 10^6 \text{ см}^3/\text{с} = 20,860 \text{ м}^3/\text{с}$$

Будемо мати ККД золоотвалу 68,77%, тобто параметр золоуловлювання – 31,23%. За згорання вугілля із зольністю 20%, з яких абразивність



12%, труби котла зносяться через 6,2 роки (за нормального строку експлуатації зазвичай 10 років).

**Висновки.** У цій роботі ми розглянули питання зольної домішки у паливо та її абразивного впливу на обладнання ТЕС.

За умови звичного навантаження енергоблоків кожна ТЕС має уявлення щодо найближчого можливого часу зупинки станції для її планового ремонту. Узагалі ТЕС не може встати на ремонт раніше цього строку через те, що навантаження на енергомережі розраховано заздалегідь і будь-який форс-мажор може сприяти падінню потужності електромережі у цілому. Але у цій статті ми ігноруємо цей факт і розглядаємо лише фінансовий

складник будь-яких несправностей, який виявляється у витратах на ремонт та заміну обладнання, а також додатковій закупівлі палива.

Нескладно побачити, що за умови збагачення палива економія у витратах ТЕС виражається в подовженні часу експлуатації обладнання, враховуючи навіть витрати на збагачення.

У перспективі можна зайнятися способами визначення необхідності збагачення палива, бо традиційно на ТЕС немає лабораторії для дослідження кожної партії, але час від часу якість купленого палива може відрізнитися від показника в документах, і нам потрібно розуміти, як вчасно можна це ідентифікувати.

#### Список літератури:

1. Гриценко М.В. Комплексная оценка эффективности работы ТЭС при использовании различных видов углей. С. 34–46, 91–120.
2. ISO 18283:2006 Hard coal and coke – Manual sampling. URL: <https://www.iso.org/standard/6722.html>.
3. Козлов В.А., Пикалов М.Ф., Кияненко А.Е. Развитие флотационных технологий для обогащения угольного шлама. *Уголь Украины*. 2014. Март. С. 39–45.
4. Путилова И.В. Абразивный износ трубопроводов пневмотранспортных установок систем золошлакоудаления и пылеприготовления ТЭС : автореф. дис. ... к.т.н. Москва, 2004. С. 8–17.
5. Современные природоохранные технологии в электроэнергетике : информационный сборник / В.В. Абрамов и др. ; под общей ред. В.Я. Путилова. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 388 с. ISBN 978-5-383-00052-6.
6. Кизильштейн Л.Я. Экогеохимия элементов-примесей в углях. Ростов-на-Дону : Сев.-Кавказск. научн. центр высш. школы, 2002. С. 22–35.
7. Зборщик М.П., Ильяшов М.А. О неотложности решения проблем геоэкологии Донбасса. *Уголь Украины*. 2007. № 12(612). С. 3–6.
8. Арсеньев Л.В., Полищук В.Г., Соколов Н.П. Парогазовые установки и их показатели. *Промышленная теплотехника*. 1999. Т. 21. № 2–3. С. 87–95.

#### Grishyn M.V., Beglov K.V. EVALUATING THE EFFECTIVENESS OF FUEL ENRICHMENT TO REDUCE THE RISK OF POWER PLANT COSTS

*Using coal in thermal power plants for power generation is a key source of carbon at a relatively low cost, but the use of coal causes a number of problems in the combustion of the fuel. The main problem is fluctuations in the composition of the coal going to combustion. Significant fluctuations in the composition of the fuel occur from different suppliers of coal. Thus, from unscrupulous suppliers, who claim low ash content, outright bad fuel can arrive at the power plant.*

*Studies on coal combustion in boiler plants have been done for a very long time. There is evidence in certain studies of the harmful effects of fuel ash content on furnace equipment. However, the boilers that are in operation are already designed to burn ash fuel, with the fuel composition considered to be unchanged and few solutions have been proposed to the problem of quality differences when purchased and quality differences after delivery.*

*From modern power plants, it is necessary to introduce a reliable scheme of adaptation to changes in fuel quality, therefore the conditional priority of the study is that the power unit cannot be stopped for repairs before the required time.*

*The article considers solutions to the transport problem for a group of boilers. The mathematical model of combustion of low-quality coal fuel, the proposed idea of integration of fuel enrichment technology right on the territory of TPP, and the possibility of launching it if necessary are used.*

*The target function is expressed in the sum of actual costs and potential costs, taking into account discounts, and is aimed at minimizing costs. In addition, the costs of fuel enrichment are included without taking into account the costs of purchasing equipment.*

**Key words:** control, boiler group, enrichment, nonlinear model, optimization, transport problem, parametric model.

**Завгородній В.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

## ВІДНОВЛЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ІНФОРМАЦІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ У ЄДИНОМУ ІНФОРМАЦІЙНОМУ ПРОСТОРИ ЗА ПОВНОЗВ'ЯЗНОЇ ТОПОЛОГІЇ

*У роботі розглянуто поняття єдиного інформаційного простору, інформаційного об'єкта, дистанційного навчання. Охарактеризовано параметри дистанційного навчання в єдиному інформаційному просторі.*

*Інформаційні об'єкти єдиного інформаційного простору представлено у вигляді повнозв'язної топології. Однак кількість зв'язків при цьому є надмірною, тому такий вид топологій використовується вкрай рідко.*

*Як предметну сферу вибрано дистанційне навчання, яке включає в себе видачу завдань, їх обробку викладачами та студентами, тести для самоконтролю знань тощо. Розглянуто систему дистанційного навчання, у якій виділено інформаційні об'єкти. У результаті декомпозиції сфери дистанційного навчання отримано набір параметрів для кожного інформаційного об'єкта єдиного інформаційного простору.*

*Представлено інформаційні об'єкти в єдиному інформаційному просторі у вигляді окремих вузлів, визначено зв'язки між цими інформаційними об'єктами. Для цього для кожного інформаційного об'єкта спочатку виділено його параметри. Кількість таких параметрів для кожного інформаційного об'єкта може бути різною і визначається різними факторами.*

*На основі онтологічного аналізу виділених параметрів інформаційних об'єктів можна віднести інформаційні об'єкти до одного класу. Виділення параметрів означає однозначну характеристику відповідного об'єкта на їх основі. Описано алгоритм формування уніфікованих понять для зв'язування цих параметрів так, щоб у результаті зв'язку було отримано єдиний інформаційний об'єкт. Побудовано матрицю єдиного інформаційного простору на основі онтологічного аналізу.*

*Отримано вектор відновлення параметрів для інформаційного об'єкта в єдиному інформаційному просторі на основі матриці параметрів інформаційних об'єктів з урахуванням вагових коефіцієнтів.*

**Ключові слова:** *єдиний інформаційний простір, інформаційний об'єкт, параметри інформаційного об'єкта, повнозв'язна топологія, система дистанційного навчання.*

**Постановка проблеми.** Як один із можливих способів подолання труднощів традиційної освіти може бути запропоновано створення і застосування єдиного інформаційного освітнього простору [1].

Наукового визначення поняття «єдиний інформаційний простір» досі не запропоновано, хоча досить часто дане словосполучення зустрічається в різних змістових інтерпретаціях. Поняття «інформаційний простір» застосовується надзвичайно широко, але його зміст як наукового визначення поки не досить розроблений.

Автори роботи [2] розглядають інформаційний простір як територію, яка «охоплена» інформацією, інфраструктурою, інформаційними ресурсами, а також у межах якої всі суб'єкти мають рівні можливості для аналізу, передачі та інших можливих маніпуляцій з інформацією та даними в будь-якій точці цього простору [3]. Подібні визначення інформаційного простору є у Є. Прохорова, М. Мізінцевої та інших сучасних дослідників.

Дистанційне навчання – це взаємодія викладача та студентів між собою на відстані, що відображає всі властиві навчальному процесу компоненти (цілі, зміст, методи, організаційні форми, засоби навчання) та реалізовується специфічними засобами Інтернет-технологій або іншими засобами, які передбачають інтерактивність [4]. Для систем дистанційного навчання єдиний інформаційний простір можна характеризувати такими параметрами [4]:

– види інформаційних ресурсів, якими можуть обмінюватися об'єкти системи (текстова, графічна, аудіо– та відеоінформація);

– кількість інформаційних об'єктів (ІО), які взаємодіють у системі дистанційного навчання;

– територія, на якій розташовані інформаційні об'єкти, охоплені єдиним інформаційним простором (увесь світ, країна, регіон, район, місто);

– правила організації обміну інформаційними ресурсами між інформаційними об'єктами (обмін типу «клієнт – сервер», «точка – точка»);

– швидкість обміну інформаційних ресурсів між інформаційними об'єктами;

– типи каналів обміну інформаційних ресурсів між інформаційними об'єктами (провідний, оптоволоконний, супутниковий канали).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У роботі [5] розроблено математичну модель єдиного інформаційного простору виробничого підприємства на основі пов'язаних даних, яка забезпечує ефективне виконання завдань оперативного управління. Запропонована модель показує взаємодії користувача з інформаційним простором.

У роботі [6] описується метод інтеграції різно-рідних геопросторових даних на основі концепції метаданих у сучасних автоматизованих системах інформаційного забезпечення.

У роботі [7] запропоновано рішення, що дають змогу забезпечити взаємодію між компонентами автоматизованої системи управління, та розглянуто особливості архітектури єдиного інформаційного простору з метою об'єднання існуючих джерел даних, необхідних для спільного використання під час управління складними технологічними процесами. У рамках роботи запропоновано використовувати сервіс-орієнтований підхід, який передбачає поділ системи на компоненти (сервіси).

У роботах [8–11] розглядаються методи пошуку та ідентифікації інформаційних об'єктів, однак розглянуті в них алгоритми є досить вузькими і не виходять за рамки простих інтерфейсів, що залишає відкритим питання про розроблення більш масштабованих алгоритмів мінімізації інтерфейсів.

Метод пошуку прихованих об'єктів, заснований на їх класифікації, запропоновано в роботі [12]. Вибір найбільш інформативних моментних ознак класифікації зроблений за метричним критерієм. Але використання вибраних моментних ознак під час розпізнавання дає змогу впевнено виявляти лише окремі об'єкти.

У роботі [13] параметри об'єктів інформаційного забезпечення автоматизованих систем управління пропонується відновлювати на основі операційного методу, що використовує дискретні нетейлорівські перетворення. Але в отриманій моделі відсутні методична похибка і неперервний аргумент, що дало змогу підвищити точність моделювання і моделювати процес відновлення про стан об'єктів АСУ в реальному часі.

У роботі [14] описано організацію і принципи побудови єдиного інформаційного простору, а також представлено схему його формування. Також розглянуто формування єдиного інформаційного простору з використанням спеціалізо-

ваної інформаційної комп'ютерної системи, яка фактично є апаратно-програмним базисом для підтримки єдиного інформаційного простору. Розглянуто етапи ідентифікації інформаційного об'єкта в єдиному інформаційному просторі. Запропоновано метод пошуку відсутніх ознак вхідного об'єкта шляхом реалізації взаємодії інформаційних об'єктів між собою всередині єдиного інформаційного простору. Але не розглянуто вид топології для реалізації такого пошуку.

Тому було прийнято рішення розглянути процес відновлення параметрів інформаційних об'єктів в єдиному інформаційному просторі з використанням повнозв'язної топології.

**Постановка завдання.** Мета дослідження – виявити мінімальне число параметрів для ідентифікації об'єктів та за необхідності відновити (заповнити) відсутні параметри в інформаційних об'єктах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для того щоб працювати з єдиним інформаційним простором, необхідно представити інформацію в уніфікованому вигляді. Для цього необхідно визначити деякі параметри, які характеризують інформаційний об'єкт.

Єдиний інформаційний простір має свою внутрішню структуру, деякі внутрішні елементи, зв'язки між ними, характеристики та особливості їх функціонування. Далі потрібно визначити, що буде надходити на вхід єдиного інформаційного простору й як цим керувати.

Інформаційні об'єкти можна представити у вигляді мережі, а саме у вигляді повнозв'язної топології. Такий вид топології передбачає випадок, коли всі інформаційні об'єкти (ІО1–ІО8) пов'язані один з одним (рис. 1). Однак кількість зв'язків при цьому є надмірною, тому такий вид топологій використовується вкрай рідко.

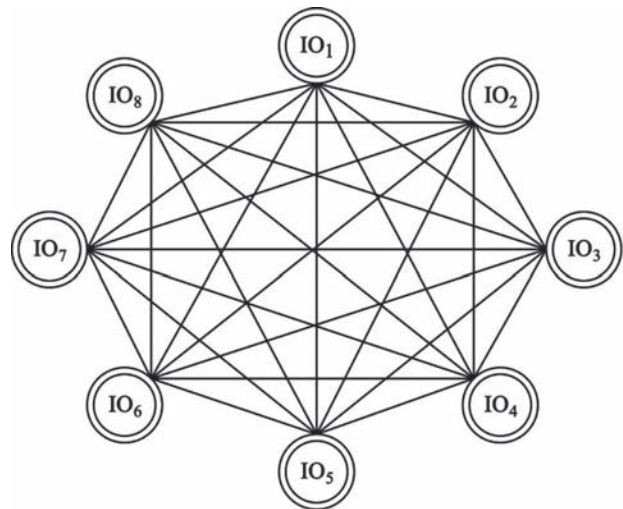


Рис. 1. Повнозв'язна топологія

Предметна сфера, що розглядається, – це дистанційне навчання, яке включає у себе видачу завдань, їх обробку викладачами та студентами, тести для самоконтролю знань тощо.

Розглянемо систему дистанційного навчання, в якій можна виділити такі інформаційні об'єкти: IO1 – Лекція; IO2 – Завдання; IO3 – Тести; IO4 – Wiki; IO5 – Глосарій; IO6 – Форум. Далі представляємо інформаційні об'єкти (IO1–IO6) в єдиному інформаційному просторі у вигляді окремих вузлів (рис. 2).

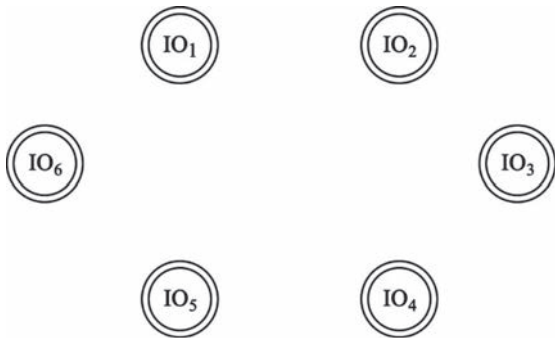


Рис. 2. Представлення інформаційних об'єктів у єдиному інформаційному просторі

Для визначення зв'язків між цими інформаційними об'єктами (IO) спочатку необхідно виділити для кожного з них його параметри.

Кількість параметрів для кожного інформаційного об'єкта (IO1–IO6) може бути різною і визначається різними факторами. Наприклад, у IO1 «Лекція» їх може бути більше, ніж у IO2 «Завдання» або IO3 «Тести». Тобто інформаційні об'єкти (IO1–IO6) можна представити у вигляді матриці, де кожен інформаційний об'єкт (IO1–IO6) має свою кількість параметрів:  $IO_1 (P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6)$ ;  $IO_2 (P_2, P_4)$ ;  $IO_3 (P_3, P_4, P_5)$ ;  $IO_4 (P_1, P_4, P_7)$ ;  $IO_5 (P_2, P_6, P_7)$ ;  $IO_6 (P_5, P_6, P_7, P_8)$ .

Бачимо, що деякі параметри в інформаційних об'єктах (IO1–IO6) будуть співпадати. На основі таких співпадаючих параметрів можна проставити зв'язки між інформаційними об'єктами (IO1–IO6) (рис. 3).

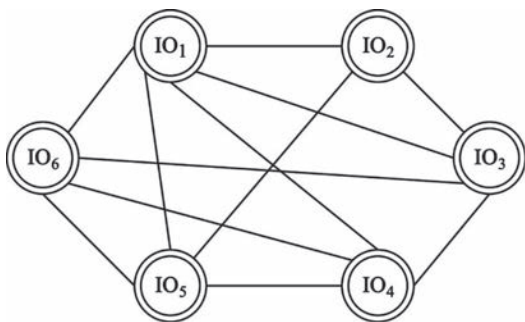


Рис. 3. Зв'язки між інформаційними об'єктами

Для того щоб побудувати єдиний інформаційний простір, необхідна єдина картина, якими параметрами володіє кожен інформаційний об'єкт усередині, на рівні низької декомпозиції.

Наприклад, якщо деяке слово-відповідь було написано різними мовами, наприклад англійською, російською, французькою, то необхідно знайти щось спільне для цих понять. Тобто побудувати матрицю і знайти те, що однозначно характеризуватиме всі поняття в єдиному інформаційному просторі. Отже, необхідно представити інформаційні об'єкти з їхніми параметрами і провести онтологічний аналіз, на підставі якого можна буде стверджувати, що ці інформаційні об'єкти можуть бути віднесені до одного класу.

Необхідно зв'язати виділені параметри за певними критеріями в єдине розуміння. Причому деякі параметри деякого об'єкта будуть складовими частинами єдиного інформаційного простору, а деякі ні, тобто не будуть братися до уваги під час формування єдиного інформаційного простору. Тому отримаємо багато параметрів, які входять до єдиного інформаційного простору, а також отримаємо деяку кількість факторів, що характеризуватимуть об'єкт, але не входитимуть до єдиного інформаційного простору, наприклад IO6 (P8). Вони згадуватимуться під час опису інформаційних об'єктів, але виключатимуться з розгляду. Тоді матриця єдиного інформаційного простору буде виглядати так (рис. 4).

|                 | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> | P <sub>6</sub> | P <sub>7</sub> | P <sub>8</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IO <sub>1</sub> | ■              | ■              | ■              | ■              | ■              | ■              |                |                |
| IO <sub>2</sub> |                | ■              |                | ■              |                |                |                |                |
| IO <sub>3</sub> |                |                | ■              | ■              | ■              |                |                |                |
| IO <sub>4</sub> | ■              |                |                | ■              |                |                | ■              |                |
| IO <sub>5</sub> |                | ■              |                |                |                | ■              | ■              |                |
| IO <sub>6</sub> |                |                |                |                | ■              | ■              | ■              | ■              |

Рис. 4. Матриця єдиного інформаційного простору

Далі необхідно виділити ті параметри, за якими буде проводитися онтологічний аналіз. Виділення параметрів означає однозначну характеристику відповідного об'єкта. Тобто якщо деякий інформаційний об'єкт має параметри IOi (P3, P4), то це, умовно кажучи, «Лекція». І це можливо зробити завдяки онтології, яка дасть

зможу виділити алгоритм формування уніфікованих понять, щоб зв'язати ці параметри так, щоб у результаті зв'язку було отримано єдиний інформаційний об'єкт (ІО). Для того щоб визначити мінімальне число параметрів, які необхідні для ідентифікації об'єктів, необхідно виділити критичні параметри кожного об'єкта. Можливо, для якогось об'єкта буде достатньо й одного параметру, а можливо, й п'яти або десяти. Тобто число параметрів повинно бути не лише мінімальним, а й оптимальним. Місцями кількості параметрів буде не вистачати, а місцями – їх буде в надлишку. Нехай мінімальне оптимальне значення параметрів для кожного інформаційного об'єкта буде дорівнювати 5 (P1-P5).

Далі необхідно заповнити параметри у всіх інформаційних об'єктах. Одні й ті ж самі параметри збігаються для різних об'єктів. Тобто всі об'єкти відрізняються один від одного, але значення цих параметрів можуть співпадати. Від різних джерел можна отримати інформацію про один і той самий параметр. Наприклад, є інформаційні об'єкти ІО1–ІО6, що взаємодіють між собою так (рис. 5).

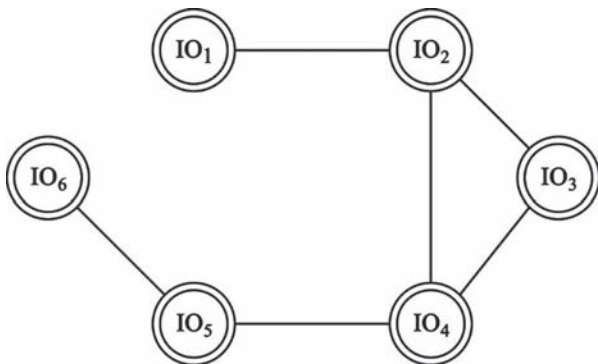


Рис. 5. Інформаційні об'єкти та зв'язки між ними

Представимо, що інформаційний об'єкт ІО3 у даний момент часу з якихось причин недоступний (відсутній зв'язок або ІО3 описаний невідомою мовою), тобто його параметри невідомі. Але при цьому цей інформаційний об'єкт (ІО3) взаємодівав за якимись формальними параметрами з іншими параметрами, тобто з іншими інформаційними об'єктами (ІО2 та ІО4) і там залишилися дані про ці параметри.

На основі тих інформаційних об'єктів (ІО2 та ІО4), які якимось взаємодіяли з інформаційним об'єктом ІО3, можливо витягувати параметри інформаційного об'єкту ІО3 та в подальшому будувати матрицю (рис. 6).

|                 | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| ІО <sub>3</sub> |                |                |                |                |                |
| ІО <sub>1</sub> |                | ■              | ■              |                |                |
| ІО <sub>2</sub> | ■              |                | ■              |                |                |
| ІО <sub>4</sub> |                | ■              | ■              |                |                |
| ІО <sub>5</sub> | ■              |                |                | ■              |                |
| ІО <sub>6</sub> |                | ■              |                | ■              |                |

Рис. 6. Матриця взаємодії параметрів інформаційних об'єктів

Після розгляду матриці з'являється декілька варіантів відновлення параметрів для ІО3:

1. Якщо для першого параметру інформаційного об'єкта ІО3(P1) дані, які витягли з інформаційних об'єктів ІО2 та ІО5, співпадають, то параметр ІО3(P1) можна відновити за формулою:

$$IO_3(P_1) = IO_2(P_1) = IO_5(P_1) \quad (1)$$

2. Якщо для другого параметру інформаційного об'єкта ІО3(P2) дані, які витягли з інформаційних об'єктів ІО1, ІО4 та ІО6, не співпадають, а сам ІО3 взаємодівав із ними без посередників, то можна брати їх середнє значення. Тобто параметр ІО3(P2) можна відновити за формулою:

$$IO_3(P_2) = \frac{IO_1(P_2) + IO_4(P_2) + IO_6(P_2)}{3} \quad (2)$$

3. Але для більш правильного та глибокого підходу необхідно відновити структуру взаємодії об'єктів, тобто якщо об'єкти взаємодіяли один з одним без посередників (ІО3 з ІО2 та ІО4), то необхідно виставити рівень довіри 98% (k=0.98).

Але якщо інформаційний об'єкт взаємодівав з іншим не напряму, а через одного посередника (ІО3 з ІО1 через ІО2; з ІО5 через ІО4), тоді рівень довіри буде 0.95% (k=0,95). При цьому параметр ІО3(P3) можна відновити з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$IO_3(P_3) = \frac{IO_1(P_3) \cdot 0,95 + IO_2(P_3) \cdot 0,98 + IO_4(P_3) \cdot 0,98 + IO_5(P_3) \cdot 0,98}{4} \quad (3)$$

4. Якщо інформаційний об'єкт взаємодівав з іншим не напряму, а через двох посередників (ІО3 з ІО6 через ІО4 та ІО5), тоді рівень довіри буде 91% (k=0,91). При цьому параметр ІО3(P4) можна відновити з урахуванням вагових коефіцієнтів:

$$IO_3(P_4) = \frac{IO_5(P_4) \cdot 0,91 + IO_6(P_4) \cdot 0,91}{2} \quad (4)$$

Таким чином, чим більша буде кількість посередників, тим нижчим буде коефіцієнт довіри.

5. Даних для відновлення параметру IO3(P5) немає взагалі.

Матрицю параметрів інформаційних об'єктів з урахуванням вагових коефіцієнтів зображено на рис. 7.

|                 | P <sub>1</sub> | P <sub>2</sub> | P <sub>3</sub> | P <sub>4</sub> | P <sub>5</sub> |
|-----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| IO <sub>3</sub> |                |                |                |                |                |
| IO <sub>1</sub> |                | k = 0,95       | k = 0,95       |                |                |
| IO <sub>2</sub> | k = 0,98       |                | k = 0,98       |                |                |
| IO <sub>4</sub> |                | k = 0,98       | k = 0,98       |                |                |
| IO <sub>5</sub> | k = 0,95       |                | k = 0,95       | k = 0,95       |                |
| IO <sub>6</sub> |                | k = 0,91       |                | k = 0,91       |                |

Рис. 7. Матриця параметрів інформаційних об'єктів з урахуванням вагових коефіцієнтів

Тим самим отримано вектор відновлення параметрів для інформаційного об'єкта IO3:

$$V_3(IO_3) = \begin{Bmatrix} IO_3(P_1) \\ IO_3(P_2) \\ IO_3(P_3) \\ IO_3(P_4) \\ IO_3(P_5) \end{Bmatrix} \quad (5)$$

**Висновки.** У роботі розглянуто поняття інформаційного об'єкта та єдиного інформаційного простору. Інформаційні об'єкти єдиного інформаційного простору представлені у вигляді окремих вузлів повнозв'язної топології. У результаті декомпозиції предметної сфери отримано набір параметрів для кожного інформаційного об'єкта єдиного інформаційного простору. Кількість таких параметрів для кожного інформаційного об'єкта може бути різною і визначається різними факторами.

З'ясовано, що виділені параметри інформаційних об'єктів на основі онтологічного аналізу дають змогу визначати ці інформаційні об'єкти як об'єкти, які відносяться до одного класу. Також описано алгоритм формування уніфікованих понять, щоб зв'язати параметри інформаційних об'єктів так, щоб у результаті зв'язку отримати єдиний інформаційний об'єкт. На основі такого онтологічного аналізу побудовано матрицю єдиного інформаційного простору.

Отримано вектор відновлення параметрів для інформаційного об'єкта на основі матриці параметрів інформаційних об'єктів з урахуванням вагових коефіцієнтів та побудовано матрицю взаємодії параметрів інформаційних об'єктів.

У подальших дослідженнях планується розглянути відновлення параметрів інформаційних об'єктів в єдиному інформаційному просторі за топологією типу дерева та багаторусному графі.

### Список літератури:

1. Ожерельева Т.А. Об отношении понятий «информационное пространство», «информационное поле», «информационная среда» и «семантическое окружение». *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2014. № 10–2. С. 21–24. URL: <https://applied-research.ru/ru/article/view?id=5989>.
2. Завгородній В.В., Ялова К.М. Концепція створення єдиного інформаційного освітнього простору України на прикладі дистанційного навчання ІТ-студентів. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2014. № 2. С. 112–118.
3. Завгородній В.В., Яловая Е.Н. Перспективы использования дистанционного образования для обучения ИТ-студентов в Днепропетровском государственном техническом университете. *Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського*. 2015. № 1(2). С. 154–161.
4. Yalova, K., Zavorodnii, V., Romanyukha, M., & Sorokina, L. (2016). Challenges and prospects in development of e-learning system for IT students. *International Journal of Continuing Engineering Education and Life Long Learning*. № 26(1). P. 25–43. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJCEELL.2016.075042>.
5. Завгородній В.В., Щербак С.С. Единое информационное пространство производственных предприятий на основе связанных данных. *Системи обробки інформації*. 2013. № 2. С. 275–278.
6. Карин С.А. Интеграция в едином информационном пространстве разнородных геопространственных данных. *Информационно-управляющие системы*. 2012. № 2(57). URL: <http://www.i-us.ru/index.php/ius/article/view/13797>.
7. Особенности архитектуры единого информационного пространства при управлении сложными технологическими процессами / Р.В. Мещеряков и др. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2017. № 20(4). DOI: <https://doi.org/10.21293/1818-0442-2017-20-4-75-81>.

8. Arenas, M., Grau, B. C., Kharlamov, E., Marciuška, Š., & Zheleznyakov, D. (2016). Faceted search over RDF-based knowledge graphs. *Journal of Web Semantics*. № 37. P. 55–74. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.websem.2015.12.002>.
9. Arenas, M., Grau, B. C., Kharlamov, E., Marciuska, S., & Zheleznyakov, D. (2014, October). Enabling Faceted Search over OWL 2 with SemFacet. In OWLED P. 121–132. URL: <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.660.9713&rep=rep1&type=pdf>.
10. Gershkovich, M.M., & Biryukova, T.K. (2014). The tasks of identification of informational objects in area-spread data arrays. *Sistemy i Sredstva Informatiki [Systems and Means of Informatics]*. № 24(1). P. 224–243. DOI: <https://doi.org/10.14357/08696527140114>.
11. Biloshchytskyi, A., Kuchansky, A.Yu, Biloshchytska, S., Kuzka, Ye.S., & Lyashchenko, T. Метод ідентифікації направлений досліджень учених на основі кластерного аналізу научних публікацій. *Всточноевропейский журнал передовых технологий*. 2017. № 5(2(89)). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112323>.
12. Логунов А.Н., Логунова Г.Л. Выбор признаков распознавания при поиске скрытых объектов. *Всточноевропейский журнал передовых технологий*. 2012. № 5(9(59)). DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2012.4622>.
13. Засядько А.А. Восстановление параметров объектов информационного обеспечения автоматизированных систем управления на основе дифференциально-нетейлоровских преобразований. *Системи обробки інформації*. 2015. Вип. 4. С. 20–23. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi\\_2015\\_4\\_6](http://nbuv.gov.ua/UJRN/soi_2015_4_6).
14. 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*. № 1(2021). P. 34–46.

#### **Zavgorodnii V.V. RESTORING PARAMETERS OF INFORMATION OBJECTS IN A UNIFIED INFORMATION SPACE AT FULLY CONNECTED TOPOLOGY**

*The concepts of a unified information space, information object, distance learning are considered in the work. The parameters of distance learning in a unified information space are described.*

*The information objects of the unified information space are presented in the form of a fully connected topology. However, the number of connections is excessive, so this type of topology is rarely used.*

*Distance learning was chosen as a subject area, which includes the issuance of tasks, their processing by teachers and students, tests for self-control of knowledge, and so on. The system of distance learning was considered, in which information objects are selected. As a result of the decomposition of the distance learning area, a set of parameters for each information object of a unified information space is obtained.*

*Information objects were presented in a unified information space in the form of separate nodes, the connections between these information objects were determined. To do this, for each information object, its parameters are first selected. The number of such parameters for each information object may be different and determined by different factors.*

*Based on the ontological analysis of the selected parameters of information objects, information objects can be assigned to one class. Selection of parameters means an unambiguous characteristic of the corresponding object on their basis. The algorithm of formation of unified concepts for binding of these parameters so that as a result of communication the uniform information object was received is described. A matrix of a unified information space based on ontological analysis is constructed.*

*The vector of parameter recovery for the information object in a unified information space is obtained on the basis of the matrix of parameters of information objects taking into account the weights.*

**Key words:** *unified information space, information object, parameters of information object, fully connected topology, distance learning system.*

**Кандиба І.О.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Фісун М.Т.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Горбань Г.В.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

**Антіпова К.О.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

## ГЕНЕРАЦІЯ СЦЕНАРІЇВ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ НА ОСНОВІ КОГНІТИВНОЇ КАРТИ ТА ПРЕДМЕТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МОВИ ПРОГРАМУВАННЯ

*У статті досліджено методи передбачення, що базуються на експертному оцінюванні. Проаналізовано сучасні дослідження в галузі передбачення та прогнозування вступної кампанії закладу вищої освіти (ЗВО), методи підвищення ефективності окремих ресурсів вступної кампанії. Запропоновано алгоритм реалізації методів передбачення вступної кампанії ЗВО на основі сценарного аналізу. Проаналізовано методи генерації сценаріїв на основі моделі предметної галузі. Представлено реалізацію інформаційної системи для збору експертних оцінок шляхом застосування методів мозкового штурму та Делфі. Проведено дослідження математичних засобів моделювання, що підтримують можливість роботи з графовими структурами. Розроблено предметно-орієнтовану мову програмування, що реалізує функції засобів математичного моделювання на основі графової бази даних Neo4j. Наведено алгоритм розроблення цієї предметно-орієнтованої мови за допомогою автоматизованих генераторів синтаксичних аналізаторів. Засобами представленої інформаційної системи проведено експертне оцінювання ймовірних подій вступної кампанії. На основі оцінок експертів побудовано когнітивну карту вступної кампанії університету, де вершинами представлено ймовірні події, а ребрами відображено ймовірність виклику певної події іншою. Описано метод зберігання та обробки когнітивної карти у Neo4j за допомогою предметно-орієнтованої мови програмування. Застосовано метод генерації множини сценаріїв на основі когнітивної карти шляхом реалізації спеціалізованого оператора предметно-орієнтованої мови. Застосовано методологію дерева ймовірностей для визначення ймовірності кожного згенерованого сценарію. Розроблено інтерфейс перегляду згенерованих сценаріїв із використанням мови розмітки graphviz. Згенеровано множини сценаріїв для передбачення вступної кампанії ЗВО.*

**Ключові слова:** передбачення, сценарний аналіз, когнітивна карта, графові БД, предметно-орієнтована мова програмування.

**Постановка проблеми.** Ефективне прийняття рішень у будь-якій предметній галузі потребує проведення ґрунтовних досліджень можливих шляхів розвитку цієї галузі. Існують два основні підходи до розв'язку задачі: застосування методів прогнозування та застосування передбачення [1].

Методи прогнозування ґрунтуються на аналізі ретроспективних даних кількісного характеру, що обмежує їх практичне застосування. Передбачення спрямоване на визначення подій якісно нового характеру [2] та їх характеристик, що, ураховуючи сучасні тенденції розвитку технологій і трансформації предметних галузей, робить методи передбачення більш актуальними.

Здебільшого передбачення являє собою застосування окремих взаємопов'язаних методів у певній послідовності. Ці методи сформовано за допомогою універсального підходу системного аналізу [2].

Ключову роль у передбаченні відіграє сценарний аналіз [3]. Сценарний аналіз – це інструмент, що знайшов застосування у багатьох різних галузях. Сутність сценарного аналізу полягає у формуванні або генерації послідовності подій. У разі передбачення сценарії допомагають визначити результат впливу певної послідовності подій [4].

Існує багато різних методів генерації сценаріїв, що поділені на дві основні групи [5]:



– якісні методи: метод мозкової атаки, метод Делфі, морфологічний аналіз та ін.;

– графові методи: дерево подій, дерево відмов, дерево ймовірностей та прогнозний граф.

Генерація сценаріїв для предметних галузей – складний процес, що вимагає на першому етапі застосування методів отримання якісного характеру, що входять до групи якісних методів генерації, а на другому – застосування складнішого математичного апарату – теорії графів та методів роботи з ними. Предметною сферою для дослідження та досягнення поставленої мети вибрано вступну кампанію університету. Вона залежить від багатьох чинників, у тому числі якісно нового характеру. Прикладом цього є введення карантину, що обмежує можливість проведення різних масових заходів: дня відкритих дверей, наукового пікніку, курсів підготовки до зовнішнього незалежного оцінювання та ін. Зважаючи на цей факт та динамічну зміну умов вступу до університету застосування передбачення для вступної кампанії є актуальним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Ефективне проведення вступної кампанії закладу вищої освіти є актуальною проблемою, що розглядається в багатьох джерелах [6–8]. Основні напрями досліджень цих робіт: визначення шляхів проведення професійної орієнтації, підвищення ефективності інформування абітурієнтів, дослідження впливу регіонального складника на вступну кампанію.

У роботі [6] проведено дослідження та класифікацію профорієнтаційних робіт кафедри ЗВО, у тому числі формування у абітурієнтів розуміння особливостей кар'єри, що почнеться після закінчення навчання, але в роботі відсутні пропозиції щодо сценаріїв реалізації заходів вступної кампанії.

Важливим складником вступної кампанії закладу вищої освіти є інформаційні ресурси мережі Інтернет. У роботі [7] наведено дослідження зв'язку між частотою пошукових запитів цільової аудиторії та кількістю абітурієнтів закладів вищої освіти. Це дослідження допомагає визначити основні напрями роботи з інформаційними ресурсами, а саме зі сторінкою університету у мережі Інтернет. Підвищення ефективності впливу online-ресурсів ЗВО більш детально розглянуто у роботі [8]. Однак у роботах [7; 8] не пропонується алгоритму побудови сценаріїв для більш ефективного проведення профорієнтаційних робіт.

Способи генерації сценаріїв запропоновано у роботах [5; 9]. Так, у [5] запропоновано застосування методології системного аналізу для гене-

рації та аналізу сценаріїв. У роботі [9] пропонується спосіб опису предметної галузі на основі когнітивних карт. Також у [9] описується можливість генерації сценаріїв на основі когнітивних карт шляхом перебору дуг графу когнітивної карти. Виконаний аналіз показав, що питання передбачення результатів вступної кампанії потребують подальших досліджень.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розроблення інформаційної системи для генерації множини сценаріїв на основі когнітивної карти вступної кампанії закладу вищої освіти. Створення подібної системи дасть змогу ефективніше застосовувати ресурси університету для проведення вступної кампанії. Для досягнення цілі були поставлені такі завдання:

– дослідження методів якісного експертного оцінювання, що необхідно застосувати для визначення ймовірних дій і подій вступної кампанії та їх характеристик;

– розроблення засобів представлення графових моделей та операцій над ними для можливості обробки когнітивних карт;

– реалізація генерації множини сценаріїв на основі когнітивної карти.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сам процес передбачення є чітко визначеною послідовністю взаємозв'язаних кроків. У роботі [2] запропоновано такі етапи передбачення, що спираються на методи якісного аналізу:

- 1) попереднє дослідження проблеми;
- 2) якісний аналіз проблеми;
- 3) генерація сценаріїв;
- 4) оцінка реалістичності сценаріїв.

Першим кроком генерації сценаріїв є визначення концептів когнітивної карти. Для реалізації цього кроку необхідне проведення опитування експертів, що може бути здійснено на основі кількох різних методів. Початок передбачення результатів вступної кампанії ЗВО вимагає визначення всіх можливих дій і подій та їх характеристики. Реалізацію цього кроку можливо здійснити за допомогою застосування методу мозкової атаки, що потребує від експертів висловлювання всіх ідей [10].

Визначивши всі ймовірні дії і події та їх характеристики, експертам необхідно оцінити визначені характеристики. Одним із найбільш розповсюджених методів експертного оцінювання є метод Делфі. Суть методу полягає у проведенні індивідуального анкетування висловлювань експертів, що дає змогу отримати їх оцінки без групового впливу шляхом досягнення консенсусу або стійкості результатів [11; 12].

Алгоритм реалізації передбачення можна представити у вигляді блок-схеми (рис. 1).

Реалізувати опитування експертів можливо шляхом розроблення web-застосунку. Для кожного методу необхідна реалізація окремого інтерфейсу.

Експертною групою виступали викладачі кафедри інженерії програмного забезпечення. Виділено низку подій, що впливають на вступну кампанію ЗВО: відгуки друзів, збільшення кількості вакансій ІТ-компаній, залучення до викладання фахівців із цих компаній, проведення дня відкритих дверей, проведення наукових пікніків у місті, розміщення реклами у соціальних мережах, проведення курсів підготовки до ЗНО, роздача друкованої продукції, зустрічі з викладачами у школах, зустрічі з викладачами у коледжах, залучення учнів шкіл до розважальних заходів у ЗВО, участь у вступній кампанії фахівців з ІТ-компаній, розміщення на телебаченні рекламних матеріалів ЗВО, проведення онлайн-зустрічей, участь викладачів у шкільних олімпіадах, розміщення на сайті ЗВО інформації про якість викладання (сертифікати акредитації, сертифікати міжнародних курсів та ін.), поліпшення умов навчання у ЗВО (проведення ремонту, закупівля нових меблів та обладнання), участь студентських гуртків самореалізації у вступній кампанії ЗВО, консультування у

приймальній комісії, збільшення або зменшення кількості абітурієнтів у поточному році, поява нового актуального напрямку на ринку ІТ (вплив на актуальність галузі у цілому), введення нових курсів, пов'язаних із вимогами ринку ІТ.

Отримані дані використовуються для побудови когнітивної моделі, що в літературі часто має назву когнітивної карти. Когнітивна карта являє собою узагальнену структуру знань у вигляді графічно формалізованого представлення зв'язків між концептами (фактами, подіями, властивостями та ін.) [14]. Відображення когнітивної карти можливо у вигляді графу, де вершини представлені концептами, а ребра відображають вплив концептів один на одного. Граф під час реалізації когнітивної карти може бути знаковим або зваженим, де вага ребра відображає якусь міру впливу у заданій шкалі [15].

Важливу роль відіграє саме структура, на якій будується когнітивна карта. Графи – це математична абстракція сукупності об'єктів двох типів: вершин та ребер. Граф визначається математичним записом як  $G(V,S,F)$ , де  $V$  – множина вершин (вузлів);  $S$  – множина ребер (дуг);  $F$  – функція відображення множини ребер на множину вершин [16]. Графи можуть бути використані у різних цілях: для відображення алгоритмів, моделювання процесів логістики, економіки, у комунікативних та транспортних задачах.

Існують різні програмні середовища, що підтримують можливість роботи з графовими структурами: Maple, Mathcad, Matlab та ін. Із перерахованих необхідно виділити Maple, що орієнтований на вирішення складних математичних задач теорії графів, візуалізацію даних та моделювання. Він має власну вбудовану мову програмування. Ця мова реалізує синтаксис стандартних математичних операцій: піднесення в степені, добування кореню, тригонометричні операції, розв'язання рівнянь й нерівностей, інтегральне числення і безпосередню роботу з графами.

Робота з графами у Maple здійснюється за допомогою модуля *networks*. Цей модуль містить опис таких операторів для роботи з графами [17]:

1) *addedge* – додавання ребер до графу;

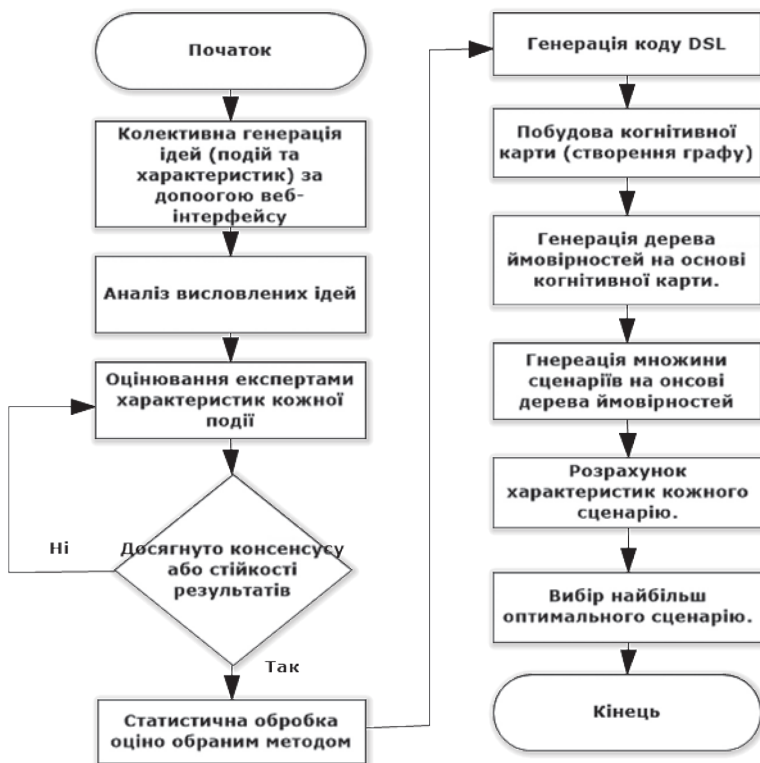


Рис. 1. Блок-схема алгоритму передбачення вступної кампанії

- 2) *addvertex* – додавання вершин до графу;
- 3) *adjacency* – побудова матриці суміжності;
- 4) *complete* – створення повного графу;
- 5) *delete* – видалення вершин та ребер із графу;
- 6) *draw* – побудова креслення графу;
- 7) *duplicate* – створення копії графу;
- 8) *ends* – повернення імен вершин;
- 9) *eweight* – знаходження ваги ребер;
- 10) *flow* – знаходження максимального потоку в мережі;
- 11) *head* – знаходження початкових вершин;
- 12) *incidence* – побудова матриці інцидентності;
- 13) *isplanar* – перевірка графа на планарність;
- 14) *new* – створення нового (порожнього) графу;
- 15) *petersen* – створення графу Петерсена;
- 16) *random* – створення випадкового графу;
- 17) *shortpathstree* – побудова дерева найкоротших шляхів;
- 18) *show* – відображення повної інформації про граф;
- 19) *tail* – відображення кінцевих вершин;
- 20) *void* – створення графу без ребер;
- 21) *vweight* – знаходження ваги вершин.

Процес передбачення, що виконується шляхом якісного аналізу системи, базується на сценарному аналізі [2]. Під сценарієм розуміють сукупність імовірних, взаємопов'язаних подій. Кожна подія має власний набір характеристик, що впливає на загальні характеристики сценарію.

Когнітивна карта є основою для представлення взаємозв'язків елементів сценарію та генерації множини сценаріїв [18]. Отже, під час реалізації передбачення на основі когнітивної моделі графа кожна вершина графа може мати власний набір характеристик. Програмні засоби, що реалізують математичну обробку графової моделі, не підтримують можливість зберігання набору даних у вершинах [17; 19; 20].

На ринку ІТ-продуктів уже пропонується низка систем керування базами даних (СКБД), що реалізовані на основі графової моделі. За даними порталу *db-engines.com*, лідером серед таких програмних продуктів станом на лютий 2021 р. є СКБД Neo4j. Ця СКБД повністю реалізує графову модель зберігання та обробки даних. Вона працює значно швидше із запитом до кількох пов'язаних різнотипних об'єктів, аніж реляційні СКБД, що дає змогу швидко отримати всі можливі шляхи на графі, котрі відображатимуть когнітивну модель. СКБД Neo4j має вбудовану мову маніпуляції даними Cypher. На жаль, ця мова не підтримує оператори математичної обробки графової моделі:

генерацію матриць суміжності та інцидентності, відображення початкових та кінцевих вершин, без підключення додаткового модулю не підтримується знаходження максимального потоку на графі та ін., але мова має всі необхідні оператори для маніпуляції даними, у тому числі обчислення, як і в реляційних БД, деяких агрегатних функцій: *count*, *avg*, *max*, *min*, *sum*, *stDev*. Окрім того, мова має спеціалізовані оператори для виконання операцій над графами: пошук найкоротшого шляху, визначення всіх шляхів та ін. [10].

Вузли у СКБД Neo4j є аналогією рядку таблиці у реляційних базах даних, де мітки виконують роль полів, а аналогом самої таблиці є тип вузла. Загального представлення таблиці не існує, що дає змогу встановлювати різні характеристики однотипним об'єктам.

Синтаксис мови Cypher сильно відрізняється від вбудованих мов у середовищах Maple, Mathcad, Matlab. Цей факт є підставою для створення предметно-орієнтованої мови роботи з графовою БД Neo4j, що використовуватиме оператори роботи з графами розповсюджених засобів математичного моделювання графів, наприклад Maple.

Предметно-орієнтованими мовами (ПОМ) називають мови програмування, що використовуються в певних предметних сферах або для спрощення роботи фахівців у певній галузі без навичок програмування [22]. До цього типу мов програмування можна віднести більшість мов моделювання (GPSS, Matlab, Maple та ін.), мови обробки даних (SQL, Cypher), мови для розроблення експертних систем (CLIPS, OWL) тощо.

Транслятори ПОМ включають у себе такі компоненти, як лексичний, синтаксичний та семантичний аналізатори. Розроблення перерахованих аналізаторів є відносно складним процесом, але його можна спростити шляхом використання спеціалізованих автоматичних генераторів лексичного та синтаксичного аналізаторів [23].

Реалізація ПОМ для когнітивного моделювання потребує використання операторів маніпуляції даними аналогічних операторам БД та операторів математичної обробки графів:

- 1) *add vertex* та *add edge* – для створення вершин та ребер у графі;
- 2) *delete* – для видалення вершин або ребер у графі;
- 3) *ends* – для перегляду списку наявних вершин та їхніх міток;
- 4) *head* – для перегляду початкових вершин;
- 5) *tail* – для відображення кінцевих вершин;
- 6) *adjacency* – перегляд матриці суміжності;

- 7) *incedence* – відображення матриці інцедентності;
- 8) *ShortPath* – пошук найкоротшого шляху;
- 9) *AllPath* – пошук усіх шляхів між двома вершинами;
- 10) *GetAllScenario* – генерація всіх можливих сценаріїв.

Представлені математичні операції з графами є аналогами операцій пакету Maple [17]. Застосування автоматичних генераторів аналізаторів потребує опису вхідної ПОМ за допомогою метамови форм Бекуса – Наура (БНФ) [24; 26]:

<Операція над графом> ::= <операція додавання> | <операція видалення> | <пошук найкоротшого шляху> | <пошук всіх шляхів> | <відображення всіх вершин> | <відображення початкових вершин> | <відображення кінцевих вершин> | <відображення матриці інцедентності> | <відображення матриці суміжності> | <генерація сценаріїв>;

<операція додавання> ::= **add** <додати сутність> <додати сутність> ::= <додати вершину> | <додати ребро>

<додати вершину> ::= **vertex** <назва> : <тип> ( <перелік міток> )

<перелік міток> ::= <назва> : <значення> | <назва> : <значення> , <перелік міток>

<додати ребро> ::= **edge** <тип> ( <назва> , <назва> ) : <властивості ребра>

<властивості ребра> ::= <назва> : <значення> | <назва> : <значення> , <перелік міток>

<операція видалення> ::= **delete** <видалити сутність>; <видалити сутність> ::= <видалити вершину> | <видалити ребро>

<видалити ребро> ::= **edge** ( <назва> , <назва> )

<видалити вершину> ::= **vertex** <параметри видалення вершини>

<параметри видалення вершини> ::= **ID** : <номер> | <назва> | <перелік міток>

<пошук найкоротшого шляху> ::= **ShortPath** ( <назва> , <назва> )

<пошук всіх шляхів> ::= **AllPath** ( <назва> , <назва> )

<генерація сценаріїв> ::= **GetAllScenario** ( <назва> , <назва> ) : <перелік операцій над мітками> | <перелік операцій над мітками> ::= <операція над міткою> | <операція над міткою> , <перелік операцій над полями>

<операція над міткою> ::= <операція> ( <назва> )

<операція> ::= summ | multiplication | probability;

<відображення всіх вершин> ::= **Ends**

<відображення початкових вершин> ::= **Head**

<відображення кінцевих вершин> ::= **Tail**

<відображення матриці інцедентності> ::= **Incedence**

< відображення матриці суміжності> ::= **Adjacency**

<Назва> ::= [A-Z][A-Za-z0-9]+

<Тип> ::= [A-Z][A-Za-z]+

<Значення> ::= <цифра> | <рядок>

<цифра> ::= ^[-]?[0-9]\*[.]?[0-9]+

<рядок> ::= « [^»]+ «;

<номер> ::= [0-9]+;

Наведена граматика містить оператор для виконання побудови сценаріїв, що виконує перебір усіх шляхів на графі аналогічно операції побудови сценаріїв на основі дерева ймовірностей. Цей підхід застосовується як один із методів ситуаційного управління [26]. При цьому підході всю когнітивну карту можна відобразити у вигляді дерева ймовірностей, тоді кожен сценарій утворюється шляхом перебору дуг (рис. 2).

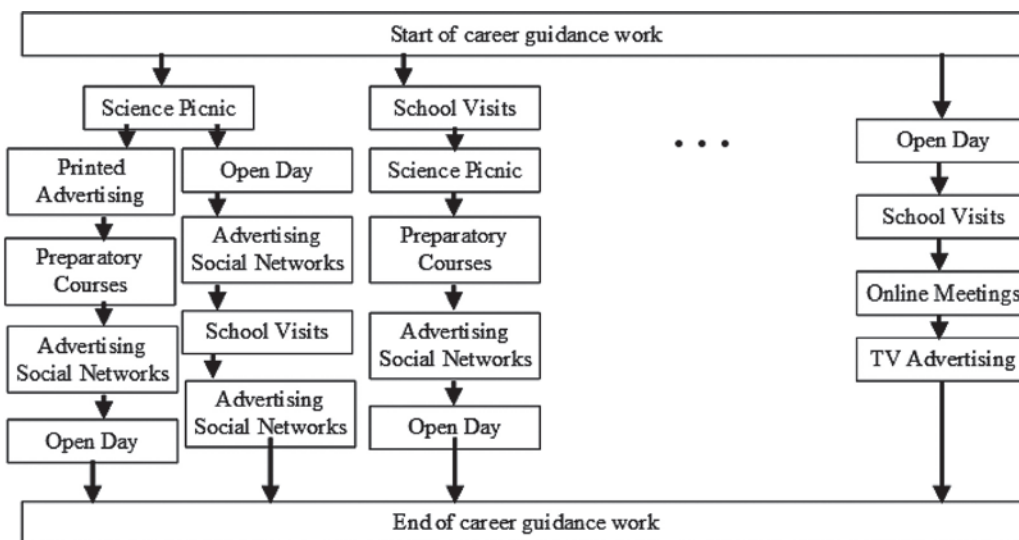


Рис. 2. Відображення процесу формування множини сценаріїв

Важливим складником генерації сценаріїв є розрахунок характеристик кожного сценарію. Цю функцію реалізовано за принципом агрегатних функцій: count, avg, max, min, sum.

За наявності формального опису ПОМ можливо розпочати процес автоматичної генерації синтаксичного аналізатора. Існує декілька доступних інструментів автоматичної генерації аналізаторів: Pyparsing, Parglare, PLY, ANTLR, Unicc.

Серед доступних інструментів варто виділити Unicc (Universal Compiler-Compiler). Він розроблений на мові C і підтримує можливість роботи з різними операційними системами та мовами програмування загального призначення. Під час розроблення ПОМ для графової БД параметрами можуть виступати рядки, що містять текст кирилицею. На відміну від аналогів Unicc підтримує можливість роботи з кирилицею. Згенерований синтаксичний аналізатор працює за методом LALR(1) (Lookahead Left to Right) [26].

Транслятор для вхідної ПОМ розроблено на мові загального призначення Python. Ця мова займає одну з лідируючих позицій у рейтингах вакансій на ринку праці, що сприяє її розвитку та вдосконаленню. Окрім того, Python підтримує декілька різних парадигм програмування та велику кількість додаткових інструментів, наприклад бібліотеки для різних СКБД, вебфреймворки (Flask, Django тощо), бібліотеки для роботи з апаратним забезпеченням та ін. Перелічені переваги роблять python привабливим інструментом для розроблення ПОМ.

Результатом генерації Unicc є код на мові Python, що включає у себе декілька класів (рис. 3). Функціонування транслятора ПОМ вимагає наявності семантичного аналізатора, що безпосередньо перетворюватиме вхідний код на код вихідною мовою. Вихідною мовою виступає Cypher, що виконує маніпуляцію з графовою БД.

Підключення до СКБД Neo4j виконується за допомогою бібліотеки ru2neo. Цей модуль доступний у репозиторіях менеджера керування пакунками pip. Виконання підключення здійснюється шляхом уведення даних користувача та адреси призначення до конструктора об'єкта Graph.

Створення вершини мовою Cypher має такий вигляд: `Create(PrintedAdvertising:event {Teachers_hours_according_to_the_plan:0,actual_hours:2,financial_expeses:500, increasing_percentage_entrants:2, average_score_entrants:175, vertexName: «PrintedAdvertising», Probability:0.8, title: «Роздача друкованої продукції» })`, цей же запит ПОМ виглядатиме так: `add vertex PrintedAdvertising:event`

(`Teachers_hours_according_to_the_plan:0, actual_hours:2, financial_expeses:500, increasing_percentage_entrants:1, average_score_entrants:175, Probability:0.8, title: «Роздача друкованої продукції»`); що можна вважати рівноцінними. Але під час створення ребер мова Cypher вимагає виконання запити вибірки даних із параметрами вершин, наприклад поєднати вершини з іменами `PrintedAdvertising` та `TVAdvertising` можливо, виконавши запит:

`MATCH (n),(m) WHERE n.NameVertex=«PrintedAdvertising» AND m.NameVertex=«TVAdvertising» CREATE (a)-[r: Call_Probability{Probability:0.75}]->(n) RETURN type(m)`

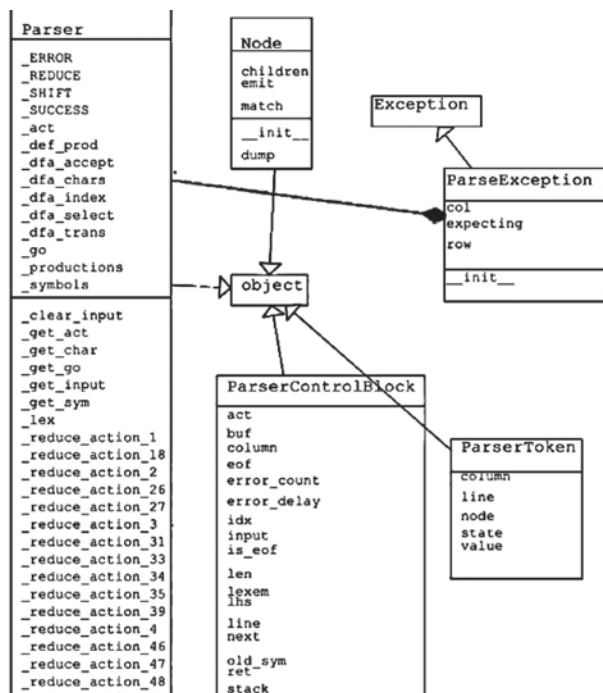


Рис. 3. Діаграма класів згенерованого аналізатора ПОМ

Аналогічний запит ПОМ виглядатиме так: `add edge Probability (PrintedAdvertising, TVAdvertising): Call_Probability:0.65`.

На базі ПОМ створено когнітивну карту вступної кампанії ЗВО. Фізично модель являє собою граф у БД Neo4j, де кожна вершина виступає ймовірною подією у вступній кампанії, а кожне ребро відображає ймовірність виклику однієї події іншою (рис. 4).

Обсяг коду запити ПОМ менше, ніж Cypher, що гарантує зменшення часу, необхідного на написання коду та зменшення ймовірності припуститися помилки під час створення запити [19].

Інтерфейс для відображення згенерованих сценаріїв являє собою таблицю, у комірках якої зберігаються оцінки відносної ймовірності та назви

ймовірних подій. Кожен рядок цієї таблиці являє собою опис окремого сценарію разом із його характеристиками, наприклад відображення фактичної кількості годин викладачів, витрачених на реалізацію сценарію, та ймовірність сценарію (рис. 5).

Відображення окремого сценарію включно з усіма характеристиками ймовірних подій вступної кампанії, що входять до цього сценарію, вимагає використання додаткових засобів. Таким засобом є бібліотека graphviz. Вона підтримує реалізацію

однойменної мови розмітки для відображення графів. Використавши цю бібліотеку, можливо відобразити не лише загальну структуру графу, а й властивості його вершин (рис. 6).

Отже, у запропонованому варіанті передбачення враховано 22 ймовірні події та 85 взаємозв'язків між подіями, що можуть вплинути на проведення вступної кампанії ЗВО. Використавши генерацію на основі створеної когнітивної моделі оператором:



Рис. 4. Відображення графу засобами Neo4j

| Scenario view |                    |             |  |
|---------------|--------------------|-------------|--|
| Scenario      |                    |             |  |
|               | summ(actual_hours) | Probability | Event  |
| 19            | 150                | 0.0090      | Участь викладачів ЗВО у шкільних олімпіадах    |
| 20            | 200                | 0.0090      | Відвідування шкіл                              |
| 21            | 138                | 0.0090      | Розміщення реклами на телебаченні              |
| 22            | 24                 | 0.0010      | Рекомендації приймальної комісії               |
| 23            | 18                 | 0.0900      | Покращення умов навчання (ремонт, оновлення ма |
| 24            | 44                 | 0.0010      | Участь викладачів ЗВО у шкільних олімпіадах    |
| 25            | 32                 | 0.0090      | Роздача друкованої продукції                   |
| 26            | 54                 | 0.0001      | Відвідування технікумів                        |
| 27            | 64                 | 0.0001      | Відвідування технікумів                        |
| 28            | 94                 | 0.0010      | Вілвілвання шкіл                               |

Export to excel

Рис. 5. Інтерфейс користувача для відображення множини згенерованих сценаріїв

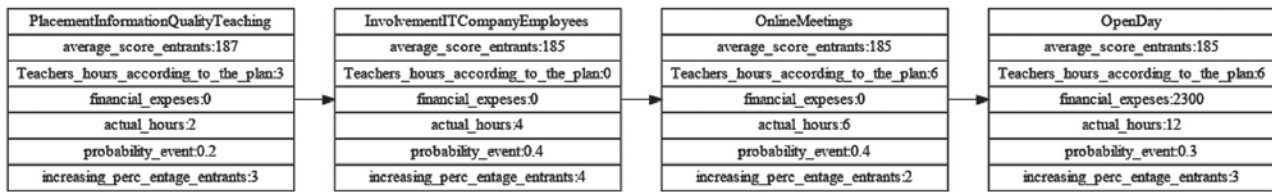


Рис. 6. Відображення вузлів із характеристиками

*GetAllScenario(Begin,End):*  $summ(actual\_hours)$ ,

де *Begin* – подія початку (Start of career guidance work), *End* – подія завершення сценарію (End of career guidance work). *Summ ()* функція, що сумує певний показник подій у сценарії, фактична кількість годин, що затрачені викладачами на певну подію, у результаті на основі когнітивної моделі отримуємо 2 315 можливих сценаріїв вступної кампанії.

**Висновки.** Проведено дослідження методів передбачення. Застосовано передбачення на основі сценарного аналізу для визначення всіх

імовірних шляхів проведення даного процесу. Розроблено інформаційну систему для реалізації методів експертних оцінок. Реалізовано предметно орієнтовану мову програмування для побудови когнітивної карти у середовищі Neo4j. Застосовано метод генерації сценаріїв на основі перебору дуг графу когнітивної карти. Згенеровано 2 315 сценаріїв вступної кампанії ЗВО за допомогою розробленої системи.

У подальшому планується інтеграція до розробленої системи підсистеми багатокритеріальної оптимізації, що дасть змогу спростити процес вибору на основі кількох критеріїв.

#### Список літератури:

1. Грабовецький Б.Є. Методи експертних оцінок: теорія, методологія, напрямки використання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2010. С. 171.
2. Згуровський М.З. Сценарний аналіз як системна методологія предвидення. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2002. № 1. С. 7–38.
3. Лебідь О.Ю. Деякі аспекти застосування когнітивного моделювання в державному управлінні. *Державне управління: удосконалення та розвиток*. 2015. № 11. URL: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=922>.
4. Ляліна Н.С., Бобро М.К. Сценарне прогнозування як інструмент антикризового управління в умовах економічної нестабільності. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2018. №. 23. С. 263–268.
5. Гожий А.П., Коваленко І.І. Системные технологии генерации и анализа сценариев. *Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи*. 2005. №. 2. С. 89–96.
6. Найдюш А.В., Лебедєв В.О., Спирінцев Д.В. Досвід організації профорієнтаційної роботи кафедри. *Вступна кампанія до закладів вищої освіти України: проблеми та перспективи* : зб. тез доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Київ, 13 травня 2019 р. Київ, 2019. С. 10–13
7. Гаріна С.М., Тверезовська Н.Т. Дослідження зв'язку між частотою пошукових запитів цільової аудиторії та кількістю абітурієнтів закладів вищої освіти. *Фізико-математична освіта*. 2018. №. 4. С. 31–36.
8. Гаріна С.М., Тверезовська Н.Т. Online складова в профорієнтаційній роботі закладу вищої освіти. *Гуманітарні студії: педагогіка, психологія, філософія*. 2019. Т. 2. № 10. С. 10–25.
9. Трахтенгерц Э.А. Компьютерная поддержка принятия решений. Москва : Синтез, 1998. 376 с.
10. Koziorowska A. Use of the brainstorm method in the innovation laboratory (i-lab). *Edukacja – Technika – Informatyka*. 2016.
11. Duin P. van der. Foresight in organizations: Methods and tools: *Foresight in Organizations: Methods and Tools*. 2016. 268 p.
12. Ab Latif R., Mohamed R., Dahlan, A. Using Delphi Technique: Making Sense of Consensus in Concept Mapping Structure and Multiple Choice Questions (MCQ). *Education in Medicine Journal*. 2016. Vol. 8. № 3. P. 89–98.
13. Zartha Sossa J.W., Halal W., Hernandez Zarta R. Delphi method: analysis of rounds, stakeholder and statistical indicators. *Foresight*. 2019. Vol. 21. № 5. P. 525–544.
14. Максимов В.И., Корноушенко Е.К., Качаев С.В. Когнитивные технологии для поддержки принятия управленческих решений *Информационное общество*. 1999. №. 2. С. 50–54.
15. Авдеева З.К., Коврига С.В., Макаренко Д.И. Когнитивное моделирование для решения задач управления слабоструктурированными системами (ситуациями). *Управление большими системами*. 2007. Т. 16. С. 26–39.

16. Батрак Ю.А. Элементы дискретной математики: пособие для самостоятельной работы. Николаев, 2011. 427 с.
17. Прохоров Г.В., Леденев М.А., Колбеев В.В. Пакет символьных вычислений Maple V. Москва : Петит, 1997. 200 с.
18. Андрейчиков А.В., Андрейчикова О.Н. Интеллектуальные информационные системы : учебник для вузов. Москва : Финансы и статистика, 2004. 464 с.
19. Кирьянов Д.В. Mathcad 15/Mathcad Prime 1.0. Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2012. 432 с.
20. Документація Matlab: graph. URL: <https://uk.mathworks.com/help/matlab/ref/graph.html> (дата звернення: 26.02.2021).
21. Robinson, I., Webber, J., Eifrem, E. Graph Databases. New opportunities for connected data: Joe Celko's Complete Guide to NoSQL. Sebastopol, Californ: O'Reilly Media, 2015. 238 p.
22. Fowler M. Domain-Specific Languages. Boston: Addison-Wesley Professional, 2010. 640 p.
23. Фісун М.Т., Кандиба І.О. Використання програмної системи ANTLR для створення мови реляційної алгебри: *Одинадцята міжнародна науково-практична конференція ІОИ-2018* : зб. тез доп. наук.-практ. конф., м. Вінниця 22–25 травня 2018 р. Вінниця : ВНТУ, 2018. С. 287–288.
24. Aho A., Lam M., Sethi R. Compilers: Principles, Techniques, and Tools: Boston: Addison Wesley, 2006. 1040 p.
25. Meyer, J.M. UniCC: A universal LALR(1) Parser Generator. Dortmund: Phorward Software Technologies, 2018. 163 p.
26. Коваленко І.І., Швед А.В., Антипова К.О. Моделі подання та виведення знань у системах ситуаційного управління. Миколаїв : Іліон, 2018. 92 с.

**Kandyba I.O., Fisun M.T., Horban H.V., Antipova K.O. GENERATION OF SCENARIOS FOR THE INTRODUCTORY CAMPAIGN OF A HIGHER EDUCATION INSTITUTION BASED ON A COGNITIVE MAP AND A DOMAIN-SPECIFIC LANGUAGE**

*In the article foresight methods based on expert evaluation are investigated. Modern research in the field of forecasting and prognostication the admission campaign of a higher education institution (IHE), methods of improving the efficiency of the use of certain resources during the admission campaign are analyzed. An algorithm for the implementation of methods for predicting the introductory campaign of the IHE on the basis of scenario analysis is proposed. Methods of scenario generation based on the subject area model are analyzed. The implementation of an information system for collecting expert assessments by applying the methods of brainstorming and Delphi are presented. A study of mathematical modeling tools that support the ability to work with graph structures is produced. A subject-oriented (domain-specific) programming language (DSL) has been developed that implements the functions of mathematical modeling tools based on the graph's database Neo4j. An algorithm for the development of this DSL using automated parser generators is presented. An expert assessment of the probable events of the introductory campaign was conducted by means of the presented information system. Based on the experts' assessments, a cognitive map of the university's admission campaign is constructed, where the vertices represent probable events, and the edges reflect the probability of calling one certain event to another. Describes Methods of storing and processing a cognitive map in Neo4j with using DSL are described. The method of generating a set of scenarios based on a cognitive map by implementing a specialized operator of subject-oriented language (DSL) is applied. The probability tree methodology is used to determine the probability of each generated scenario. An interface for viewing generated scenario using graphviz markup language has been developed. A set of scenarios was generated to predict the introductory campaign of the IHE.*

**Key words:** foresight, scenario analysis, cognitive map, graph database, domain-specific language.



**Лазебний В.М.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України**МОДЕЛЮВАННЯ МЕХАНІЧНИХ ДЕТАЛЕЙ ЗА ДОПОМОГОЮ  
AUTOCAD І SOLIDWORKS ДЛЯ ДРУКУ НА 3D-ПРИНТЕРАХ**

*Статтю присвячено дослідженню принципів моделювання механічних деталей за допомогою AutoCAD і SolidWorks для друку на 3D-принтерах. Наведено генезис 3D-друку та визначено пріоритетні напрями розвитку. Запропоновано функціональну схему 3D-принтера з виділенням головних компонентів та представленням зв'язків. Зазначається, що 3D-моделі створюються методом ручного комп'ютерного графічного дизайну або за рахунок 3D-сканування, описано принцип реалізації цих методів та їхні особливості. Підкреслено, що програми для створення моделей для друку на 3D-принтері доволі поширені у промисловому виробництві, до найбільш затребуваних віднесено SolidWorks та AutoCAD. Наведено опис кожної програми та запропоновано фундаментальні особливості застосування. У табличному вигляді представлено окремо недоліки та переваги програм SolidWorks та AutoCAD, здійснено їх порівняльний аналіз. Наголошено, що основні відмінності Solidworks від AutoCAD полягають у тому, що AutoCAD краще підходить для 2D-креслень і непараметричного проектування, тоді як Solidworks найкраще підходить для 3D-проектуювання і параметричного проектування; AutoCAD більш гнучкий як для 2D, так і для 3D CAD, тоді як Solidworks краще підходить для спеціалізованого 3D-рендеринга. Сформовано механізм проектування механічних 3D-деталей та відокремлено напрями руху під час моделювання. Підкреслено, що тоді як багато інструментів для 3D-друку засновані на форматах моделювання сітки, моделі SolidWorks засновані на поверхнях NURBS, вони складаються з математично певних кривих, які називаються неоднорідними сплайнами раціональної підстави. Зазначено, що у цьому разі криві складаються з набору контрольних точок поряд із вектором, а зберігання тривимірних даних у вигляді математичного опису значно зменшує розмір файлу порівняно з моделями сітки, що є перевагою моделювання у SolidWorks.*

**Ключові слова:** моделювання, механічна деталь, AutoCAD, SolidWorks, друк, 3D-принтер.

**Постановка проблеми.** Розвиток ІТ-архітектури відображає еволюцію всього технічного прогресу. Відлік ери ІТ-архітектур починається в 1950-х роках із появою перших мейнфреймів (відмовостійких серверів), розквіт яких припав на середину 60-х років, саме із цього часу 3D САПР-проектуювання дає змогу виробникам зберігати проекти у цифровому вигляді й оптимізувати робочі процеси.

В умовах цифрового прогресу, що швидко розвивається, великі корпорації прийняли технічні рішення для проектування, такі як AutoCAD, Intergraph і Unigraphics у 1980-х роках, а вже в 1990-х вони створили інноваційні пропозиції, такі як SolidEdge, Inventor, CATIA і SolidWorks. Це фундаментально нове покоління інструментів використовує можливості графічного призначеного для користувача інтерфейсу і більш просунуті сплайнові методи обробки поверхонь, що є технічно значущим під час моделювання механічних деталей.

Патент на технологію стереолітографії був оформлений у 1986 р. Чарльзом Халом, саме в

основі 3D-принтера лежить ця технологія. Принтер являв собою досить габаритну промислову установку, виробництвом на якому служив заздалегідь змодельований на комп'ютері цифровий макет (3D-модель) [1].

Поява 3D-друку і цифрового прототипування дала поштовх для розширення ринку інструментів для проектування, збільшення виробничих масштабів, зниження коефіцієнта ручної праці, підвищення якості продукції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На теренах новітньої наукової парадигми особливий інтерес викликають вітчизняні та зарубіжні дослідження 3D-моделювання.

Вивченню 3D-друку і цифрового прототипування присвячено праці В.В. Чаговець, О.В. Соловйової, І.О. Водяницького, О.О. Дерези, В.В. Проців, К.А. Зіборова, О.М. Твердохліба та ін.

Так, В.В. Чаговець [2] дослідив перспективи розвитку FabLab в Україні. О.В. Соловйова [3] у статті, присвяченій виявленню історичних фактів виникнення технології 3D-друку, наголошувала

на необхідності впровадження новітніх технологій у процес навчання.

Моделювання механічних деталей дослідили й І.О. Водяницький та О.О. Дереза [4]. Авторами підкреслено, що 3D-моделювання широко застосовується у такій галузі промисловості, як машинобудування. За допомогою такої сучасної технології, як тривимірне моделювання, розробники можуть отримувати максимально реалістичні зображення тих деталей і вузлів, які вони проєктують. 3D-моделювання дає змогу успішно проводити візуалізацію тих об'єктів, які ще не існують, а знаходяться поки на стадії конструювання.

Учені В.В. Проців, К.А. Зіборов, О.М. Твердохліб [5] розкрили принципи проєктування редукторів із використанням САПР КОМПАС.

Внесок А.Е. Михайлової та А.Д. Дошина [6] у вивчення 3D-друку і цифрового прототипування полягає насамперед в описі історії виникнення, основних принципів і технологій роботи пристрою, проведенні дослідження застосування 3D-принтера, висвітлюванні проблем і перспектив використання представленої технології у різних сферах життя.

Д.Р. Кузяев [7] у роботі «Вибір та аналіз середовища розробки 3D-моделей» провів огляд найбільш розповсюджених систем ANSYS, КОМПАС 3D, Autodesk Inventor та SolidWorks, у результаті якого виявив їхні переваги та недоліки. Таким чином, автором вибрано для подальших розробок застосування системи SolidWorks.

О.О. Дереза, С.М. Коломієць та С.В. Дереза [8] розглянули питання застосування комп'ютерних програм для тривимірного моделювання, здійснивши огляд сучасних програм для 3D-моделювання та висвітлили переваги та недоліки кожної з розглянутих програм.

Із зарубіжних робіт із порушеної теми дослідження варто відзначити праці таких учених, як: I. Gibson, D. Rosen, B. Stucker [9], G.A. Longhitano, M.A. Larosa, A.L.J. Munhoza, C.A. Carvalho Zavagliaa [10], J.F. Kelly [11], H. Larson, M. Kurman [12], С. McMahon [13], K. Sheppard [14], K. Hausman [15], С. Barnatt [16], В. Evans [17] тощо.

Однак, незважаючи на всю масштабність наявних наукових розвідок за темою дослідження, все ж питання всебічного вивчення принципів моделювання механічних деталей за допомогою AutoCAD і SolidWorks для друку на 3D-принтерах залишається відкритим та потребує детального опрацювання та аналізу.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у розкритті принципів моделювання

механічних деталей за допомогою AutoCAD і SolidWorks для друку на 3D-принтерах. Поставлена мета передбачає необхідність розв'язання таких завдань:

- з'ясувати зміст поняття та принципів 3D-моделювання за допомогою AutoCAD і SolidWorks;

- навести функціональну схему 3D-принтера;
- запропонувати принципи моделювання механічних деталей за допомогою AutoCAD і SolidWorks для друку на 3D-принтерах;

- окреслити переваги та недоліки 3D-друку із застосуванням моделей механічних деталей, виготовлених за допомогою AutoCAD і SolidWorks.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Однією з найбільш поширених технологій швидкого прототипування, що дає змогу автоматизувати створення натурних макетів, є екструзійна технологія 3D-друку, яка заснована на методі пошарового формування об'ємних деталей струменем розплавленого пластику, що видавлюється. 3D-принтер фактично є верстатом із числовим програмним управлінням, у якого замість фрези або різця є екструдер. Функціональну схему 3D-принтера наведено на рис. 1.

Варто зазначити, що програмування принтера проводиться на індустріальній мові G-code, яка підтримується більшістю обробних центрів. 3D-моделі створюються методом ручного комп'ютерного графічного дизайну або за рахунок 3D-сканування. Ручне моделювання, інакше – підготовка геометричних даних для створення тривимірної комп'ютерної графіки, нагадує скульптування, а 3D-сканування – це автоматичний збір і аналіз даних реального об'єкта, його форми, кольору та інших характеристик із подальшим перетворенням на цифрову тривимірну модель. І ручне, і автоматичне створення 3D-друкованих моделей може викликати труднощі у середнього користувача. У зв'язку із цим в останні роки набули поширення 3D-друковані торгові майданчики [9].

Моделі для 3D-принтерів створюють переважно фахівці, і займає цей процес набагато більше часу, ніж сканування. Однак уже сьогодні у зв'язку з бурхливим розвитком комунікацій шаблони стали доступні кожному. Тривимірне зображення оригіналу можна отримати також за допомогою звичайної фотографії з подальшою конвертацією в 3D. Окрім того, останнім часом на ринку з'являється все більше 3D-сканерів, включаючи портативні ручні варіанти, здатні знімати зображення великогабаритних об'єктів [3; 8; 9].

Тривимірний метод пошарового створення фізичної моделі подібний до основного висхідного методу в нанотехнології – «знизу – вгору» [10].

Що стосується виробництва механічних деталей із використанням 3D-принтерів, то воно є адитивним, маючи на увазі будівництво механічних деталей за рахунок додавання, нанесення послідовних шарів необхідного матеріалу, а не видалення зайвого, як у випадку із субтрактивними методами. Моделі, виготовлені адитивним методом, можуть застосовуватися на будь-якому виробничому етапі, для виготовлення як дослідних зразків (швидке прототипування), так і самих готових виробів (швидке виробництво).

Слід відзначити, що програми для створення моделей для друку на 3D-принтері доволі поширені у промисловому виробництві, до найбільш затребуваних варто віднести SolidWorks та AutoCAD.

SolidWorks – одне з найбільш універсальних середовищ моделювання, яке об'єднує функції редагування сітки поряд із наборами інструментів для моделювання поверхонь і 3D-об'єктів. Про-

грамне забезпечення надає велике робоче середовище, яке незамінне в сучасному 3D-дизайні.

Зауважимо, що тривимірна геометрія в SolidWorks побудована з ескізів, які найчастіше є двовимірними і намальовані на площинах. Ескізи можуть стати тривимірними кривими за використання команд «Підігнати сплайн», «Сплайн на поверхні» або «3D-ескіз». Кожен ескіз містить розміри, що визначають креслення й обмеження, котрі описують ставлення елементів ескізу один до одного або до інших елементів тривимірної моделі. Наприклад, лінія може проходити паралельно, збігатися або бути перпендикулярно іншому парному елементу.

SolidWorks пропонує інструментарій поверхневих і твердих операцій, які створюють елементи механічних деталей. Структурування операцій моделювання якнайкраще відображає кінцеву мету проєкту.

Основні відмінності Solidworks від AutoCAD полягають у тому, що AutoCAD краще підходить для 2D-креслень і непараметричного проєктування, тоді як Solidworks найкраще підходить для

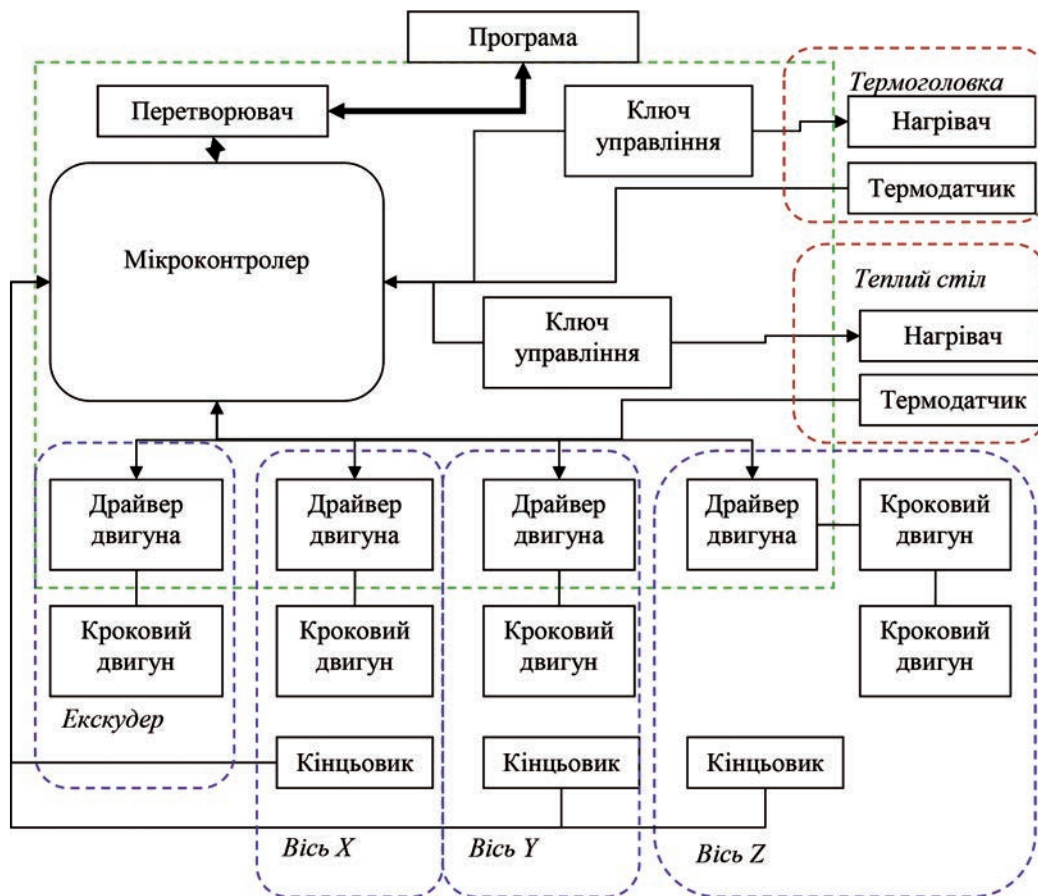


Рис. 1. Функціональна схема сучасного 3D-принтера

3D-проектування і параметричного проектування; AutoCAD більш гнучкий як для 2D, так і для 3D CAD, тоді як Solidworks краще підходить для спеціалізованого 3D-рендеринга.

Оскільки AutoCAD LT є золотим стандартом для промислових САПР, він може гнучко адаптуватися до 2D- або 3D-проектів, використовуючи локальні мережеві диски, якщо швидкість підключення обмежена. Більшість адитивних виробництв використовують AutoCAD.

AutoCAD спочатку використовувався як спосіб моделювання 2D-геометрії і розвинувся, щоб включити різні варіанти 3D-моделювання, як-от тверді тіла, поверхні і сітки. Багато практиків, як і раніше, використовують його переважно для 2D-креслень і 2D-креслення (2D CAD), але його можливості роблять його відмінним рішенням для моделювання проектів 3D-друку. Є можливість повернути об'єкт у тривимірному просторі, щоб дивитися на нього з будь-якої точки огляду, що робить його дуже корисним для функціональної візуалізації всього об'єкта.

Варто констатувати, що AutoCAD перетворився на групу програм, адаптованих до галузей, із різними настройками призначеного для користувача інтерфейсу. Наприклад, в AutoCAD Architecture попередньо завантажені деталі, загальні для проектування будівельних виробів, такі як двері і вікна; AutoCAD Electrical надає доступ до бібліотеки часто використовуваних символів електротехніки. AutoCAD Mechanical дає змогу створювати і змінювати механічні конструкції або AutoCAD MEP, який є варіантом, який дозволяє 3D-моделювання механічних, електричних і сантехнічних конструкцій для будівництва в програмі САПР.

Переваги та недоліки 3D-друку з AutoCAD наведено в табл. 1.

SolidWorks – це програмне забезпечення для автоматизованого креслення, яке було розроблено в 1995 р. засновником SolidWorks Corporation.

SolidWorks максимально підходить для 3D-моделювання за рахунок набору функцій для 3D-моделювання.

Відзначимо, що SolidWorks використовується в різних галузях промисловості, таких як автомобільна й аерокосмічна техніка, будівництво, нафта і газ, альтернативна енергія та робототехніка. SolidWorks був розроблений у напрямі, протилежному AutoCAD; спочатку створений як програмне забезпечення для 3D-моделювання (програмне забезпечення САПР), він також був доданий у компоненти 2D-креслення. Фундаментальною основою під час роботи з SolidWorks є 2D-креслення як перший крок та подальша орієнтація на 3D, що робить його максимально відповідним роботі багатьох 3D-принтерів.

Переваги та недоліки 3D-друку з SolidWorks наведено в табл. 2.

Тоді як багато інструментів для 3D-друку засновані на форматах моделювання сітки, моделі SolidWorks засновані на поверхнях NURBS. Вони складаються з математично певних кривих, які називаються неоднорідними сплайнами раціональної підстави. Тут криві складаються з набору контрольних точок поряд із вектором.

Потім створюється поверхня шляхом інтерполяції між різними кривими за допомогою операцій loft, sweep і border. Це дає змогу додати поверхням такий напрям, як дотичність і безперервність кривизни, і дає точні визначення для великої різно-

Таблиця 1

**Переваги та недоліки 3D-друку з AutoCAD**

| № | Переваги  | Недоліки  |
|---|---|---|
| 1 | Повноцінне професійне програмне забезпечення із величезною кількістю опцій і функцій                            | Спочатку розроблявся для 2D-дизайну, який нині має перевагу у використанні  |
| 2 | Новатор у сфері комп'ютерного креслення, який від самого початку був галузевим стандартом                       | Щорічна абонентська плата перевищує 1 000 доларів США за умови комерційного використання  |
| 3 | Спеціальна команда 3D-друку (3DPRINT) з 2015 р.   | Потребує окремого навчання, найкраще підходить для тих, хто вже знайомий із принципами креслення і хоче додати компонент для 3D-друку або 3D-деталь |
| 4 | Широкий діапазон форматів між зберіганням файлів та їх спільним використанням в іншому програмному забезпеченні | -   |
| 5 | Без абонентської плати, якщо є право на освітню ліцензію  | -   |
| 6 | Мобільний додаток і хмарне сховище та спільне використання для широкого спектра можливостей доступу             | -   |

## Переваги та недоліки 3D-друку з SolidWorks

| №  | Переваги  | Недоліки   |
|----|---|--|
| 1  | Параметричне моделювання на основі елементів робить проєктування (і процес проєктування) в 3D інтуїтивно зрозумілим | Сумісний тільки з операційними системами Windows   |
| 2  | Оплата ліцензії одноразова  | Щорічна плата за обслуговування, яка приблизно дорівнює ціні однієї річної передплати AutoCAD, понад одноразової плати за ліцензію |
| 3  | Знижка на студентське видання   | Обмежені можливості 2D   |
| 4  | Різні варіанти моделювання дають змогу протестувати дизайн перед його друком  | -  |
| 5  | Побудований на основі 3D-моделювання  | -  |
| 6  | Включає інструменти проєктування листового металу   | -  |
| 7  | Можливості хмарного зберігання та обміну 3DEXPERIENCE   | -  |
| 8  | Використовується у самих різних галузях машинобудування, тому є визнаним стандартом                                 | -  |
| 9  | Інтегрований САМ  | -  |
| 10 | Стандартизовані формати файлів роблять його сумісним з іншими програмами САПР                                       | -  |
| 11 | Остання версія дає змогу малювати від руки на мобільних пристроях   | -  |
| 12 | Остання версія об'єднує САМ і інструменти вивчення топології  | -  |

манітності складних моделей. Перевага полягає у тому, що зберігання тривимірних даних у вигляді математичного опису значно зменшує розмір файлу порівняно з моделями сітки.

Математична точка не займає місця, і оскільки сплайн заснований на точках, а поверхня NURBS заснована на сплайнах, поверхні NURBS є абстрактними формами без обсягу. Для друку на принтері фактичного 3D-об'єкта всі поверхні тіла повинні бути перетворені на тверді тіла. Потім тверде тіло перетворюється на формат сітки. Нині SolidWorks пропонує три формати сітки, придатні для 3D-друку: STL (STereoLithography), AMF (додатковий формат виробництва на основі XML) і 3MF (3D-формат виробництва, власний 3D-формат для Microsoft Windows).

**Висновки.** Під час моделювання механічних деталей та подальшого їх друку на 3D-принтері роль людського фактора зведено майже до нуля, кожен готовий виріб у точності буде повторювати особливості оригінала. З огляду на таку тенденцію, можливо, у найближчий час 3D-принтери стануть обов'язковим атрибутом на сучасному промисловому виробництві. Технологію масового впровадження тривимірного друку можна назвати черговою технічною революцією. У поєднанні зі своїми можливостями вона здатна кардинально змінити світ.

Перспектива подальших досліджень ґрунтується на розробленні моделі автоматизованого формування механічної деталі з використанням SolidWorks та подальшим друком за допомогою 3D-принтера.

## Список літератури:

1. История 3D-печати. URL: <https://3dmf.ru/wiki/istoriya-3d-pechati.html> (дата звернення: 15.04.2021).
2. Чаговец В.В. Перспективи розвитку FabLab в Україні. *Новітні комп'ютерні технології*. Кривий Ріг : Криворізький національний університет, 2016. Т. XIV. С. 120–121.
3. Соловійова О.В. Технології 3D-друку. *Державний університет інфраструктури та технологій*. URL: [http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/195097/pdf\\_25](http://ageg.knuba.edu.ua/article/view/195097/pdf_25) (дата звернення: 15.04.2021).
4. Водяницький І.О., Дереза О.О. Моделювання механічних передач. *Технічне забезпечення інноваційних технологій в агропромисловому комплексі* : матеріали І Міжнар. наук.-практ. Інтернет-конференції, м. Мелітополь, 01–24 квітня 2020 р. / ред. кол. В.М. Кюрчев та ін. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 83–87.
5. Проців В.В., Зіборов К.А., Твердохліб О.М. Проєктування редукторів із використанням САПР КОМПАС. Національний гірничий університет, 2011. 178 с.

6. Михайлова А.Е., Дошин А.Д. 3D-принтер – технологія майбутнього. *Молодий вчений*. 2015. № 20. С. 40–44.
7. Кузяєв Д.Р. Вибір та аналіз середовища розробки 3D-моделей. URL: [https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/14157/3/Sbornik\\_%D0%90DED\\_2019\\_2\\_Kuzaev.pdf](https://openarchive.nure.ua/bitstream/document/14157/3/Sbornik_%D0%90DED_2019_2_Kuzaev.pdf) (дата звернення: 15.04.2021).
8. Дереза О.О., Коломієць С.М., Дереза С.В. Тривимірне моделювання деталей машин в машинобудуванні. *Сучасні наукові дослідження на шляху до євроінтеграції*: матеріали міжнародного науково-практичного форуму, м. Мелітополь, 21–22 червня 2019 р. Мелітополь: ФОП Однорог Т.В., 2019. Ч. 2. С. 29–31.
9. Gibson I., Rosen D., Stucker B. *Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing*. 2nd ed. Springer; 2015: 498 p. DOI: 10.1007/978-1-4939-2113-3.
10. Longhitano G.A., Larosa M.A., Munhoza A.L.J., Carvalho Zavagliaa C.A., Ierardia M.C.F. Surface finishes for Ti-6Al-4V alloy produced by direct metal laser sintering. *Materials Research*. 2015. Vol. 18(4). P. 838–842.
11. Kelly J.F. *3D-Printing: Build Your Own 3D-Printer and Print Your Own 3D-Objects*. Que Publishing. 2013. 192 p.
12. Larson H., Kurman M. *Fabricated: The New World of 3D-Printing*. Wiley. 2013. 280 p.
13. McMahon C. *3D-Printing: Second Edition/Imagine Publishing Ltd*. 2013. 116 p.
14. Sheppard K. *3D-Printing – Unabridged Guide/Tebbo*. 2012. 174 p.
15. Hausman K. *3D-Printing For Dummies / For Dummies*. 2014. 384 p.
16. Barnatt C. *3D-Printing: Second Edition / CreateSpace Independent Publishing Platform*. 2014. 306 p.
17. Evans B. *Practical 3D-Printers: The Science and Art of 3DPrinting/ Evans B. Apress*. 2013. 332 p.

#### **Lazebnyi V.M. DESIGN OF MECHANICAL DETAILS WITH AUTOCAD AND SOLIDWORKS FOR 3D PRINTING**

*The article is devoted to the study of the principles of modeling mechanical parts using AutoCAD and SolidWorks for printing on 3D printers. The genesis of 3D printing is given and the priority directions of development are determined. The functional diagram of the 3D printer with the selection of the main components and the representation of the connections is offered. It is noted that 3D-models are created by the method of manual computer graphic design or by 3D-scanning, the principle of implementation of these methods and their features are described. It is emphasized that programs for creating models for printing on a 3D printer are quite common in industrial production, the most popular are SolidWorks and AutoCAD. The description of each program is given and the fundamental features of application are offered. The table shows the disadvantages and advantages of SolidWorks and AutoCAD separately, and comparatively analyzes them. It is emphasized that the main differences between Solidworks and AutoCAD are that AutoCAD is better suited for 2D drawings and non-parametric design, while Solidworks is best suited for 3D design and parametric design; AutoCAD is more flexible for both 2D and 3D CAD, while Solidworks is better suited for specialized 3D rendering. The mechanism of designing mechanical 3D parts is formed and the directions of movement at modeling are separated. It is emphasized that while many 3D printing tools are based on grid modeling formats, SolidWorks models are based on NURBS surfaces, they consist of mathematically defined curves called inhomogeneous splines of a rational basis, it is noted that in this case the curves consist of a set control points next to the vector, and storing three-dimensional data as a mathematical description significantly reduces file size compared to grid models, which is an advantage of simulation in SolidWorks.*

**Key words:** modeling, mechanical part, AutoCAD, SolidWorks, printing, 3D printer.

**Лежнін К.В.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ЗАСТОСУВАННЯ УЛЬТРАЗВУКУ ПІД ЧАС МЕХАНІЧНОЇ ОБРОБКИ КРИХКИХ МАТЕРІАЛІВ

У статті проаналізовано вплив застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. Розкрито характеристики крихких матеріалів, включаючи їх високу термостійкість, низьку швидкість зносу та малу вагу порівняно з металами. Наведено проблематику обробки крихких матеріалів. Розкрито алгоритм обробки крихких матеріалів ультразвуком, зазначено, що під час механічної обробки матеріалів ультразвуком крихкий матеріал виколоється з виробу ударами зерен більш твердого абразиву, які направляються торцем робочого інструменту, а кавітаційні процеси в рідкій абразивній суспензії забезпечують винесення матеріалу і подачу свіжої суспензії. За такої технології у виробі, що підлягає обробці, формуються порожнини, які копіюють форму робочого інструмента. Наголошено, що вплив ультразвуку на крихкі матеріали дає змогу змінювати їхні властивості та структуру. Досліджено ефект свердління карбиду кремнію за допомогою різних методів обробки, до яких віднесено: звичайне свердління, осьово-спрямоване свердління з ультразвуком, кавітаційне свердління та гібридне свердління, що включає у себе осьово-спрямоване свердління з ультразвуком та кавітаційне свердління. Запропоновано схему ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів. Підкреслено, що продуктивність процесу залежить від багатьох чинників, переважно від механічних параметрів оброблюваного матеріалу, що характеризується критерієм крихкості. Проаналізовано використання ультразвукових коливань у процесі механічної обробки на базі ріжучої рідини. Зазначено негативні та позитивні боки використання ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів та визначено напрями зниження негативних чинників свердління за допомогою ультразвуку в осьовому напрямі.

**Ключові слова:** вплив, ультразвук, механічна обробка, крихкі матеріали, обладнання, інструмент, кромка, свердління.

**Постановка проблеми.** Останнім часом використання крихких матеріалів поширилося в таких галузях промисловості, як аерокосмічна, автомобільна, оптична та напівпровідникова промисловість, через їхні особливі властивості. Характеристики крихких матеріалів, включаючи їх високу термостійкість, низьку швидкість зносу та малу вагу порівняно з металами [1], є цінними у виробництві прецизійного механічного обладнання. Однак механічна обробка крихких матеріалів усе ще залишається великою проблемою через підвищений ризик руйнування, незважаючи на великі розробки інструментів та ріжучих матеріалів [2]. Сьогодні попит на мікрообробку зріс через мініатюризацію механічних, електричних та оптичних компонентів. А дія ультразвуку під час механічної обробки дає змогу реалізовувати технологічні процеси, які не реалізовані або важко реалізовані, традиційними методами обробки. Під час механічної обробки матеріалів ультразвуком крихкий матеріал виколоється з виробу ударами зерен більш твердого абразиву, які направляються

торцем робочого інструменту, а кавітаційні процеси в рідкій абразивній суспензії забезпечують винесення матеріалу і подачу свіжої суспензії. За такої технології у виробі, що підлягає обробці, формуються порожнини, які копіюють форму робочого інструмента. Вплив ультразвуку на крихкі матеріали дає змогу змінювати їхні властивості та структуру. Звичайна механічна обробка крихких матеріалів забезпечує високі зусилля різання і, як правило, призводить до зносу інструменту та низької якості оброблюваної поверхні [3]. Зокрема, такі технології мікрообробки, як мікросвердління та процес мікрофрезерування, мають проблему низької жорсткості ріжучого інструменту. У результаті було проведено багато досліджень із використанням гібридних методів виготовлення, таких як ультразвукове вібраційне різання. Для обробки важкооброблюваних матеріалів метод ультразвукового вібраційного різання визнаний як ефективний із погляду сили різання, нестабільності різання, зносу інструменту, утворення стружки, якості обробки тощо [4].

Додаткове коливання всередині свердла спричиняє пилкоподібну траєкторію руху в кожній точці кромки інструменту. Таким чином, свердління за допомогою ультразвуку також можна розглядати як процедуру буріння, що передбачає використання високочастотних коливань [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання застосування ультразвуку під час механічної обробки деталей та матеріалів на протязі багатьох років досліджувало чимало вчених. О.П. Колосова, В.В. Ванін, О.Є. Колосов, В.І. Сівецький [2] розглянули широке коло питань, що стосуються моделювання технологічних параметрів базових процесів формування та конструктивних елементів формуючого технологічного ультразвукового обладнання, призначеного для приготування полімерних композицій та виготовлення високоміцних і бездефектних виробів із реактопластичних традиційних композитів у хімічній, машинобудівній та інших галузях промисловості. Авторами досліджено конструктивно-технологічні параметри формуючого ультразвукового обладнання у вигляді хвилеводів-концентраторів та складеного дозвального пристрою з прямокутною випромінюючою пластиною.

Точність вимірювання амплітуди ультразвукових механічних коливань вихрострумовим методом розкрив О.Ф. Закревський [3]. Автором проведено теоретичне дослідження впливу параметрів технологічного процесу виготовлення багатошарових друкованих плат, який застосовують для виготовлення вихрострумових сенсорів із властивістю самокалібрування у складі засобу вимірювання. Статтю [4] присвячено 3D-моделюванню напружено-деформованого стану процесу алмазного вигладжування за використання додаткового впливу механічних коливань (вібрацій). Виконано дослідження зі встановлення раціональних режимів обробки для вказаного комбінованого процесу вигладжування. Із використанням методу багатофакторного планування експерименту типу В4 встановлено математичну модель процесу. Л.П. Калафатова [5] визначила шляхи підвищення ефективності шліфування важкооброблюваних крихких неметалевих матеріалів з урахуванням їхніх фізико-механічних властивостей і структури. Для конкретних матеріалів встановлено пріоритетні технологічні способи позитивного впливу мастильно-охолоджуючих технологічних середовищ (МОТС) на процес різання. Авторкою встановлено, що дефектність сформованої поверхні під час обробки технічного скла, ситалів і кераміки залежить від рівня напружено-дефор-

мованого стану зони обробки, на який впливають МОТС із підвищеними диспергуючими властивостями. О.Б. Козлова, В.О. Заведєєв [6] розкрили методику підвищення якості поверхні методом безабразивної ультразвукової фінішної обробки. До питання застосування електровпливу для ефективного дроблення матеріалів в умовах металургійної обробки підійшли С.Г. Савельєв, В.В. Плотников та О.В. Бабаєвська [7]. У роботі розглянуто процеси, що відбуваються за методу спільного електрогідравлічного дроблення в'язкого, що не проводить струм, і крихкого провідних матеріалів. Установлено механізм руйнуючого впливу електрогідравлічного ефекту.

Із зарубіжних авторів варто відзначити роботи: Jingsi Wang, Jingguo Fu, Jinlong Wang, Fengming Du [8], Sandeep Kumar, Akshay Dvivedi [9], A. Esmailzare, A. Rahimi [10], Y. Wang, B. Lin, X.Y. Cao, S.L. Wang [11], D.X. Lv, H.X. Wang, Y.J. Tang, Y.H. Huang, Z.P. Li [12], C.L. Zhang, P.F. Feng, J.F. Zhang [13], J.H. Zhang, Y. Zhao, S. Zhang, F.Q. Tian, L.S. Guo, R.Z. Dai [14] та ін.

Проте, ураховуючи описані наукові набутки за темою, питання аналізу впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета дослідження полягає у проведенні аналізу впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. Поставлена мета передбачає необхідність розв'язання таких завдань: розкрити алгоритм впливу ультразвуку під час проведення механічної обробки крихких матеріалів; дослідити ефект свердління карбіду кремнію (SiC) за допомогою різних методів обробки; проаналізувати використання ультразвукових коливань у процесі механічної обробки на базі ріжучої рідини.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Ультразвуковими називаються пружні коливання матеріального середовища з частотою, що перевищує межу чутності (15–20 кГц). Ультразвукові коливання можуть поширюватися у рідких, твердих, газоподібних середовищах [15]. Тіло, що періодично змінює свої розміри, створює в оточуючому його середовищі періодичні процеси стиснення і розрядження, що поширюються по цьому середовищі. Тіло під час розширення стискає безпосередньо шар середовища, що примикає до нього, який, своєю чергою, передає це стиснення наступному прилеглому шару. Частинки середовища, пружно взаємодіючи, рухаються вздовж поширення стиснення. Стан стиснення проходить



через усе середовище. У наступний момент, коли тіло починає стискатися, стислі шари середовища отримують можливість розширюватися. Частинки середовища починають переміщатися у зворотний бік. Створювані в навколишньому середовищі пружні напруги стиснення і розрядження збуджують коливання частинок середовища біля положення рівноваги. Ці процеси стиснення і розрядження, що поширюються на всі боки, й є звуковими хвилями. Розрізняють три види ультразвукових хвиль: поздовжні, поперечні і поверхневі. У твердих тілах можуть поширюватися хвилі всіх трьох видів, у рідких і газоподібних – лише поздовжні хвилі розрядження – стискування. Якщо зміна обсягу тіла в часі відбувається за гармонійним законом, то і викликані їм ультразвукові коливання будуть гармонійними.

Поділ частинок у неоднорідних суспензіях можливий на підставі того, що в ультразвуковому полі змінний рух частинок, що володіють неоднаковою масою, різний і залежить від частоти коливального процесу. Зі збільшенням частоти коливаються тільки найбільш дрібні частинки, а відносно великі здійснюють рух по складних траєкторіях. Коагуляція полягає в утворенні з дрібних частинок більших. Під впливом ультразвуку і гідродинамічних сил тяжіння частинки б'ються одна об одну і укрупнюються, а потім осідають. Це явище використовують під час очищення димових газів. Унаслідок поглинання ультразвуку частинками коагуляція проводиться на низьких частотах. Дегазація полягає в укрупненні дрібних бульбашок газу, які утворюються під дією кавітації та внаслідок коливання і руху стикаються, об'єднуються й утворюють пухирці великих розмірів, які спливають.

Ультразвуковий тиск являє собою чергування стиснень і розрядження, причому амплітуда стиснення дорівнює амплітуді розрядження. На перешкоду, що знаходиться у полі звукової хвилі, звуковий тиск діє таким чином, що створює на поверхні цієї перешкоди силу, що змінює свій знак відповідно до частоти коливань звукової хвилі.

За впливу на заготовку з крихкого матеріалу інструментом, який має коливання з оптимальною для даної операції амплітудою й ультразвуковою частотою в середовищі, що складається з водної суспензії твердих абразивних частинок, і застосування до інструменту статичного зусилля відбувається копіювання форми перетину інструменту в заготовці і здійснюються операції свердління і вирізання.

Основним чинником, що визначає перебіг процесу, є виколування, мікрочастинок із поверхні

оброблюваної заготовки ударами абразивних зерен, які отримують значне прискорення від ударів торця інструменту, що коливається з ультразвуковою частотою. Продуктивність процесу залежить від багатьох факторів, переважно від механічних параметрів оброблюваного матеріалу, що характеризується критерієм крихкості. У рамках дослідження прийнято дослідити ефект свердління карбіду кремнію (SiC) за допомогою ультразвуку. SiC є ключовим матеріалом у напівпровідниковій промисловості, він твердий і крихкий одночасно. На рис. 1 показано схему ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів. Двокомпонентний датчик сили, який можна було використовувати для вимірювання крутного моменту різання та сили тяги, був установлений між заготовкою та столом механічної обробки.

Під час свердління SiC оцінювали синергетичні ефекти кавітації та осьово-спрямованої вібрації для вивчення зменшення сили тяги та збільшення терміну служби інструменту.



Рис. 1. Схема ультразвукової установки для проведення механічної обробки крихких матеріалів

Джерело: власна розробка автора на основі [8; 12]

Під час удару торця інструменту по абразивних зернах вершини зерен вдавлюються в поверхневі шари деталі та інструменту (рис. 2 а). Заглиблення частинок абразиву в інструмент призводить тільки до пластичних деформацій, і в поверхневому шарі оброблюваної деталі виникає сітка напруг (рис. 2 б). Під впливом напружень, створюваних наступними ударами торця інструменту, відбувається розширення мікротріщин

Таблиця 1

Умови різання

| № | Параметр                          | Значення                     |
|---|-----------------------------------|------------------------------|
| 1 | Ультразвук з осьовим спрямуванням | 70 кГц/3,5 мкм               |
| 2 | Кавітаційний пристрій             | 42,5 кГц/2-3 мкм             |
| 3 | Інструмент                        | Свердло з алмазним покриттям |
| 4 | Рідина ріжуча                     | Тип розчинний                |
| 5 | Швидкість обертання               | 8000 мм <sup>-1</sup>        |
| 6 | Швидкість подачі                  | 6,0 мм/хв                    |
| 7 | Ступінчаста швидкість подачі      | 0,01 мм                      |
| 8 | Глибина отвору                    | 1,0 мм                       |

і утворення нових. Виникає зона руйнування від ділення частинок у той момент, коли максимальні дотичні напруження в зоні вдавнення перевершують опір зрушенню. Несуча абразив вода розширює мікротріщини, полегшує утворення відколів, доставляє новий абразив у зону обробки, а також охолоджує інструмент та деталь.

Кількісною оцінкою доцільності ультразвукової обробки матеріалу є критерій крихкості:

$$t_x = \frac{\varepsilon_p}{\sigma_p},$$

де  $\varepsilon_p$  – опір матеріалів зрушення;  $\sigma_p$  – опір на відрив.

Головний рух під час розмірної ультразвукової обробки – коливання інструменту. Середня швидкість головного руху

$$V = \frac{4fA}{10^3}, \text{ м/с},$$

де  $A$  – амплітуда коливань;

$f$  – частота коливань інструменту.

Було проведено чотири типи бурових експериментів: звичайне свердління, осьово-спрямоване свердління з ультразвуком, кавітаційне свердління та гібридне свердління (осьово-спрямоване свердління з ультразвуком + кавітаційне свердління). Для кожного експерименту підраховували максимальну кількість отворів, просвердених без зміни інструменту. Умови різання зведено в табл. 1.

У цьому експерименті центральні отвори обробляли свердлом з алмазним центром перед випробуваннями на свердління. Процес свердління проводився за програмою ступінчастої подачі ЧПУ. А для спостереження за процесом різання використовували п'єзоелектричний двокомпонентний датчик сили (динамометр).

Таблиця 2

Максимальна кількість просвердених отворів

| № | Вид свердління                              | Кількість просвердених отворів |
|---|---|--------------------------------|
| 1 | Звичайне свердління                         | 14                             |
| 2 | Осьово-спрямоване свердління з ультразвуком | 42                             |
| 3 | Кавітаційне свердління                      | 60                             |
| 4 | Гібридне свердління                         | 72                             |

Термін служби інструменту було успішно збільшено завдяки осьово-спрямованому свердлінню та кавітаційному свердлінню. Порівняно з осьово-спрямованим свердлінням з ультразвуком кавітаційне свердління було більш ефективним у збільшенні ресурсу інструменту. Окрім того, гібридне свердління дало змогу значно збільшити термін служби інструменту.

Причини цих позитивних наслідків кавітаційного свердління на термін служби інструменту

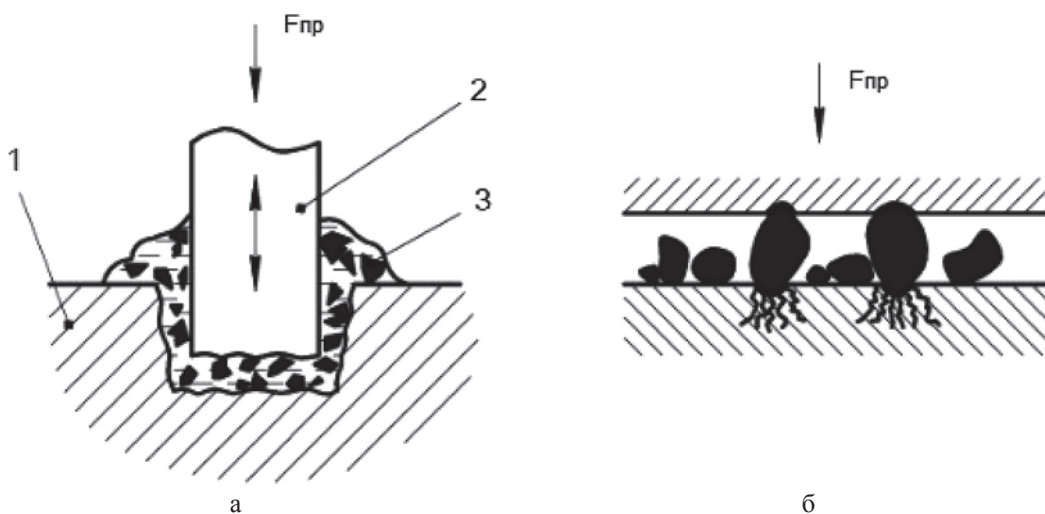


Рис. 2. Схеми процесів різання (а) і руйнування (б) під час ультразвукової обробки крихких деталей [16]: 1 – деталь; 2 – інструмент; 3 – суспензія з абразивом

пояснюються відсутністю зчеплення стружки з наконечником інструменту.

На інструментах не спостерігалось зчеплення зі стружкою під час кавітаційного свердління, тоді як сильне зчеплення стружки відбулося під час осьово-спрямованого свердління з ультразвуком. Величина адгезії стружки була більшою під час свердління з ультразвуком, ніж за звичайного свердління. Однак максимальна кількість утворених отворів досягнута під час гібридного свердління з ультразвуком, та була приблизно втричі більша, ніж за звичайного свердління. Це було зумовлено ефектом биття наконечника інструменту під час осьово-спрямованого свердління з ультразвуком.

Багаторазовий рух інструмента з ультразвуком утворював стружку і призводив до міцного зчеплення з кінчиком інструменту та бічною поверхнею. Однак позитивними ефектами обробки ультразвуком є зменшення сили різання та руйнування заготовки на кінчику інструменту. Окрім того, вплив негативних чинників свердління за допомогою ультразвуку в осьовому напрямі (тобто стиснення та зчеплення ріжучої стружки з кінчиком інструменту) можна успішно зменшити

комбінацією осьово-спрямованого свердління та кавітаційного очищення.

**Висновки.** У роботі проведено аналіз впливу застосування ультразвуку під час механічної обробки крихких матеріалів. До переваг ультразвукової обробки відносять: широту діапазону технологічних застосувань ультразвуку від розмірної обробки твердих і крихких матеріалів до інтенсифікації хіміко-технологічного та електрохімічного процесів; простоту експлуатації промислових установок; можливість автоматизації і механізації та ін. Її недоліком є низький ККД використання акустичної енергії порівнянні з іншими видами енергії.

У цілому представлені матеріали показують, що проблему підвищення продуктивності ультразвукової розмірної обробки матеріалів, що розглядаються в даній роботі, доцільно вирішувати комплексно, оскільки це дасть змогу гарантовано підвищити ефективність обробки.

Перспектива подальших досліджень ґрунтується на формуванні комплексної методики механічної обробки крихких матеріалів за допомогою ультразвуку з метою підвищення якості обробки та збільшення строку служби інструменту, використуваного на всіх етапах обробки.

#### Список літератури:

1. Онищенко С.В. Обробка конструкційних матеріалів. *Лабораторний практикум* : навчальний посібник. Москва : Нобель Пресс, 2015. 121 с.
2. Ультразвукова обробка технологічної сировини полімерних композиційних матеріалів : навчальний посібник / О.П. Колосова та ін. Київ : КПІ імені Ігоря Сікорського, 2017. 188 с.
3. Закревський О.Ф. Точність вимірювання амплітуди ультразвукових механічних коливань вихрострумовим методом. *Електроніка і зв'язь*. 2013. № 1. С. 89–93.
4. Моделювання процесу ультразвукового алмазного вигладжування / В.О. Федорович та ін. *Резание и инструменты в технологических системах*. 2018. Вып. 89. С. 198–204.
5. Калафатова Л.П. Мазильно охолоджуючі технологічні середовища як фактор підвищення ефективності процесів механічної обробки крихких конструкційних матеріалів. *Сучасні технології в машинобудуванні*. 2018. Вип. 13. С. 9–20.
6. Козлова О.Б., Заведєєв В.О. Підвищення якості поверхні методом без абразивної ультразвукової фінішної обробки. *Тиждень науки-2019. Машинобудівний факультет* : тези доповідей науково-практичної конференції, м. Запоріжжя, 15–19 квітня 2019 р. Запоріжжя : ЗНТУ, 2019. С. 17–18.
7. Савельєв С.Г., Плотніков В.В., Бабаєвська О.В. Застосування електровпливу для ефективного дроблення матеріалів в умовах металургійної переробки. *Вісник Криворізького національного університету*. 2020. Вип. 50. С. 112–117.
8. Wang J., Fu J., Wang J., Du F., Liew P.J., & Shimada K. Processing capabilities of micro ultrasonic machining for hard and brittle materials: SPH analysis and experimental verification. *Precision Engineering*. 2020. Vol. 63. P. 159–169.
9. Kumar, S., & Dvivedi, A. On machining of hard and brittle materials using rotary tool micro-ultrasonic drilling process. *Materials and Manufacturing Processes*. 2019. Vol. 34(7). P. 736–748. DOI: 10.1080/10426914.2019.1594255
10. Esmaeilzare A., Rahimi A., Rezaei S.M. Investigation of subsurface damages and surface roughness in grinding process of zerodur@glass-ceramic. *Applied Surface Science*. 2014. Vol. 313. P. 67–75.
11. Wang Y., Lin B., Cao X.Y., Wang S.L. An experimental investigation of system matching in ultrasonic vibration assisted grinding for titanium. *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. P. 1871–1878.
12. Lv D.X., Wang H.X., Tang Y.J., Huang Y.H., Li Z.P. Influences of vibration on surface formation in rotary ultrasonic machining of glass BK7. *Precision Engineering*. 2013. Vol. 37. P. 839–884.

13. Zhang C., Feng P., & Zhang J. Ultrasonic vibration-assisted scratch-induced characteristics of C-plane sapphire with a spherical indenter. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2013. Vol. 64. P. 38–48.

14. Study on effect of ultrasonic vibration on grinding force and surface quality in ultrasonic assisted micro end grinding of silica glass / Z. Jianhua, et al. *Shock and Vibration*. 2014. 10 p.

15. Ігнатова Т.М., Глазкова В.В. Вивчення впливу ультразвуку на популяцію мікроорганізмів. *Біомедична інженерія та електроніка*. 2015. № 3. URL: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/biomedengelec\\_2015\\_3\\_9](http://nbuv.gov.ua/UJRN/biomedengelec_2015_3_9) (дата звернення: 26.04.2021).

16. Ультразвукова обробка матеріалів 2018. URL: <https://extxe.com/2192/ultrazvukovaja-obrabotka-materialov/> (дата звернення: 26.04.2021).

#### **Lezhnin K.V. ANALYSIS OF INFLUENCE OF ULTRASOUND AT FRAGILE MATERIALS TOOLING**

*The article analyzes the influence of ultrasound in machining brittle materials. The characteristics of brittle materials, including their high heat resistance, low wear rate and low weight compared to metals are disclosed. The problems of processing brittle materials are given. The algorithm of ultrasonic treatment of brittle materials is revealed, it is noted that during mechanical sonication of brittle materials the brittle material is punched out of the product by blows of harder abrasive grains, which are directed by the end of the working tool. With this technology, cavities are formed in the product to be processed, which copy the shape of the working tool. It is emphasized that the effect of ultrasound on brittle materials allows to change their properties and structure. The effect of silicon carbide drilling using various processing methods, which includes: conventional drilling, axial-directional drilling with ultrasound, cavitation drilling and hybrid drilling, which includes axial-directional drilling with ultrasound and cavitation drilling. The scheme of the ultrasonic installation for carrying out mechanical processing of fragile materials is offered. It is emphasized that the productivity of the process depends on many factors, mainly on the mechanical parameters of the processed material, which is characterized by the criterion of fragility. The use of ultrasonic vibrations in the process of machining on the basis of cutting liquid is analyzed. The negative and positive aspects of the use of ultrasound in the machining of brittle materials are indicated and the directions of reduction of negative drilling factors by means of ultrasound in the axial direction are determined.*

**Key words:** impact, ultrasound, machining, brittle materials, equipment, tools, edge, drilling.

**Маловичко В.К.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Брунеткін О.І.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ В ГРУПІ ПІДГРІВАЧІВ ВИСОКОГО ТИСКУ

*Система регенерації високого тиску є складовою частиною системи живильної води. Відповідно до класифікації технологічних систем, обладнання та трубопроводів за впливом на безпеку за «Загальними положеннями забезпечення безпеки атомних станцій» (ОПБ), підігрівачі високого тиску відносяться до систем нормальної експлуатації, важливих для безпеки.*

*Контроль рівня КГП забезпечує безаварійну роботу всього блоку. Система регенерації високого тиску призначена для підігріву живильної води, яка подається живильними насосами з деаераторів у парогенератори паром, частково відпрацьованих у проточній частині головної турбіни. Застосування ПВТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС. Група ПВД підігріває воду, яка надходить у парогенератор, зменшуючи підігрів живильної води до кипіння, і тим самим зменшує кількість енергії, яка передається першим контуром для підігріву води до стану насичення. Для запобігання аварійним ситуаціям і для правильної роботи установки необхідно регулювати рівень конденсату в ПВД шляхом регулювання РК.*

*Підігрівач високого тиску являє собою вертикальний апарат поверхневого типу. Основними вузлами підігрівача є корпус і трубна система. Корпус складається з верхньої з'ємної частини і нижньої нерухомої частини.*

*Трубна частина складається із шести спіральних колон: трьох колекторів, що роздають, і трьох колекторів, що збирають, до яких приєднано горизонтальні змійовики, виконані у вигляді зварних спіралей. У нижній частині підігрівача до цих колекторів приєднані патрубки для підведення і відведення живильної води. Застосування ПВТ підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС. Для запобігання аварійним ситуаціям і для правильної роботи установки необхідно регулювати рівень конденсату в ПВТ шляхом регулювання рівня води.*

*Досліджено вплив регулюючого клапану на перехідний процес регулювання. Знайдено перетворення сигналу, що керує рівнем у підігрівачі високого тиску. Проведено експеримент на моделі теплового пункту в середовищі Simulink. Результати експерименту проаналізовано.*

**Ключові слова:** регулюючий клапан, повний зовнішній вплив клапана, регулювання, перетворення сигналу, що управляє, підігрівач високого тиску.

**Постановка проблеми.** Одним із найважливіших параметрів ПВТ є рівень конденсату пари, що гріє. Підтримка цього параметра реалізує основну мету ПВТ – підігрів води для парогенератора. Підвищення рівня КГП в ПВТ може призвести до затоплення змійовиків і, як наслідок, потрапляння вологи в турбіну, що призведе до аварії з пошкодженням лопаток турбіни. Зниження рівня призводить до оголення змійовиків і, отже, до запарювання ПВТ, підвищення у ньому тиску, що може призвести до розриву.

За відсутності регенеративного підігріву живильної води досить значне відведення теплоти в холодному джерелі – конденсаторі турбіни. Частина теплоти могла б бути використана для підігріву живильної води у спеціальних регенератив-

них підігрівачах перед подачею її в парогенеруючу установку. Для здійснення регенеративного підігріву живильної води вологий пар зі ступенів турбіни може відводитися для часткової конденсації в регенеративних підігрівачах і потім повертатися в турбіну для подальшого виконання робіт у ній.

Система регенерації високого тиску є складовою частиною системи живильної води. Відповідно до класифікації технологічних систем, обладнання та трубопроводів за впливом на безпеку за «Загальними положеннями забезпечення безпеки атомних станцій» (ОПБ), підігрівачі високого тиску відносяться до систем нормальної експлуатації, важливих для безпеки.

Контроль рівня КГП забезпечує безаварійну роботу всього блоку. Система регенерації

високого тиску призначена для підігріву живильної води, яка подається живильними насосами з деаераторів у парогенератори паром, частково відпрацьованих у проточній частині головної турбіни. Застосування ПВД підвищує ККД установки і суттєво впливає на безпеку і надійність АЕС. Група ПВД підігріває воду, яка надходить у парогенератор, зменшуючи підігрів живильної води до кипіння, і тим самим зменшує кількість енергії, яка передається першим контуром для підігріву води до стану насичення. Для запобігання аварійним ситуаціям і для правильної роботи установки необхідно регулювати рівень конденсату в ПВД шляхом регулювання РК.

Підігрівач високого тиску являє собою вертикальний апарат поверхневого типу. Основними вузлами підігрівача є корпус і трубна система. Корпус складається з верхньої з'ємної частини і нижньої нерухомої частини.

Трубна частина складається із шести спіральних колон: трьох колекторів, що роздають, і трьох колекторів, що збирають, до яких приєднані горизонтальні змійовики, виконані у вигляді зварних спіралей. У нижній частині підігрівача до цих колекторів приєднано патрубки для підведення і відведення живильної води.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження впливу нелінійності регулюючого клапана на перехідний процес регулювання. Також слід розглянути можливість перетворення сигналу за відомого впливу для здійснення управління з ідеалізованою залежністю між керуючим сигналом і витратою пари; змоделювати результати дослідження у середовищі Simulink. Дослідження стійкості і якості автоматичної системи регулювання має проводитися у тісному зв'язку з дослідженнями її поведінки у сталих режимах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналіз – це дослідження готової автоматичної системи регулювання з метою визначення її властивостей і шляхів їх поліпшення. Синтез – це проектування автоматичної системи регулювання, що задовольняє поставленим вимогам.

Синтез автоматичної системи регулювання зазвичай виконують так:

1. Вивчення об'єкта регулювання, умов його роботи та основних збурень.
2. Формулювання вимог, що пред'являються до системи автоматичного регулювання.
5. Вибір принципу регулювання та початкової схеми регулятора.
4. Вибір і розрахунок елементів регулятора та їхніх параметрів на основі вимог, що

пред'являються до статичних і динамічних властивостей системи.

5. Експериментальне дослідження системи автоматичного регулювання.

Під час проектуванні системи автоматичного регулювання рівною мірою використовуються як теоретичні, так і експериментальні методи дослідження. Застосування теоретичних методів аналізу і синтезу вимагає попереднього математичного опису системи автоматичного регулювання. Як об'єкт управління розглядається група ПВД.

Основним регулюючим органом у подібних системах виступає регулюючий клапан. Незалежно від конструктивного виконання кінцевою метою підбору клапана є забезпечення лінійної залежності між регулюючим впливом і зміною регульованого параметра.

Регулюючі клапани (РК) підігрівачів системи регенерації призначені для регулювання рівня конденсату пари, що гріє в паровому просторі корпусу підігрівачів високого тиску (ПВД), шляхом часткового відкриття або закриття клапана у статичних і динамічних режимах роботи турбоустановки.

Для захисту турбіни від попадання води і захисту корпусу підігрівача високого тиску від руйнування у разі перевищення рівня конденсату вище допустимого (у результаті розриву труб, появи свищів у місцях зварювання елементів трубної системи та інших причин) усі підігрівачі високого тиску оснащують груповим захисним пристроєм від переповнення.

Як виконавчий орган захисту від підвищення рівня в підігрівачі високого тиску використовують автоматичний пристрій зі швидкодіючими впускним і зворотним клапанами.

Впускний клапан із виносним гідроприводом і зворотний клапан, надпоршневі порожнини яких з'єднані між собою перепускними трубами, є основними елементами захисту.

Підставою для конструювання РУПВД служать дані гідравлічного розрахунку. РК підігрівачів високого тиску призначені для регулювання рівня конденсату пари, що гріє у паровому просторі корпусу підігрівача високого тиску, шляхом відкриття або закриття клапана. Особливістю РК є робота на скипати потоці, що призводить до інтенсивного ерозійного зносу проточної частини і корпусу клапана, а також супроводжується кавітацією, шумом, вібрацією, які знижують довговічність і надійність арматури. Впускний клапан встановлюється на трубопроводі живильної води на вході у підігрівач високого тиску і призначений для аварійного відключення подачі живиль-

ної води у підігрівач високого тиску і перепуску її в живильний трубопровід по байпасних лініях, минаючи підігрівач високого тиску.

Клапани на трубопроводі встановлюються у строго вертикальному положенні.

Стабільне управління теплообмінним приладом, наприклад, отримують за лінійної залежності його теплового потоку від ходу штока регулюючого клапана. Із цією метою розглядають ідеальну спільну роботу теплообмінного приладу і регулюючого клапана. Її суть полягає у тому, що видаткова характеристика клапана повинна бути дзеркальним відображенням характеристики теплообмінного приладу (рис. 1).

Однак зміна витрати пари клапаном залежить як від його пропускної здатності, так і від ділянки системи, на якій клапан викликає зміну тиску пари. Лінійні або логарифмічні витратні характеристики справедливі за повного зовнішнього впливу клапана а 1 += (тиск регульованої ділянки втрачається в регулюючому отворі). Однак дана характеристика спотворюється зі зменшенням впливу клапана. Чим менше вплив, тим більше кривизна видаткової характеристики, тобто більш значним є розрегулювання системи. У системах регулювання цей параметр у проектуванні систем управління не враховують, хоча він значно впливає на якість регулювання і тому повинен бути врахований під час розрахунку керуючого впливу, щоб наблизити перехідний процес регулювання до ідеалізованого. Розглянемо лінійні і логарифмічні витратні характеристики з урахуванням впливу клапана: відносна положення клапана  $h/h_{100}$  є функцією керуючого сигналу для того, щоб домогтися, щоб відносна витрата лінійно залежала від керуючого сигналу (наприклад, сигналу за напругою).

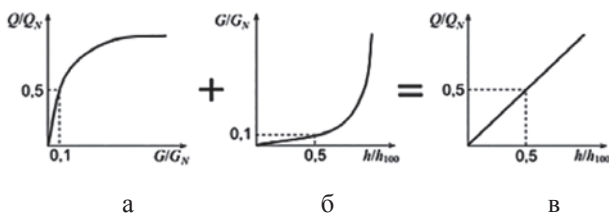


Рис. 1. Регулювання теплообмінного приладу (а – характеристика теплообмінного приладу; б – видаткова характеристика регулювання теплообмінного приладу; в – ідеальна характеристика регулювання теплообмінного приладу)

$$\frac{V}{V_{100}} \Rightarrow \frac{S}{S_{100}}$$

$$\sqrt{\frac{1}{1-a^* + \frac{a^*}{f(S)^2}}} = \frac{S}{S_{100}}$$

$$\sqrt{\frac{1}{1-a^* + \frac{a^*}{e^{2c/(f(S)-1)}}}} = \frac{S}{S_{100}}$$

$$f(S) = \sqrt{\frac{1}{1-\frac{1}{a^*} + \frac{1}{\left(\frac{S}{S_{100}}\right)^2 a^*}}$$

$$f(S) = -\frac{\ln\left(\frac{1}{a^* e^{\frac{2c}{2c(S_{100}-1)}} - \frac{1}{a^*} + 1}\right)}{2c} + 1$$

Після перетворень отримуємо функцію  $f(S)$ , яка коригує керуючий сигнал на регулюючий клапан. Для перевірки ефективності даного перетворення було створено модель (рис. 4) групи підігрівачів високого тиску в середовищі Simulink. На підставі цієї моделі порівнюється процес регулювання з даними перетворенням і без нього. Як обурюючий сигнал використовується витрата пари. Регульований параметр – рівень у ПВТ. Клапан був вибраний лінійний. Із графіка (рис. 5) видно, що регулювання із запропонованим перетворенням відбувається якісніше й однаково за всіх збурень, оскільки залежність залишається лінійною за будь-якого положення клапана. Інтегральний критерій якості

$$J_i = \int_0^{+\infty} |\varepsilon| dt$$

дорівнював

$$J_0 = 3005 \text{ и } J_1 = 2553$$

для моделі без перетворення сигналу і з ним відповідно, що показує підвищення якості (згідно із цим критерієм) на 17,7%. Окрім цього, у процесі регулювання клапан рухається значно менше (рис. 6), що підвищує надійність даного елемента.

**Висновки.** Отримано формули, що дають змогу перетворювати керуючий сигнал для вирівнювання видаткової (лінійної і логарифмічної) характеристики клапана. Їх ефективність була перевірена на моделі групи підігрівачів високого тиску, розробленої в середовищі Simulink.

Чисельний експеримент показав, що дане перетворення:

- 1) може значно підвищити якість регулювання процесу, що передбачає наявність регулюючого клапана;
- 2) знижує знос виконавчого механізму;
- 3) особливо ефективно у сфері роботи клапана, де видаткова характеристика має велику крутизну.

$$\frac{V}{V_{100}} = \sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{(h/h_{100})^2}}}$$

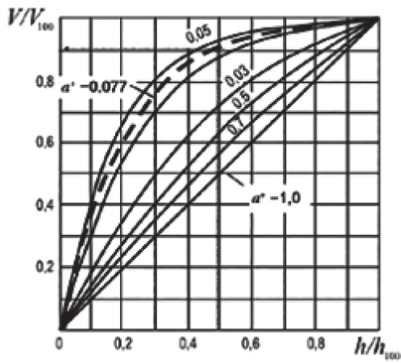


Рис. 2. Лінійна видаткова характеристика клапана

$$\frac{V}{V_{100}} = \sqrt{\frac{1}{1 - a^+ + \frac{a^+}{e^{2c(h/h_{100}-1)}}}}$$

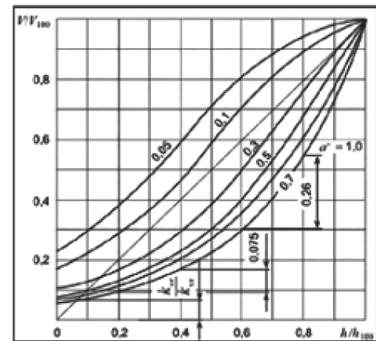


Рис. 3. Логарифмічна видаткова характеристика клапана

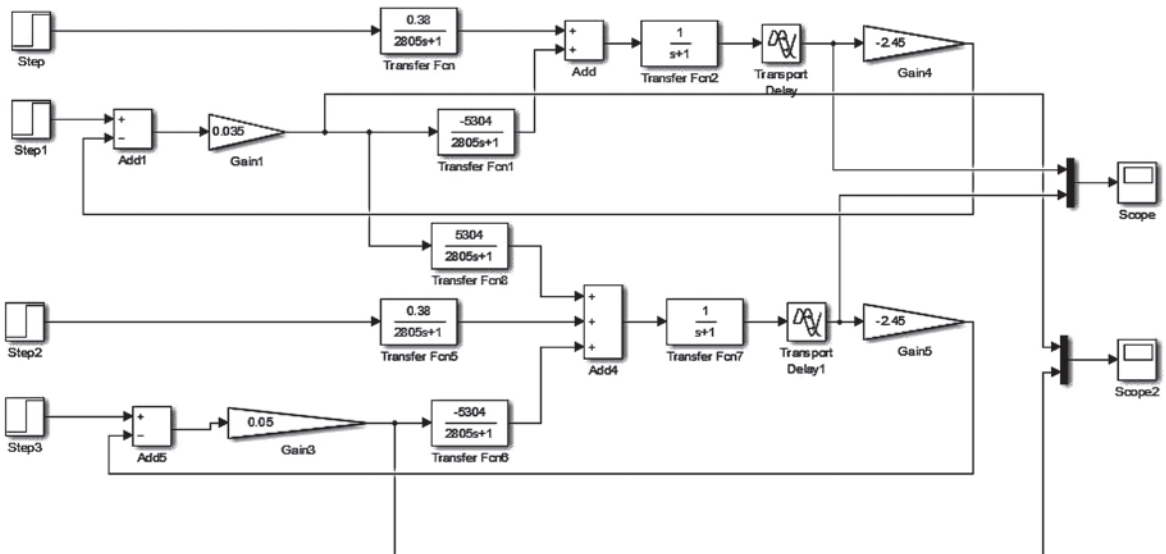


Рис. 4. Моделювання перетворення керуючого впливу в Simulink

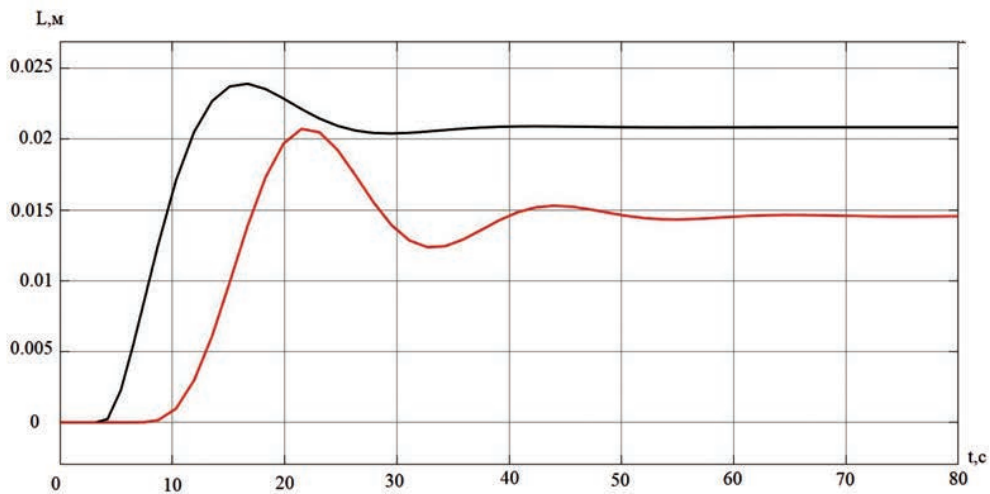


Рис. 5. Перехідний процес регулювання



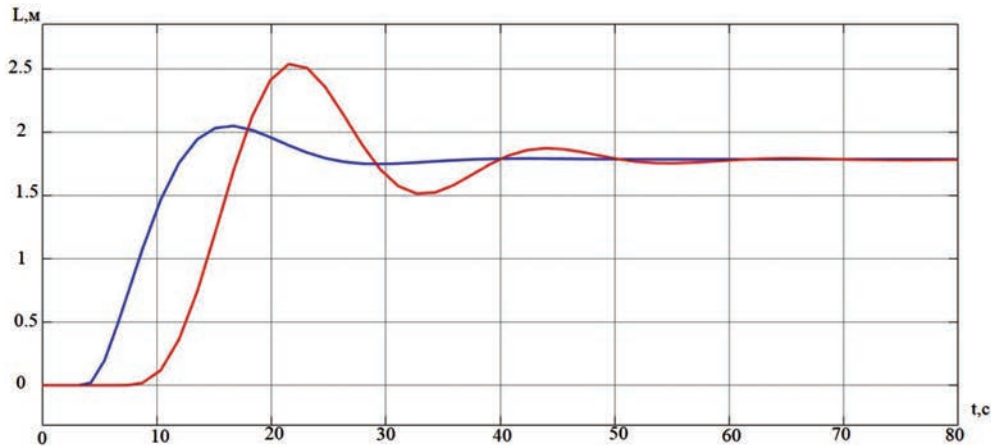


Рис. 6. Рух клапана в процесі регулювання

#### Список літератури:

1. Комісарчик В.Ф. Автоматичне регулювання технологічних процесів : навчальний посібник. Твер : ТНТУ, 2001. С. 27–29.
2. Преображенський В.П. Теплотехнічні вимірювання та прилади : підручник ; 3-є вид., перероб. Москва : Енергія, 1978. С. 35–40.
3. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС. Одеса : Асторпрінт, 2001.
4. Ключев А.С., Глазов Б.В., Дубровський А.Х. Проектування систем автоматизації технологічних процесів. Москва : Вища школа, 1990.
5. Максимов М.В. Метод оцінки ефективності алгоритму маневру потужністю енергоблоку з реакторами ВВЕР-1000. *Вісник вузів. Серія «Ядерна енергетика»*. 2008. Вип. 4. С. 128–139.
6. Баскаков В.Є. Алгоритм експлуатації енергоблоку з ВВЕР у підтримці добового балансу потужності енергосистеми. *Праці Одеського політехнічного університету*. 2007. Вип. 2(28). С. 56–59.
7. Сучасні технології управління : монографія : у 2-х т. / за заг. ред. С.В. Купрієнко. Одеса : Купрієнко С.В., 2012. 179 с.
8. Медведєв Р.Б., Сангінова А.В. Оптимальне керування процесом зміни концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС з ВВЕР-1000. *Науковий вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»*. 2002. Вип. 2(22). С. 29–56.
9. Волошкіна А.А., Беглов К.В., Плахотнюк А.А. Дослідження регулятора концентрації рідкого поглинача енергоблоку АЕС. *Автоматизація технологічних і бізнес-процесів*. 2015. Т. 7. Вип. 4. С. 18–24.

#### Malovichko V.K., Brunetkin O.I. INVESTIGATION OF AUTOMATIC WATER LEVEL REGULATION SYSTEM IN THE GROUP OF HIGH PRESSURE HEATERS

*The high pressure regeneration system is an integral part of the feed water system. According to the classification of technological systems, equipment and pipelines according to the impact on safety according to the "General provisions for the safety of nuclear power plants" (OPB), high pressure heaters are systems of normal operation that are important for safety.*

*Control of the level of KGP ensures trouble-free operation of the whole unit. The high-pressure regeneration system is designed to heat the feed water supplied by feed pumps from deaerators to steam steam generators, partially spent in the flow part of the main turbine. The use of HTP increases the efficiency of the installation and significantly affects the safety and reliability of NPPs. The LDPE group heats the water entering the steam generator, reducing the heating of the feed water to boiling, and thus reduces the amount of energy transmitted by the first circuit to heat the water to saturation. To prevent accidents and for the proper operation of the installation, it is necessary to adjust the condensate level in the LDPE by adjusting the LCD.*

*The high pressure heater is a vertical surface type apparatus. The main components of the heater are the housing and piping system. The body consists of an upper ground part and a lower fixed part.*

*The pipe part consists of six spiral columns: three are distributed and three collect collectors to which the horizontal coils executed in the form of welded spirals are connected. In the lower part of the heater to these collectors branch pipes for supply and drainage of feed water are connected. The use of HTP increases the CCT of the installation and significantly affects the safety and reliability of NPPs. To*

*prevent accidents and for proper operation of the unit, it is necessary to adjust the condensate level in the HTP by adjusting the water level.*

*The influence of the regulating valve on the transient process of regulation is investigated. The conversion of the signal controlling the level in the high pressure heater is found. An experiment was performed on a model of a heating point in the Simulink environment. The results of the experiment are analyzed.*

**Key words:** *control valve, full external influence of the valve, regulation, conversion of the control signal, high pressure heater.*

**Мануїлов Я.С.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## ВИКОРИСТАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ «БЛОКЧЕЙН» У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЯХ

У статті розглядається особливості технології «блокчейн» (*block chain* з англійської — ланцюжок блоків), її переваги та недоліки, можливості використання у телекомунікаційних системах, наданні послуг операторами на базі даної технології. Прозорість та гнучкість проведення банківських, фінансових та іншого виду операцій з використанням технології блокчейн. Ведення публічних реєстрів з історією, яку не можна змінити, проведення онлайн голосувань, системи цифрового посвідчення осіб та нотаріату. Довіра до систем побудованих на базі технології блокчейн заснована на чіткому виконанні усіма учасниками, децентралізованої системи, встановлених у алгоритмах роботи правил та перевірки виконання цих правил кожним з учасників. Навіть якщо зловмисник спробує провести помилкову, хибну операцію, кожний учасник мережі автоматично за допомогою програмного забезпечення перевірить валідність даної операції та відкине її як помилкову. Розглядається стійкість до відмов розподілених телекомунікаційних систем побудованих з використанням технології блокчейн. Використання смарт-контрактів (розумних контрактів) при наданні різного виду телекомунікаційних послуг. Принципи доступності та незмінності інформації, прозорості при виконанні транзакцій та обслуговуванні блокчейн систем у телекомунікаціях. Проводиться аналіз ефективності та доцільності використання технології блокчейн у телекомунікаційних системах. Розглядаються можливості використання даної технології для оптимізації бізнес-процесів у компаніях, які надають телекомунікаційні послуги та у банківському секторі. Застосування нових віртуальних ідентифікаторів абонентів, що обслуговуються, замість морально застарілих, дозволить спростити обслуговування абонентів, роумінгові угоди між операторами та створити можливості для нових видів послуг. Здійснюється розгляд математичного (криптографічного) підґрунтя технології блокчейн, що базується на хеш-функції та цифровому підписі, які гарантують цілісність та незмінність інформації та механізм перевірки володіння без необхідності звернення до арбітра. Можливості та складності, які можуть виникнути під час впровадження технології блокчейн у наявні телекомунікаційні системи.

**Ключові слова:** блокчейн, транзакції, хеш-функція, цифровий підпис, децентралізовані мережі, смарт-контракти, телекомунікаційні послуги.

**Постановка проблеми.** На сучасному етапі розвитку суспільства відбувається бурхливий розвиток інформаційно-телекомунікаційних систем і технологій і, як результат, їх широке використання в різних секторах суспільства. Значна кількість сучасних державних та приватних установ використовують інформаційні та телекомунікаційні системи для управління виробничими процесами, підтримки рішень, зберігання та обробки інформації, пошуку необхідних даних та багато іншого.

Конфіденційність, безпека, надійність, цілісність переданої інформації між різними користувачами системи останнім часом вимагає широкої уваги з боку фахівців у галузі розвитку телекомунікаційних мереж. Особливо актуальним є момент передачі конфіденційних даних щодо відкриття доступу до захищених банківських профілів клієнтів. Водночас наявні алгоритми захисту, політика їх використання не завжди можуть бути

гарантом від сторонніх мережевих атак, тоді як реалізація виділеного підключення може бути непрактичною і фізично не реалізованою з урахуванням особливостей функціонування телекомунікаційних мереж [3].

Блокчейн-технології, протоколи та архітектура як окрема реалізація нової інформаційної системи можуть бути взяті за основу в процесі створення нової захищеної системи передачі та обміну даними.

**Постановка завдання.** Розгляд технології блокчейн, її структури, визначення особливостей захисту даних, особливо при реалізації відомого на сьогодні алгоритму видобутку, може бути використане в процесі створення вдосконаленого прототипу банківської системи розрахунків, де основною складовою передачі даних є транзакція.

З іншого боку, ресурси біткойн-платіжної системи можуть стати поштовхом для переоснащення наявних телекомунікаційних мереж

з позиції забезпечення в останніх широкого розгалуження, підвищеної безпеки даних у критичних вузлах та чіткої прозорості при доступі інформаційні ресурси мережі. Таке рішення в рамках дослідження було обрано із принципу, що саме в технології блокчейн можна відстежувати та передбачати всі дії щодо передачі даних завдяки логічно побудованій та добре організованій архітектурі зв'язку кінцевих вузлів.

Майже всі ці системи працюють за принципом централізованого управління процесом, а повний контроль над системою може бути досягнутий за допомогою доступу до центрального головного сервера. У результаті збільшується ризик пошкодження всієї системи, збільшується кількість вразливостей та загроз для ІТС.

**Виклад основного матеріалу.** Зважаючи на суспільний інтерес до технології блокчейн та її активне використання в різних сферах, таких як фінанси та бухгалтерський облік, доцільно проаналізувати ефективність даної технології у телекомунікаціях. Своєю назвою «Blockchain» частково характеризує принцип самої технології. «block» – це блок, «chain» – це ланцюжок. Звідси випливає, що блокчейн – це ланцюжок блоків.

Блокчейн підтримує суворий порядок, визначений складними криптографічними функціями. Блоки – це дані про транзакції, угоди та контракти в системі, які представлені в криптографічній формі. Всі блоки розташовані в ланцюжку, тобто з'єднані послідовно. Щоб додати (записати) новий блок, потрібно перевірити порядок попередніх блоків.

Розглянемо уважніше на роботу системи блокчейн. Кожен блок або запис у реєстрі блокчейн містить основну інформацію, обчислює власний хеш попереднього блоку. Набір даних, що зберігається в блоці, залежить від призначення блокчейну. Наприклад, блокчейн біткойн містить інформацію про відправника, одержувача та кількість перерахованих монет. Хеш кожного блоку унікальний, як і дані, що зберігаються в блоці. Його унікальність можна порівняти з відбитком пальця людини. Якщо ви внесете, навіть незначні, зміни до блоку, хеш блоку зміниться. Третім елементом блоку є хеш попереднього блоку. Таким чином формується послідовність блоків. Ця модель робить блокчейн безпечним.

Мережа блокчейнів добре справляється із підтримкою цілісності даних. Через наявність багатьох копій бази даних та їх змін лише після підтвердження правильності інформації іншими учасниками мережі інформація залишається захищеною від навмисних, несанкціонованих або

випадкових змін, а також від змін під час зберігання або передачі.

Інформацію більше не можна змінювати через технічні помилки в роботі мережевого вузла або через людський фактор, оскільки підтвердження операцій базується на складних математичних функціях. Це означає, що інформація залишається незмінною та правильною. Забезпечення цієї категорії інформаційної безпеки гарантує стабільну роботу, правильні рішення та можливість зберігати дані, як вони були створені [4].

Відповідно до принципу доступності інформація повинна бути доступна уповноваженим особам у потрібний час. У мережі блокчейнів кожен учасник вважається авторизованим і може в будь-який час читати або писати дані та брати участь у верифікації даних, доданих іншими учасниками. Конфіденційність інформації досягається наданням доступу з найменшими дозволами, тобто уповноважена особа повинна мати доступ лише до даних, визначених для її прав доступу.

Будь-який учасник мережі може викликати повну копію бази даних на своєму пристрої та прочитати всі дані, що містяться в ній, що принципово суперечить принципу конфіденційності даних. Зберігання даних у базі блокчейн в зашифрованому вигляді принципово не вирішує проблему конфіденційності, оскільки конфіденційні дані, такі як особисті дані, в більшості випадків не втрачають своєї актуальності з часом. Дешифрування отриманих даних є питанням часу і залежить від обчислювальної потужності зловмисника, який намагається отримати доступ до інформації.

Телекомунікації – це неймовірно складна галузь, яка вимагає величезної фізичної інфраструктури, складних мереж з багатьма учасниками, складних систем виставлення рахунків, роумінгових угод та інших аспектів. Упровадження технології блокчейн може здатися досить складним кроком у цій багаторівневій галузі, але насправді впровадження розподіленої книги та інтелектуальних контрактів допоможе значно спростити всі бізнес-процеси телекомунікаційної компанії.

Телекомунікаційні компанії пов'язують людей один з одним через телефони та Інтернет по кабелю або по бездротовому зв'язку. Індустрія телекомунікацій виявляється застарілою, оскільки вона заснована на картах модулю ідентифікації абонента (SIM), які були розроблені ще в 1991 році. Доброю новиною є те, що SIM-карти поступово замінюються картами eSIM, які являють собою цифровий чіп, який робить ту ж роботу.

Але недостатньо просто задовольнятися зручною і швидкою установкою плат нового покоління, і тому оператори звертаються до технології блокчейн, яка знає, як правильно обробляти дані. Blockchain – це база даних, яка підтримує постійно зростаючий набір даних.

Зараз Blockchain – одна з найбільш широко обговорюваних та відкритих технологій. Ця технологія несе в собі можливість зруйнувати бізнес-моделі в багатьох галузях, включаючи телекомунікації, і може підвищити прозорість та ефективність процесу. Великою перевагою blockchain є те, що він є загальнодоступним. Усі учасники можуть бачити блоки та транзакції, що зберігаються в них. Це не означає, що кожен може бачити фактичний зміст транзакції; він захищений вашим приватним ключем [1].

Телекомунікаційний ланцюжок створення вартості складається із забезпечення необхідної мережевої інфраструктури та підключення для передачі голосу, даних, мультимедіа та інших супутніх послуг. Обмін даними відбувається між мережами, що вимагає захисту даних, цілісності даних, перевірки даних та запобігання шахрайству.

Технологія Blockchain пропонує телекомунікаційній галузі ідеальне рішення для однієї з основних вимог. Завдяки надійному безпечному доступу до даних блокчейн вже використовується в багатьох додатках у телекомунікаційній галузі. Можливість зберігати історичні записи користувачів без можливості втручання в ці записи дозволяє контролювати різні аспекти облікових записів користувачів. Деякі блокчейн-додатки в телекомунікаційній галузі включають автоматизацію багатьох внутрішніх операцій, таких як системи виставлення рахунків, роумінг та управління ланцюгами поставок.

Автоматизація білінгових систем за допомогою смарт-контрактів, що надаються за допомогою технології блокчейн, економить компанії багато часу та грошей та запобігає будь-якій можливості шахрайства. Як результат, весь процес бухгалтерського обліку та аудиту буде автоматизований, що дозволить заощадити телекомунікаційним компаніям більше грошей [3].

З'являються нові варіанти управління мережею та нові моделі спільного використання інфраструктури, такі як управління орендою сегментів мережі 5G для телекомунікаційних компаній та мережевих партнерів, підприємств, операторів мобільних віртуальних мереж (MVNO – mobile virtual network operator) та гравців Over the Top (OTT). Блокчейн може допомогти спростити процес обслугову-

вання, зробити його безпечним, прозорим та ефективним, а також знайти нові потоки доходу за допомогою пропозицій щодо цифрового пакету.

Технологія блокчейн все ще має величезний потенціал, щоб завоювати телекомунікаційну індустрію. Пакет послуг на основі блокчейн може створити нові потоки доходу для телекомунікаційних компаній. Незважаючи на те, що ці послуги ще не повністю вивчені або виявлені, деякі з них вже досить зрозумілі, щоб їх можна було широко застосовувати.

Низька вартість використання блокчейн для дешевих платежів може дозволити телекомунікаційним компаніям надавати мікроплатежі, які зазвичай використовуються для купівлі мобільних онлайн-ігор, музики тощо. У результаті розгортання цієї послуги стороннім додаткам не потрібно надавати реквізити банківського рахунку, дані кредитної картки чи будь-яку іншу конфіденційну чи конфіденційну інформацію. Іншими словами, блокчейн-додатки в телекомунікаційній галузі забезпечать ще більш високий рівень безпеки для користувачів телекомунікацій.

Ідея використання методу обліку та відстеження, який захищає від фальсифікації чи захисту, робить додатки блокчейн безмежними на всіх ринках, що вимагають безпеки. Більшість програм, що використовують технологію блокчейн у телекомунікаціях, є фінансовими тим чи іншим чином.

Спрощення фінансових операцій та переказів із використанням технології блокчейн обіцяє перенести телекомунікаційні компанії в майбутнє, коли ці компанії стануть повністю функціональними банками з мінімально можливою вартістю. Цей крок буде посилений тим фактом, що телекомунікації є однією з галузей, яка користується високим рівнем довіри споживачів. Використання програм, заснованих на блокчейні, посилить цю довіру і одночасно посилить її.

Блокчейн слід сприймати як нову технологічну парадигму. Технологія збрала кілька концептуально різних ідей. Такі галузі, як розподілені реєстри пам'яті, алгоритми консенсусу та криптографічні механізми захисту даних, були об'єднані. Багато аспектів технології блокчейн раніше активно обговорювались і просувались як окремі рішення в технологічних колах. Блокчейн – це логіка зберігання, яка не залежить від централізованого сервера або групи серверів [1].

Замість того, щоб звертатися до третіх осіб, таких як фінансові установи, як посередники у транзакціях, вузли мережі блокчейнів використовують спеціальний консенсус-протокол для

узгодження вмісту книги, а також криптографічні алгоритми хешування та цифрові підписи для забезпечення цілісності транзакції та передачі її параметрів.

Механізм консенсусу гарантує, що розподілені книги є точними копіями, що зменшує ризик шахрайських транзакцій, оскільки сторонні втручання можуть виникати в багатьох місцях одночасно. Криптографічні алгоритми хешування, такі як алгоритм обчислення SHA256, гарантують, що будь-яка зміна вхідних даних транзакції, навіть найменша, призведе до різного хеш-значення в результатах обчислення, що вказує на те, що вхідні дані транзакції можуть бути скомпрометовані. Цифрові підписи гарантують, що транзакції здійснюються законними відправниками (підписаними приватними ключами), а не зловмисниками.

Децентралізована однорангова мережа блокчейн позбавляє окремих учасників або групи учасників можливості контролювати базову інфраструктуру або дестабілізувати всю систему. Усі учасники мережі рівні і підключаються до неї за допомогою однакових протоколів. Учасниками можуть бути приватні особи, державні установи, організації чи асоціації всіх перелічених типів учасників.

По суті, система фіксує хронологічний порядок транзакцій з усіма вузлами в мережі, які визнали дійсність транзакцій через обрану модель консенсусу. Результатом є транзакції, які не можна скасувати або змінити.

Технологія формує та зберігає список упорядкованих записів, які називаються блоками. Кожен блок містить мітку часу і, що дуже важливо, унікальний образ (хеш) попереднього блоку, таким чином технологія «з'єднує» блоки даних, виключаючи можливість зміни даних у сформованих блоках без зміни всієї послідовності. Завдяки уніфікації технологічних рішень блокчейн має кілька вражаючих відмінних рис: відкритість, незмінність збережених даних, а також можливість публікувати та керувати виконуваною логікою (програмним кодом) у децентралізованій мережі. Усі ці аспекти роблять блокчейн цікавою та перспективною технологією [4].

У традиційних комерційних мережах усі учасники надають підтримку власним дублікатам книг, розбіжності між якими призводять до суперечок, збільшують час врегулювання, а також вимагають залучення посередників з усіма супутніми витратами. Водночас використання розподілених книг, заснованих на технології блокчейн, в яких транзакції не можуть бути змінені після прийняття консенсусу та внесення їх у книгу, може заоща-

дити підприємцям час і гроші, а також зменшити можливі ризики.

Технології блокчейн обіцяють більшу прозорість взаємодії між зацікавленими сторонами, вдосконалену автоматизацію, адаптацію реєстрів до індивідуальних вимог, а також вищий рівень довіри до ведення діловодства. Механізми консенсусу в блокчейні мають переваги консолідованого та упорядкованого набору даних, який має менше упереджень та квазіреальних довідкових даних і дозволяє учасникам вносити зміни в описи своїх активів.

Оскільки жоден учасник не володіє центральним джерелом походження інформації, що міститься в розподіленій книзі, технології блокчейн підвищують рівень довіри та забезпечують цілісність інформаційного потоку між учасниками.

Незмінність механізмів блокчейну призводить до зниження витрат на аудит та підвищення прозорості дотримання нормативних актів. І оскільки контракти, укладені в комерційних мережах, що базуються на технології блокчейн, є розумними, автоматизованими та остаточними, бізнес виграє від високої швидкості виконання, зменшення витрат та ризиків та своєчасного врегулювання контрактів [2].

Технологія блокчейн, завдяки своїм відмінним особливостям, пропонує позбутися «зайвої ланки» (арбітра) у більшості бізнес-процесів і може взяти на себе ролі, традиційно важливі у секторі фінансових послуг. Розумні контракти, засновані на децентралізованій виконуваний логіці, можуть бути корисними і поза фінансовим сектором.

Можливість укладання контрактів, параметризованих за допомогою зовнішніх потоків даних (ціни акцій, звіти про погоду, заголовки новин) і укладених сторонами на основі електронного блокчейну, змінює середовище ведення бізнесу майже у всіх галузях: «8% з 3000 опитаних організацій в різних країнах світу перейшли на пілотну стадію або на стадію впровадження технології блокчейн. У даний час 25% вивчають можливість впровадження у найближчі 12 місяців. Серед них – фінансові компанії – 33%, державний сектор – 29%, охорона здоров'я – 27%.

Технологія блокчейн може кардинально змінити класичні бізнес-процеси. Цю технологію можна використовувати для створення захищених від фальсифікацій систем голосування, створення реєстрів незмінної історії накопичення даних та багато іншого [3].

Варто зазначити, що в гонитві за сенсацією та революцією багато людей концентруються на перевагах технологій. Блокчейн не слід сприймати

як технологію, яка може вирішити будь-яку проблему. Через використання консенсусних алгоритмів та використання об'ємних математичних розрахунків та розподіленої логіки зберігання даних більшість систем блокчейн не мають високої швидкості обробки транзакцій. Таким чином, під час автоматизації процесів та побудови інформаційних систем з використанням технології блокчейн необхідно чітко розуміти, яке конкретне завдання вирішує блокчейн, яку оптимізацію процесу та які переваги він приносить.

**Висновки.** Отже, технологія блокчейн досі вважається відносно новою. Ось чому в ньому так багато нерозкритих можливостей. Завдяки технології блокчейн світ зараз перебуває у фазі створення нового інструменту, який можна використовувати так, про який ніхто інший не знає. Цифрові телекомунікаційні компанії прагнуть до інформатизації всієї організації та екосистем, і блокчейн може бути життєздатним рішенням для конкретних сценаріїв та забезпечити спрощений процес, ефективність та прозорість.

### Список літератури:

1. Blockchain architecture basics: components, structure, benefits & creation. URL : <https://mlsdev.com/blog/156-how-to-build-your-own-blockchain-architecture>.
2. How blockchain can impact the telecommunications industry and its relevance to the C-Suite // Deloitte. URL : [https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/za/Documents/technology-mediatelecommunications/za\\_TMT\\_Blockchain\\_TelCo.pdf](https://www2.deloitte.com/content/dam/Deloitte/za/Documents/technology-mediatelecommunications/za_TMT_Blockchain_TelCo.pdf).
3. Блокчейн у телекомунікації: як Nexign та Bublestone модернізують галузь. URL : <https://nexign.com/en/blog/Blockchain-in-telecom>.
4. Блокчейн-Телеком или как технологии меняют правила игры. URL : <https://3commas.io/ru/blog/blokchejn-telekom-ili-kak-texnologii-menyayut-pravila-igry>.

### Manuilov Ya.S. USE OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN TELECOMMUNICATIONS

*The article considers the features of the technology blockchain, its advantages and disadvantages, the possibility of use in telecommunications systems, the provision of services by operators based on this technology. Transparency and flexibility of banking, financial and other types of transactions using blockchain technology. Maintaining public registers with a history that cannot be changed, conducting online voting, digital identity systems and notaries. Trust in systems based on blockchain technology is based on the clear implementation of all participants, a decentralized system established in the algorithms of the rules and verification of compliance with these rules by each participant. Even if an attacker tries to perform an erroneous, erroneous operation, each network member will automatically use software to verify the validity of the operation and reject it as erroneous. Failure of distributed telecommunications systems built using blockchain technology is considered. Use of smart contracts (smart contracts) in the provision of various types of telecommunications services. Principles of availability and immutability of information, transparency in transactions and maintenance of blockchain systems in telecommunications. The efficiency and expediency of using blockchain technology in telecommunication systems is analyzed. Possibilities of using this technology to optimize business processes in companies providing telecommunications services and in the banking sector are considered. The use of new virtual IDs of serviced subscribers, instead of obsolete ones, will simplify customer service, roaming agreements between operators and create opportunities for new types of services. The mathematical (cryptographic) basis of blockchain technology, based on hash functions and digital signature, which guarantees the integrity and immutability of information and the mechanism of verification of possession without the need to apply to an arbitrator, is considered. Opportunities and difficulties that may arise when implementing blockchain technology in existing telecommunications systems.*

**Key words:** blockchain, transactions, hash function, digital signature, decentralized networks, smart contracts, telecommunication services.

**Mulyava O.M.**

National University of Food Technologies

**Sheremeta M.M.**

Ivan Franko National University of Lviv

## COMPOSITION OF PROBABILITY LAWS

A non-negative and non-decreasing function  $F$  continuous on the left on  $(-\infty, +\infty)$  is said to be a probability law if  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$  and  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$  and a composition of two probability laws  $F_1$  and  $F_2$  is defined by the equality  $F(s) = (F_1 * F_2)(s) := \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x-s) dF_2(x)$ . If for  $x \geq 0$  we put  $W_F(x) = 1 - F(x) + F(-x)$  then  $W_F(x) \downarrow 0$  as  $x \rightarrow +\infty$ . The article studies the relationship between a decreasing of the function  $W_{F_1 * F_2}$  and a decreasing of the functions  $W_{F_1}(x)$  and  $W_{F_2}(x)$  in terms of generalized orders and convergence classes. For this purpose, by  $L$  we denote a class of continuous nonnegative on  $(-\infty, +\infty)$  functions  $\alpha$  such that  $\alpha(x) = \alpha(x_0) \geq 0$  for  $x \leq x_0$  and  $\alpha(x) \uparrow +\infty$  as  $x_0 \leq x \rightarrow +\infty$ . We say that  $\alpha \in L$ , if  $\alpha \in L$  and  $\alpha((1+o(1))x) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ . Finally,  $\alpha \in L_{si}$ , if  $\alpha \in L$  and  $\alpha(cx) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  for each fixed  $c \in (0, +\infty)$ , i.e.  $\alpha$  is slowly increasing function. Putting  $R_F = \lim_{x \rightarrow +\infty} ((1/x) \ln(1/W_F(x)))$ , two cases  $R_F = +\infty$  and  $R_F < +\infty$  are considered separately.

For  $R_F = +\infty$  the following characteristic  $\omega_{\alpha, \beta}[F] := \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \alpha(x) / \beta((1/x) \cdot \ln(1/W_F(x)))$  is introduced and it is proved that if  $\alpha \in L_{si}$  and  $\beta \in L^0$  then  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] \leq \max\{\omega_{\alpha, \beta}[F_1], \omega_{\alpha, \beta}[F_2]\}$  and, moreover, if  $\omega_{\alpha, \beta}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$  then  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$ . If  $0 < R_F = R < +\infty$  and  $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} W_F(x) e^{Rx} = +\infty$  we put  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F] = \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \alpha(x) / \beta(x / \ln^+(W_F(x) \cdot e^{Rx}))$ . It is proved that if  $R_{F_1} = R_{F_2} = R \in (0, +\infty)$ ,  $\alpha \in L_{si}$ ,  $\beta \in L_{si}$ ,  $\alpha(cx) = (1+o(1))\alpha(x)$  and  $\alpha(x/\beta^{-1}(cx)) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  for each  $c \in (0, +\infty)$  then  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1 * F_2] \leq \max\{\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1], \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_2]\}$  and, moreover, if  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1]$  then  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1]$ .

The connection between the decrease of the function  $W_{F_1 * F_2}(x)$  and the decrease of the functions  $W_{F_1}(x)$  and  $W_{F_2}(x)$  also is studied in terms of classes of convergence. Under some conditions on the functions  $\alpha, \beta$  and  $W_{F_j}(x)$  it is proved, for example, that if  $R_F = +\infty$  and  $\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x) \beta_1((1/x) \cdot \ln(1/W_{F_j}(x))) dx < +\infty$  for  $j=1, 2$ ,

where  $\beta_1(x) = \int_x^{\infty} \beta(r) dr$ , then  $\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x) \beta_1((1/x) \cdot \ln(1/W_{F_1 * F_2}(x))) dx < +\infty$ .

**Key words:** probability law, composition of probability laws, generalized order, convergence class, decrease of function.

**Formulation of the problem.** For  $x \geq 0$  and probability laws  $F_j$  let  $W_{F_j}(x) = 1 - F_j(x) + F_j(-x)$  ( $j = 1; 2$ ) In terms of generalized orders and convergence classes connections between the decrease of  $W_{F_j}(x)$  and  $W(x)$  are established, where

$$F(s) = (F_1 * F_2)(s) := \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x-s) dF_2(x).$$

**Analysis of recent research and publications.** A non-decreasing function  $F$  continuous on the left on

$(-\infty, \infty)$  is said [5, p. 10] to be a probability law if  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$  and  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ .

If for  $x \geq 0$  we put  $W_F(x) = 1 - F(x) + F(-x)$  then  $W_F(x) \downarrow 0$  as  $x \rightarrow +\infty$ . A composition of two probability laws  $F_1$  and  $F_2$  is defined [5, p. 10] by the equality  $F(s) = (F_1 * F_2)(s) := \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x-s) dF_2(x)$ .

**Formulation of the problem.** The aim of our note is research of connections between the decrease of function  $W_{F_1 * F_2}$  and the decrease of functions  $W_{F_1}$



and  $W_{F_2}$  in terms of generalized orders and convergence classes.

**Statement of basic materials.** 1. Connections in terms of generalized orders. We put  $R_F = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)}$  and we will distinguish between two cases  $R_F = +\infty$  and  $R_F < +\infty$ , and for the research of the decrease of the function  $W_F$  we will use generalized orders. With this purpose we denote by  $L$  a class of positive continuous functions  $\alpha$  on  $(-\infty, \infty)$  such that  $\alpha(x) = \alpha(x_0)$  for  $-\infty < x \leq x_0$  and  $\alpha(x) \uparrow +\infty$  as  $x_0 < x \rightarrow +\infty$ . We say that  $\alpha \in L^0$  if  $\alpha \in L$  and  $\alpha((1+o(1))x) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ ; further,  $\alpha \in L_{si}$ , if  $\alpha \in L$  and  $\alpha(cx) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  for any  $c \in (0, +\infty)$ , i. e.  $\alpha$  is slowly increasing. It easy to see  $L_{si} \subset L^0$ .

We start from the case  $R_F = +\infty$ . For  $\alpha \in L$ ,  $\beta \in L$  and probability law we define

$$\omega_{\alpha, \beta}[F] := \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\alpha(x)}{\beta\left(\frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)}\right)}.$$

**Theorem 1.** If  $\alpha \in L_{si}$  and  $\beta \in L^0$  then  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] \leq \max\{\omega_{\alpha, \beta}[F_1], \omega_{\alpha, \beta}[F_2]\}$ , and moreover if  $\omega_{\alpha, \beta}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$  then  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$ .

*Proof.* Let  $\varphi(z) = \int_{-\infty}^{+\infty} e^{izx} dF(x)$  be the characteristic function of probability law  $F$  defined [5, p. 12] on real  $z$ . If  $\phi$  has an analytic continuation on the disk  $D_R = \{z : |z| < R\}$ ,  $0 < R \leq +\infty$ , then we call  $\phi$  an analytic in  $D_R$  characteristic function of the law  $F$ . Further we always assume that  $D_R$  is the maximal disk of the analyticity of  $\phi$ . It is known [5, p. 37-38] that  $\phi$  is an analytic in  $D_R$  characteristic function of the law  $F$  if and only if  $W_F(x) = O(e^{-rx})$  as  $0 \leq x \rightarrow +\infty$  for every  $r \in [0; R)$ . Hence  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)} = R$ , i. e.  $R = R_F$  and if  $R_F = +\infty$  then  $\phi$  is an entire function.

Let  $M(r, \phi) = \max\{|\phi(x)| : |z| = r\}$  and  $\rho_{\alpha, \beta}[\phi] := \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{1}{\beta(r)} \alpha\left(\frac{\ln M(r, \phi)}{r}\right)$ ,  $\alpha \in L, \beta \in L$  be a generalized order of the function  $\phi$ . In [3] is proved that if either  $\alpha \in L_{si}$  and  $\beta \in L^0$  or  $\alpha \in L^0$  and  $\beta \in L_{si}$  then  $\rho_{\alpha, \beta}[\phi] = \omega_{\alpha, \beta}[F]$ .

On the other hand [5, p. 13], if  $F = F_1 * F_2$  then for the corresponding characteristic functions the equality  $\varphi(z) = \varphi_1(z) \cdot \varphi_2(z)$  is true.

Therefore, we need to prove that

$$\rho_{\alpha, \beta}[\varphi] \leq \max\{\rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1], \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_2]\}, \quad (1)$$

and if  $\rho_{\alpha, \beta}[\varphi_2] < \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1]$  then

$$\rho_{\alpha, \beta}[\varphi] = \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1] \quad (2)$$

At first we suppose that  $\max\{\rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1], \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_2]\} = \rho < +\infty$ . Then for every  $\varepsilon > 0$  and all  $r \geq r_0(\varepsilon)$

$$\begin{aligned} \frac{\ln M(r, \varphi_j)}{r} &\leq \alpha^{-1}((\rho_{\alpha, \beta}[\varphi_j] + \varepsilon)\beta(r)) \leq \\ &\leq \alpha^{-1}((\rho + \varepsilon)\beta(r)), \end{aligned}$$

and in view of the equality  $\varphi(z) = \varphi_1(z) \cdot \varphi_2(z)$  we have

$$\begin{aligned} \frac{\ln M(r, \varphi)}{r} &\leq \frac{\ln M(r, \varphi_1)}{r} + \\ &+ \frac{\ln M(r, \varphi_2)}{r} \leq 2\alpha^{-1}((\rho + \varepsilon)\beta(r)) \end{aligned}, \quad j = 1; 2.$$

Since  $\alpha \in L_{si}$ , hence it follows that  $\rho_{\alpha, \beta}[\varphi] \leq \rho + \varepsilon$ , and in view of the arbitrariness of  $\varepsilon$  we obtain the inequality  $\rho_{\alpha, \beta}[\varphi] \leq \rho$ , which is obvious when  $\rho = +\infty$ . Inequality (1) is proved.

If  $\rho_{\alpha, \beta}[\varphi_2] < \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1]$  then (1) implies the inequality  $\rho_{\alpha, \beta}[\varphi] < \rho_{\alpha, \beta}[\varphi_1]$ . In order to prove a contrary inequality we write down  $\varphi_1(z) = \varphi(z)/\varphi_2(z)$  and use results of value distribution theory.

Let  $T(r, f)$  be Nevanlinna characteristic of the function  $f$  meromorphic in the disk  $D_R$ ,  $0 < R \leq +\infty$ . It is know [2, p. 45] that if  $f_1$  and  $f_2$  are meromorphic functions in  $D_R$  and  $f(z) = f_1(z) \cdot f_2(z)$  then  $T(r, f) \leq T(r, f_1) + T(r, f_2)$  and  $T(r, 1/f) = T(r, f) + o(1)$  as  $r \uparrow R$ .

Therefore,

$$\begin{aligned} T(r, \varphi_1) &\leq T(r, \varphi) + T(r, 1/\varphi_2) = \\ &= T(r, \varphi) + T(r, \varphi_2) + o(1), \quad r \uparrow R_F \end{aligned} \quad (3)$$

On the other hand, if the function  $f$  is analytic in  $D_R$  then [2, p. 54] for  $0 < r_1 < r_2 < R$

$$T(r_1, f) \leq \ln^+ M(r_1, f) \leq \frac{r_2 + r_1}{r_2 - r_1} T(r_2, f). \quad (4)$$

Since  $R = R_F = +\infty$ , choosing  $r_1 = r$  and  $r_2 = (1 + \delta)r$ ,  $\delta > 0$ , from (4) for the function  $\varphi_1$  we obtain  $T(r, \varphi_1) \leq \ln^+ M(r, \varphi_1) \leq \frac{2 + \delta}{\delta} T((1 + \delta)r, \varphi_1)$ , whence in view of (3)

$$\frac{\delta}{(2+\delta)(1+\delta)} \frac{\ln M(r/(1+\delta), \varphi_1)}{r/(1+\delta)} \leq \frac{T(r, \varphi_1)}{r} \leq \frac{\ln M(r, \varphi)}{r} + \frac{\ln M(r, \varphi_2)}{r} + o(1)$$

$r \rightarrow +\infty$  and in view of the conditions  $\alpha \in L_{si}$  we get

$$\overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{1}{\beta(r)} \alpha \left( \frac{\ln M(r/(1+\delta), \varphi_1)}{r/(1+\delta)} \right) \leq \max \{ \rho_{\alpha, \beta} [\varphi], \rho_{\alpha, \beta} [\varphi_2] \}$$

On the other hand,

$$\begin{aligned} \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{1}{\beta(r)} \alpha \left( \frac{\ln M(r/(1+\delta), \varphi_1)}{r/(1+\delta)} \right) &= \\ &= \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{1}{\beta(r/(1+\delta))} \alpha \left( \frac{\ln M(r/(1+\delta), \varphi_1)}{r/(1+\delta)} \right) \geq \\ &\geq \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{1}{\beta(r)} \alpha \left( \frac{\ln M(r, \varphi_1)}{r} \right) \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{\beta(r)}{\beta((1+\delta)r)} = \\ &= \rho_{\alpha, \beta} [\varphi_1] \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{\beta(r)}{\beta((1+\delta)r)} \end{aligned}$$

Thus

$$\rho_{\alpha, \beta} [\varphi_1] \leq \max \{ \rho_{\alpha, \beta} [\varphi], \rho_{\alpha, \beta} [\varphi_2] \} \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \frac{\beta((1+\delta)r)}{\beta(r)}$$

Since  $\beta \in L^0$ , we have [10]  $B[\delta] = \overline{\lim}_{r \rightarrow +\infty} \beta((1+\delta)r)/\beta(r) \downarrow 1$  as  $\delta \downarrow 0$ . Therefore, in view of the arbitrariness of  $\delta$  we obtain the inequality  $\rho_{\alpha, \beta} [\varphi_1] \leq \max \{ \rho_{\alpha, \beta} [\varphi], \rho_{\alpha, \beta} [\varphi_2] \}$ , and since  $\rho_{\alpha, \beta} [\varphi_1] > \rho_{\alpha, \beta} [\varphi_2]$ , we get  $\rho_{\alpha, \beta} [\varphi_1] \leq \rho_{\alpha, \beta} [\varphi]$ , i. e. (2) holds. Theorem 1 is proved.

We remark that for example the functions  $\alpha(x) \equiv \ln x$  and  $\beta(x) \equiv x$  for  $x \geq x_0$  satisfy the conditions of Theorem 1.

Now we consider the case  $0 < R_F = R < \infty$ . Suppose that

$$\overline{\lim}_{x \uparrow R_F} W_F(x) e^{Rx} = +\infty, \quad (5)$$

and for the study of the asymptotic behavior of  $W_F(x) e^{Rx}$  we put

$$\omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F] := \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \frac{\alpha(x)}{\beta(x/\ln^+(W_F(x) e^{Rx}))}$$

As in [2], the generalized order of an analytic in  $D_R$ ,  $0 < R < +\infty$ , characteristic function  $\varphi$  of probability law  $F$  we define by the formula

$$\rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi] := \overline{\lim}_{r \uparrow R} \frac{\alpha(\ln M(r, \varphi))}{\beta(1/(R-r))}$$

Lemma 1. [3]. Let  $\alpha \in L_{si}$ ,  $\beta \in L_{si}$  and  $\varphi$  be of an analytic in  $D_R$ ,  $R < +\infty$ , characteristic function  $\phi$  of

probability law  $F$ , satisfying condition (5).

If  $\beta^{-1}(c\alpha(x))/x \rightarrow 0$  and  $\alpha(x/\beta^{-1}(c\alpha(x))) = (1+o(1))\alpha(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  for each  $c \in (0; +\infty)$  then  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi] = \omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F]$ .

Using Lemma 1 we prove the next theorem.

Theorem 2. Let  $R_{F_1} = R_{F_2} = R \in (0, +\infty)$  and (5) holds for  $F = F_j$ ,  $j = 1; 2$ . Suppose that the functions  $\alpha \in L_{si}$  and  $\beta \in L_{si}$  satisfy the conditions of Lemma 2 and  $\alpha(x\alpha^{-1}(c\beta(x))) = (1+o(1))c\beta(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  for each  $c \in (0; +\infty)$ . Then

$$\omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_1 * F_2] \leq \max \{ \omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_1], \omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_2] \}, \quad (6)$$

and if moreover  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_2] < \omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_1]$  then

$$\omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}^{(R)} [F_1] \quad (7)$$

*Proof.* Suppose that  $\max \{ \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi_1], \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi_2] \} = \rho < +\infty$ . Then

$\ln M(r, \varphi_j) \leq \alpha^{-1}((\rho + \varepsilon)\beta(1/(R-r)))$  for every  $\varepsilon > 0$  and all  $r \in (r_0(\varepsilon), R)$  and, thus,

$$\begin{aligned} \ln M(r, \varphi) &\leq \ln M(r, \varphi_1) + \\ &+ \ln M(r, \varphi_2) \leq 2\alpha^{-1}((\rho + \varepsilon)\beta(1/(R-r))) \end{aligned}$$

Since  $\alpha \in L_{si}$ , hence it follows that  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi] \leq \rho + \varepsilon$ , and in view of the arbitrariness of  $\varepsilon$  we obtain the inequality  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi] \leq \rho$ , which is obvious when  $\rho = +\infty$ . Thus,  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi] \leq \max \{ \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi_1], \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi_2] \}$ , and by Lemma 1 inequality (6) is true.

Further, choosing  $r_1 = r$  and  $r_2 = r + (R-r)/2$  from (4) for the function  $\varphi_1$  we have

$$\begin{aligned} T(r, \varphi_1) &\leq \ln^+ M(r, \varphi_1) \leq \frac{3r+R}{R-r} T\left(r + \frac{R-r}{2}, \varphi_1\right) \\ &\leq \frac{4R}{R-r} T\left(r + \frac{R-r}{2}, \varphi_1\right) \end{aligned}$$

i. e. in view of conditions  $\alpha \in L_{si}$  and  $\beta \in L_{si}$

$$\begin{aligned} \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [T(r, \varphi_1)] &:= \overline{\lim}_{r \uparrow R} \frac{\alpha(T(r, \varphi_1))}{\beta(1/(R-r))} \leq \\ &\overline{\lim}_{r \uparrow R} \frac{\alpha(\ln M(r, \varphi_1))}{\beta(1/(R-r))} = \rho_{\alpha, \beta}^{(R)} [\varphi_1] \leq \\ &\overline{\lim}_{r \uparrow R} \frac{\alpha\left(\frac{2R}{R-r-(R-r)/2} T\left(r + \frac{R-r}{2}, \varphi_1\right)\right)}{\beta(1/(R-r-(R-r)/2))} \\ &\leq \frac{\beta(2/(R-r))}{\beta(1/(R-r))} \end{aligned}$$

$$= \lim_{r \uparrow R} \frac{\alpha(T(r, \varphi_1)/(R-r))}{\beta(1/(R-r))}.$$

But by the definition of  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[T]$  we have  $T(r, f) \leq \alpha^{-1}(\rho\beta(1/(R-r)))$  for every  $\rho > \rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[T]$  and all  $r \in [r_0(\rho), R)$ . Therefore, since  $\alpha(x\alpha^{-1}(c\beta(x))) \leq (1+0(1))c\beta(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ , we obtain

$$\begin{aligned} \lim_{r \uparrow R} \frac{\alpha(T(r, \varphi_1)/(R-r))}{\beta(1/(R-r))} &\leq \\ \lim_{r \uparrow R} \frac{\alpha((1/(R-r))\alpha^{-1}(\rho\beta(1/(R-r))))}{\beta(1/(R-r))} &= \\ = \lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{\alpha(x\alpha^{-1}(\rho\beta(x)))}{\beta(x)} &= \rho \end{aligned}$$

and in view of the arbitrariness of  $\rho$  the equality  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[T] = \rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[f]$  is true. Thus, (3) implies the inequality  $\rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[\varphi_1] \leq \max\{\rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[\varphi], \rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[\varphi_2]\}$ , that is by Lemma 1 inequality (6) is proved. If  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1]$  then by this lemma  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1] = \rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[\varphi_1] \leq \rho_{\alpha, \beta}^{(R)}[\varphi] = \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F]$ . Theorem 2 is proved.

We remark that for example the functions  $\alpha(x) \equiv \ln \ln x$  and  $\beta(x) \equiv \ln x$  for  $x \geq x_0$  satisfy the conditions of Theorem 2.

2. Connections in terms of convergence classes. Let  $B$  be a positive continuously differentiable and increasing to  $+\infty$  function on  $(0; R)$ . If  $F$  is a probability law and  $R = R_F$  then  $\lim_{x \rightarrow +\infty} \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)} = R$ . Here we find conditions, under which the correlations

$$\int_{x_0}^R \frac{dx}{B\left(\frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_{F_j}(x)}\right)} < +\infty, \quad j = 1, 2 \quad (8)$$

Imply for  $F = F_1 * F_2$  the correlation

$$\int_{x_0}^R \frac{dx}{B\left(\frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)}\right)} < +\infty. \quad (9)$$

At first we consider a convergence  $\Phi$ -class. Let  $0 < R \leq +\infty$  and  $\Omega(R)$  be a class of positive unbounded functions  $\Phi$  on  $(0, R)$  such that the derivative  $\Phi'$  is positive continuously differentiable and increasing to  $+\infty$  on  $(0; R)$ . For  $\Phi \in \Omega(R)$ , as in [1,4,6], we say that an analytic in  $D_R$  function  $\varphi$  belongs to a convergence  $\Phi$ -class if

$$\int_{r_0}^R \frac{\Phi'(r) \ln M(r, \varphi)}{\Phi^2(r)} dr < +\infty \quad (10)$$

Finally, by  $V(R)$  we denote a class of positive continuously differentiable on  $(0, +\infty)$  functions  $v$  such that  $v'(x) \uparrow R$  as  $x \uparrow +\infty$ . In [4] the following result is proved.

*Lemma 2.* Let  $0 < R \leq +\infty$  and the function  $\Phi \in \Omega(R)$  satisfies the conditions:

- 1) the function  $\Phi'(r)/\Phi(r)$  is nondecreasing on  $[r_0, R)$ ;
- 2)  $\Phi'(r)(R-r) > 1$  for all  $r \in [r_0; R)$ ;
- 3)  $\Phi'(r+1/\Phi'(r)) \leq H_1\Phi'(r)$  for all  $r \in [r_0; R)$ ,  $H_1 = const > 0$ ;
- 4)  $\frac{\Phi''(r)\Phi(r)}{(\Phi'(r))^2} \leq H_2 < +\infty$  for all  $r \in [r_0; R)$ ;
- 5)  $\int_{r_0}^R \frac{\Phi'(r) \ln \Phi'(r)}{\Phi^2(r)} dr < +\infty$

Suppose that  $\varphi$  is an analytic in  $D_R$  characteristic function on probability law  $F$  such that (5) holds. Then in order that  $\phi$  belongs to a convergence  $\Phi$ -class it is necessary and in the case, when  $\ln(1/W_F(x)) = v(x) \in V(R)$  it is sufficient that

$$\int_{x_0}^R \frac{dx}{\Phi' \left( \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)} \right)} < +\infty. \quad (11)$$

We remark that the condition 5) in this lemma is unnecessary. Indeed, by condition 4) we have

$$\begin{aligned} \int_{r_0}^R \frac{\Phi'(r) \ln \Phi'(r)}{\Phi^2(r)} dr &= \int_{r_0}^R \ln \Phi'(r) d\left(-\frac{1}{\Phi(r)}\right) = \\ &= -\frac{\ln \Phi'(r)}{\Phi(r)} \Big|_{r_0}^R + \int_{r_0}^R \frac{d \ln \Phi'(r)}{\Phi(r)} \leq \\ &\leq \int_{r_0}^R \frac{\Phi''(r)}{\Phi'(r)\Phi(r)} dr + const = \\ &= \int_{r_0}^R \frac{\Phi''(r)\Phi'(r)\Phi(r)}{(\Phi'(r))^2\Phi^2(r)} dr + const \leq \\ &H_2 \int_{r_0}^R \frac{\Phi'(r)}{\Phi^2(r)} dr + const < +\infty. \end{aligned}$$

*Theorem 3.* Let  $0 < R \leq +\infty$  and the function  $\Phi \in \Omega(R)$  satisfy the condition 1)-4) of Lemma 2. Let  $B$  be a positive continuously differentiable and increasing to  $+\infty$  function on  $(0, R)$  such that  $B(x) \asymp \Phi'(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ . Suppose that  $R_{F_j} = R \in (0, +\infty)$ ,

$\ln(1/W_{F_j}(x)) = v_j(x) \in V(R)$  and (5) holds for  $F = F_j, j = 1; 2$ . Then (8) implies (9).

*Proof.* Since  $B(x) \asymp \Phi'(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ , from (8) for  $j = 1; 2$  we obtain (11) with  $W_{F_j}(x)$  instead  $W_F(x)$ , and by Lemma 2 for corresponding characteristic function we obtain (10) with  $\varphi_j$  instead  $\phi$ . But  $\ln M(r, \varphi) \leq \ln M(r, \varphi_1) + \ln M(r, \varphi_2)$ . Therefore, (10) holds and by Lemma 2 (11) holds. Since  $B(x) \asymp \Phi'(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ , (11) implies (9). Theorem 3 is proved.

Consequence 1. Let  $0 < \rho < +\infty$  and  $F_1$  and  $F_2$  be probability laws such that  $R_{F_j} = \infty$  and  $\ln(1/W_{F_j}(x)) = v_j(x) \in V(R)$ . If

$$\int_{x_0}^{\infty} W_{F_j}(x)^{\rho/x} dx < +\infty \text{ then } \int_{x_0}^{\infty} W_{F_1 * F_2}(x)^{\rho/x} dx < +\infty.$$

Indeed, if we choose  $B(x) = \Phi(x) = e^{\rho x}$  then the function  $\Phi$  satisfies conditions 1) - 4) of Lemma 2 and  $B(x) \asymp \Phi'(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$ . Since

$B\left(\frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)}\right) = \frac{1}{W_F(x)^{\rho/x}}$ . Consequence 1 is proved.

We remark that if  $R = +\infty$  and  $\Phi(x) = e^{\rho x}$  then condition (10) is equivalent to the condition  $\int_{r_0}^{\infty} e^{-\rho r} \ln M(r, \varphi) dr < +\infty$ . A generalization of this correlation is the correlation  $\int_{r_0}^{\infty} (\alpha(\ln M(r, \varphi))/\beta(r)) dr < +\infty$ , where  $\alpha \in L$  and  $\beta \in L$ , and if this condition holds then [7]-[9] on definition an entire function  $\phi$  belongs to a generalized convergence  $\alpha\beta$ -class. Here we will some modify this definition and will say that an entire function  $\phi$  belongs to a modified generalized convergence  $\alpha\beta$ -class if

$$\int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{\beta(r)} \alpha\left(\frac{M(r, \varphi)}{r}\right) dr < +\infty, (\alpha \in L, \beta \in L). \quad (12)$$

The following analog of Lemma 2 is true.

Lemma 3. Let  $\alpha \in L^0$  and  $\beta \in L^0$  be the continuously differentiable functions, satisfying the conditions:  $\alpha'(x) \downarrow \alpha \geq 0$  as  $x_0 \leq x \rightarrow +\infty$ ,  $x\beta'(x)/\beta(x) \geq h > 0$  for  $x \geq x_0$  and  $\int_{x_0}^{\infty} (\alpha(x)/\beta(x)) dx < +\infty$ . Let  $\varphi$  be an entire characteristic function of probability law  $F$  such that  $\ln(1/W_F(x)) = v(x) \in V(+\infty)$  Then in order that  $\varphi$

belongs to the modified generalized convergence  $\alpha\beta$ -class it is necessary and sufficient that

$$\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x) \beta_1\left(\frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)}\right) dx < +\infty, \beta_1(x) = \int_x^{\infty} \frac{dr}{\beta(r)} \quad (13)$$

*Proof.* In [5, p. 54-55] is proved that  $W_F(x)e^{xr} \leq 2M(r, \varphi)$  and

$M(r, \varphi) \leq 1 + W_F(+0) + r \int_0^{+\infty} W_F(x)e^{xr} dx$  for each  $r \in [0, +\infty)$  and all  $x \geq 0$ . We put

$$\mu(r, \varphi) = \sup\{W_F(x)e^{xr} : x \geq 0\} \text{ and}$$

$$I(r, \varphi) = \int_0^{\infty} W_F(x)e^{xr} dx. \text{ Then}$$

$$\ln \mu(r, \varphi) \leq (1 + o(1)) \ln M(r, \varphi) \leq (1 + o(1)) \ln I(r, \varphi), r \rightarrow +\infty. \quad (14)$$

But

$$I(r, \varphi) = \int_0^{+\infty} W_F(x) \exp\{x(r + e^{-r})\} \exp\{-xe^{-r}\} dx \leq \mu(r + e^{-r}, \varphi) e^r,$$

whence

$$\alpha((\ln I(r, \varphi))/r) \leq \alpha((\ln \mu(r + e^{-r}, \varphi))/r + 1),$$

and, since  $\alpha \in L^0$  and  $\beta \in L^0$ ,

$$\frac{\alpha((\ln I(r, \varphi))/r)}{\beta(r)} \leq (1 + o(1)) \frac{\alpha((\ln \mu(r + e^{-r}, \varphi))/r)}{\beta(r + e^{-r})}$$

Hence and from (14) it follows that condition (12) holds if and only if

$$\int_{r_0}^{+\infty} \frac{\alpha((\ln \mu(r, \varphi))/r)}{\beta(r)} dr < +\infty \quad (15)$$

As in [4], let  $v(r, \varphi)$  be central point of the maximum  $\mu(r, \varphi)$  of the integrand. Then [4]  $v(r, \varphi) \rightarrow +\infty$  as  $r \rightarrow +\infty$  and  $\ln \mu(r, \varphi) = \ln \mu(r_0, \varphi) + \int_{r_0}^r v(x, \varphi) dx$ .

Hence

$$v(r, \varphi)(r - r_0) \geq \ln \mu(r, \varphi) - \ln \mu(r_0, \varphi) \geq \int_{r/2}^r v(x, \varphi) dx \geq v(r/2, \varphi)r/2$$

and, since  $\alpha \in L^0$  and  $\beta \in L^0$ , condition (15) holds if and only if

$$\int_{r_0}^{+\infty} \frac{\alpha(v(r, \varphi))}{\beta(r)} dr < +\infty. \quad (16)$$

We remark that if  $\ln(1/W_F(x)) = v(x) \in V(R)$  then for every  $r \in (0, R)$  the function  $\ln W_F(x) + rx = -v(x) + rx$  has unique point of the maximum  $x = v(r, \varphi)$  which is increasing and continuous on  $(0, R)$ , and

$$\ln \mu(r, \varphi) = \max \{ \ln W_F(x) + rx : x \geq 0 \} = \ln W_F(v(r, \varphi)) + rv(r, \varphi) \quad (17)$$

Since  $\int_{x_0}^{\infty} dx/\beta(x) < +\infty$ , we have

$$\beta_1(x) = \int_x^{\infty} dr/\beta(r) \downarrow 0 \text{ as } x \rightarrow +\infty \text{ and}$$

$$\int_{r_0}^{+\infty} \frac{\alpha(v(r, \varphi))}{\beta(r)} dr = - \int_{r_0}^{\infty} \alpha(v(r, \varphi)) d\beta_1(r) = -\alpha(v(r, \varphi))\beta_1(r) \Big|_{r_0}^{\infty} + \int_{r_0}^{\infty} \beta_1(r) \alpha'(v(r, \varphi)) dv(r)$$

and, since  $\alpha(v(r, \varphi))\beta_1(r) > 0$ , hence it follows that condition (16) is equivalent to the condition

$$\int_{r_0}^{\infty} \alpha'(v(r, \varphi))\beta_1(r) dv(r) < +\infty. \quad (18)$$

From (17) it follows that  $W_F(v(r, \varphi)) + rv(r, \varphi) \geq 0$  for all  $r$  enough large.

Therefore,  $r \geq \frac{1}{v(r, \varphi)} \ln \frac{1}{W_F(v(r, \varphi))}$  and, thus,

$$\int_{r_0}^{\infty} \alpha'(v(r, \varphi))\beta_1(r) dv(r) \leq \int_{r_0}^{\infty} \alpha'(v(r, \varphi))\beta_1 \left( \frac{1}{v(r, \varphi)} \ln \frac{1}{W_F(v(r, \varphi))} \right) dv(r) < +\infty$$

provided condition (13) holds. The sufficiency of (13) is proved.

Now we prove its necessity.

Since  $x = v(r, \varphi)$  is a solution of the equation  $-v(x)+r=0$ , we have  $r = v'(v(r, \varphi))$  and from (18)

obtain  $\int_{r_0}^{\infty} \alpha'(v(r, \varphi))\beta_1(v'(v(r, \varphi))) dv(r) < +\infty$ , i.e.

$$\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1(v'(x)) dx < +\infty \quad (19)$$

From a theorem proved in [9] it follows that if  $\alpha(x)$  and  $\mu(x)$  are continuous functions on  $(0, +\infty)$ ,  $-\infty \leq A < \alpha(x) < B \leq +\infty$ ,  $\mu(x) \downarrow \mu \geq 0$  as  $x \rightarrow +\infty$ , and for a positive function  $f$  on  $(A, B)$  the function  $f^{1/p}$  is convex on  $(A, B)$ , then

$$\int_0^y \mu(x) f \left( \frac{1}{x} \int_0^x a(t) dt \right) dx \leq \left( \frac{p}{p-1} \right)^p \int_0^y \mu(x) f(\alpha(x)) dx, \quad y \leq +\infty. \quad (20)$$

We choose,  $\mu(x) = \alpha'(x)$ ,  $\alpha(x) = v'(x)$ ,  $f(x) = \beta_1(x)$  and shown that the function  $\beta_1^{1/p}$  is convex for some  $p > 1$ . Indeed,

$$(\beta_1^{1/p}(x))^n = \frac{1}{p} \beta_1^{1/p-2}(x) \left( \beta_1(x)\beta_1''(x) - \frac{p-1}{p} (\beta_1'(x))^2 \right),$$

$$\begin{aligned} \beta_1(x)\beta_1''(x) - \frac{p-1}{p} (\beta_1'(x))^2 &= \\ &= \frac{1}{\beta^2(x)} \left( \beta'(x) \int_x^{\infty} \frac{dr}{\beta(r)} - \frac{p-1}{p} \right) \end{aligned}$$

and in view of the condition  $x\beta'(x)/\beta(x) \geq h > 0$  for  $x \geq x_0$

$$\beta'(x) \int_x^{\infty} dr/\beta(r) \geq \beta'(x) \int_x^{2x} dr/\beta(r) \geq x\beta'(x)/\beta(x) \geq h > 0.$$

Therefore, choosing  $p > 1$  such that  $h - \frac{p-1}{p} \geq 0$ ,

we get the inequality  $(\beta_1^{1/p}(x))'' \geq 0$  for  $x \geq x_0$ , that is the function  $\beta_1^{1/p}(x)$  is convex and in view of (20)

$$\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1 \left( \frac{1}{x} \int_{x_0}^x v'(t) dt \right) dx \leq \left( \frac{p}{p-1} \right)^p \int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1(v'(x)) dx < +\infty \quad (21)$$

$$dx \leq \left( \frac{p}{p-1} \right)^p \int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1(v'(x)) dx < +\infty$$

$$\int_{x_0}^x v'(t) dt = \ln \frac{1}{W_F(x)} - \ln \frac{1}{W_F(x_0)} = (1 + o(1)) \ln \frac{1}{W_F(x)}, \quad x \rightarrow +\infty$$

and by condition  $\beta \in L^0$  the relation  $\beta_1(x(1+o(1))) = (1+o(1))\beta_1(x)$  as  $x \rightarrow +\infty$  holds, (21) implies (13). The proof of Lemma 3 is completed.

**Theorem 4.** Let the functions  $\alpha$  and  $\beta$  satisfy the conditions of Lemma 3. Suppose that  $R_{F_j} = +\infty$ ,

$$\ln(1/W_F(x)) = v(x) \in V(+\infty) \quad \text{and}$$

$$\ln(1/W_{F_j}(x)) = v_j(x) \in V(+\infty) \text{ for } j = 1; 2.$$

If

$$\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1 \left( \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_{F_j}(x)} \right) dx < +\infty \quad (22)$$

then

$$\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x)\beta_1 \left( \frac{1}{x} \ln \frac{1}{W_F(x)} \right) dx < +\infty \quad (23)$$

*Proof.* In view of (22) by Lemma 3 the corresponding characteristic functions  $\varphi_j$  belong to the modified generalized convergence  $\alpha\beta$ -class. Since  $\ln M(r, \varphi) \leq \ln M(r, \varphi_1) + \ln M(r, \varphi_2)$  and  $\alpha \in L^0$ , we have

$$\begin{aligned} \alpha((\ln M(r, \varphi))/r) &\leq \\ &\leq \alpha \left( 2 \max \left\{ (\ln M(r, \varphi_1))/r, (\ln M(r, \varphi_2))/r \right\} \right) \leq \\ &\leq K \max \left\{ \alpha((\ln M(r, \varphi_1))/r), \alpha((\ln M(r, \varphi_2))/r) \right\} \leq \end{aligned}$$

$\leq K(\alpha((\ln M(r, \varphi_1))/r) + \alpha((\ln M(r, \varphi_2))/r)) < +\infty$ , whence it follows that  $\varphi$  belongs to the modified generalized convergence  $\alpha\beta$ -class and, thus, by Lemma 3 (23) holds. Theorem 4 is proved.

**Conclusions.** Established connections between the decrease of function  $W_{F_1 * F_2}$  and the decrease of functions  $W_{F_1}$  and  $W_{F_2}$  in terms of generalized orders and convergence classes.

**References:**

1. Filevych P.V., Sheremeta M.M. (2003) On a convergence class for entire functions. Bull. Soc. Lettres Lodz 53 Ser. Rech. Deform., no. 40, pp. 5–16.
2. Gol'dberg A.A., Ostrovskii I.V. (1970) Value distribution of meromorphic functions. Moskow. Nauka. (in Russian).
3. Kinash O.M., Parolya M.I., Sheremeta M.M. (2012) Growth of characteristic functions of probability laws. Dopovidi NAN of Ukraine, no. 8, pp. 13–17.
4. Kulyavets' L.V., Mulyava O.M. Sheremeta M.M. (2013) On belonging of characteristic functions of probability laws to a convergence class. Bull. Soc. Sci. Lett. Lodz, Ser Rech. Deform., vol. 63, no. 2, pp. 9–22.
5. Linnik Ju.V., Ostrovskii I.V. (1972) Decompositon of random variables and vektors, Moskow. Nauka. (in Russian).
6. Mulyava O.M., Sheremeta M.M. (2000) On a convergence class for Dirichlet series. Bull. Soc. Lettres Lodz 50 Ser. Rech. Deform., no.30, pp. 64–69.
7. Mulyava O.M. (1999) Convergence classes in the thery of Dirichlet series. Dopovidi NAN of Ukraine, no. 3, pp. 35-39.
8. Mulyava O.M. (1999) On convergence classes of Dirichlet series. Ukr. Math. Journ., vol. 51, no. 11, pp. 1485–1494.
9. Mulyava O.M. (2006) Integral analog of one generalization of the Hardy inequality and its applications. Ukr. Math. Journ., vol. 58, no. 9, pp. 1271–1275.
10. Sheremeta M.M. (2003) On two classes of positive functions and belonging to them of main characteristic of entire functions. Mat. Stud., vol. 19, no. 1, pp. 73–82.

**Мулява О.М., Шеремета М.М. КОМПОЗИЦІЯ ЙМОВІРНІСНИХ ЗАКОНІВ**

Невід'ємна і неспадна, неперервна зліва на проміжку  $(-\infty, +\infty)$  функція  $F$  називається ймовірнісним законом, якщо  $\lim_{x \rightarrow +\infty} F(x) = 1$  і  $\lim_{x \rightarrow -\infty} F(x) = 0$ , а композиція двох ймовірнісних законів  $F_1$  and  $F_2$  визначається

рівністю  $F(s) = (F_1 * F_2)(s) := \int_{-\infty}^{\infty} F_1(x-s) dF_2(x)$ . Якщо для  $x \geq 0$  ми покладемо  $W_F(x) = 1 - F(x) + F(-x)$ , тоді

$W_F(x) \searrow 0$  при  $x \rightarrow +\infty$ . У статті досліджено зв'язок між спаданням функції  $W_{F_1 * F_2}$  і спаданням функцій  $W_{F_1(x)}$  and  $W_{F_2(x)}$  в термінах узагальнених порядків та класів збіжності. Для цього через  $L$  позначимо

клас неперервних невід'ємних на  $(-\infty, +\infty)$  функцій  $\alpha$  таких, що  $\alpha(x) = \alpha(x_0) \geq 0$  для  $x \leq x_0$  і  $\alpha(x) \uparrow +\infty$  при  $x_0 \leq x \rightarrow +\infty$ . Кажуть, що  $\alpha \in L^0$ , якщо  $\alpha \in L$  і  $\alpha((1+o(1))x) = (1+o(1))\alpha(x)$  при  $x \rightarrow +\infty$ . Нарешті,  $\alpha \in L_{si}$ , якщо  $\alpha \in L$  і  $\alpha(cx) = (1+o(1))\alpha(x)$  при  $x \rightarrow +\infty$  для будь-якого фіксованого  $c \in (0, +\infty)$ , тобто  $\alpha$  є повільно зростаюча функція. Поклавши  $R_F = \lim_{x \rightarrow +\infty} ((1/x) \ln(1/W_F(x)))$ , два випадки  $R_F = +\infty$  і  $R_F < +\infty$  розглядаються

окремо. Для  $R_F = +\infty$  введено таку характеристику  $\omega_{\alpha, \beta}[F] := \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} \alpha(x) / \beta((1/x) \cdot \ln(1/W_F(x)))$  і доведено,

що якщо  $\alpha \in L_{si}$  і  $\beta \in L^0$ , то  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] \leq \max\{\omega_{\alpha, \beta}[F_1], \omega_{\alpha, \beta}[F_2]\}$  і, крім того, якщо  $\omega_{\alpha, \beta}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$ , тоді  $\omega_{\alpha, \beta}[F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}[F_1]$ . Якщо  $0 < R_F = R < +\infty$  і  $\overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty} W_F(x) e^{Rx} = +\infty$ , ми покладемо  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F] = \overline{\lim}_{x \rightarrow +\infty}$

$\alpha(x) / \beta(x \ln^+(W_F(x) \cdot e^{Rx}))$ . Доведено, що якщо  $R_{F_1} = R_{F_2} = R \in (0, +\infty)$ ,  $\alpha \in L_{si}$ ,  $\beta \in L_{si}$ ,  $\alpha(c\beta(x)) = (1+o(1))\alpha(x)$  і  $\alpha(x/\beta^1(c\alpha(x))) = (1+o(1))\alpha(x)$  при  $x \rightarrow +\infty$  для будь-якого  $c \in (0; +\infty)$ , тоді  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1 * F_2] \leq \max\{\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1], \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_2]\}$  і, крім того, якщо  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_2] < \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1]$ , тоді  $\omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1 * F_2] = \omega_{\alpha, \beta}^{(R)}[F_1]$ .

Зв'язок між спаданням функції  $W_{F_1 * F_2}(x)$  і спаданням функцій  $W_{F_1}(x)$  і  $W_{F_2}(x)$  вивчено також у термінах класів збіжності. За певних умов на функції  $\alpha$ ,  $\beta$  і  $W_{F_j}(x)$  доведено, наприклад, що якщо

$R_F = +\infty$  і  $\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x) \beta_j((1/x) \cdot \ln(1/W_{F_j}(x))) dx < +\infty$  для  $j=1, 2$ , де  $\beta_j(x) = \int_x^{\infty} dr / \beta(r)$ , то  $\int_{x_0}^{\infty} \alpha'(x) \beta_j((1/x) \cdot \ln(1/W_{F_1 * F_2}(x))) dx < +\infty$ .

**Ключові слова:** ймовірнісний закон, композиція ймовірнісних законів, узагальнені порядки, класи збіжності, спадання функції.

*Петлінський І.І.*

Державний університет «Одеська політехніка»

## АКТУАЛЬНІСТЬ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ПОТУЖНОСТІ ЕНЕРГОБЛОКА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ З РІДКИМ ПОГЛИНАЧЕМ

*Надзвичайно висока енергоємність і значні природні запаси ядерного палива сприяють широкому застосуванню ядерної енергії на транспорті, в енергетиці, космічній техніці.*

*Основною метою експлуатації АЕС в Україні є виробництво електроенергії. Найкращим режимом роботи ядерних реакторів з точки зору безпеки і надійності є режим роботи на номінальному рівні потужності. Але на практиці енергосистема накладає свої вимоги, тож необхідно забезпечення можливості змінювати потужність енергоблоку, щоб забезпечити режим проходження за навантаженням. Тому до сучасних систем автоматизації реакторних установок пред'являються підвищені вимоги, що в першу чергу стосується алгоритмів управління технологічними процесами, які повинні забезпечувати надійні та безпечні умови експлуатації.*

*Пріоритетними залишаються питання управління реакторними установками з водо-водяними енергетичними реакторами (ВВЕР) одиничною потужністю 1000 МВт, в яких безпосередньо відбувається ядерна реакція: в разі аварії реакторні установки є основними джерелами радіоактивного забруднення навколишнього середовища.*

*Застосування борного регулювання для управління реакторами типу ВВЕР-1000 дозволяє збільшити час роботи на максимальній потужності, забезпечуючи економічну ефективність експлуатації енергоблоку, а також підтримувати РУ в потрібних безпечних межах, які унеможливають виникнення і розвиток аварійних ситуацій.*

*У розробці та реалізації алгоритмів керування процесом борного регулювання доцільно прогнозувати зміну основних параметрів роботи енергоблоку з використанням систем імітаційного моделювання.*

*Надзвичайно важливою обставиною є той факт, що атомна енергетика довела свою економічну ефективність практично у всіх районах земної кулі. Крім того, навіть при великому масштабі енерговиробництва на АЕС атомна енергетика не створює транспортних проблем, оскільки вимагає малих транспортних витрат, звільняє суспільство від постійних перевезень органічного палива. У даний час на АЕС України експлуатується одинадцять РУ з ВВЕР-1000. Вони входять до складу Запорізької, Рівненської, Хмельницької та Південно-Української АЕС. Останні генерують близько 93% електроенергії українських АЕС і дозволяють заощадити понад 28 млн. тон вугілля або 16 млн. тон нафти щорічно.*

***Ключові слова:** реактор, АЕС, РУ, реактивність, математична модель, аксіальний офсет, енергоблок, АСУТП, ВВЕР – 1000, автоматичний регулятор потужності.*

**Постановка проблеми.** Основним керуючим впливом на енерговиділення в реакторі є концентрація борної кислоти, а точніше атомів бору  $^{10}\text{B}$ . Результати дослідження АСР з таким регулятором наведені в ряді робіт.

Так, у роботі [7, с. 29–56] показано, що використання борної кислоти для управління потужністю реакторної установки дозволяє значно збільшити час експлуатації тепловиділяючих елементів, підвищуючи економічність експлуатації АЕС без зниження показників безпеки.

У роботі [6, с. 18] наведені результати дослідження системи автоматичного регулювання концентрації борної кислоти в теплоносії першого контуру АЕС. Показана принципова можливість застосування стандартного ПІ-закону

регулювання для керування нелінійним об'єктом.

Робота [3, с. 134–140] присвячена дослідженню регулятора потужності з рідким поглиначом для енергоблоку АЕС з ВВЕР-1000. Показано, що при регулюванні потужності реактора зміною концентрації борної кислоти реактор без регулятора є стійким на всіх рівнях потужності. Стійкість забезпечується регулятором аксіального офсету.

**Постановка завдання.** Метою роботи є вивчення автоматизованої системи управління потужністю енергоблоку з рідким поглиначом, яка дозволяє підтримувати потужність енергоблоку регулюванням теплотехнічного параметра.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для бору характерна висока здатність

до поглинання теплових нейтронів, зумовлена реакцією  $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ .

Основний внесок у поглинання нейтронів дає ізотоп  $^{10}\text{B}$ , зміст якого в природному борі становить 19,7%. Перетин захоплення теплових нейтронів для ізотопу  $^{10}\text{B}$  становить  $\sim (3 \dots 4) \cdot 10^{-25} \text{ м}^2$ , для природної суміші ізотопів перетин захоплення  $\sim 7,5 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2$  [1].

У водо-водяних реакторах використовується добавка добре розчинної у воді борної кислоти  $\text{H}_3\text{BO}_3$ , що циркулює через активну зону воду першого контуру.

В ядерних реакторах протягом кампанії реактора відбувається зміна запасу реактивності ядерного палива: після завантаження він дуже великий (30 ... 40 бек для реакторів ВВЕР-1000) і зменшується в міру вигорання ядерного палива і його «шлакування», тобто накопичення продуктів поділу у вигляді стабільних і довго живучих нуклідів, які беруть участь в непродуктивному захопленні нейтронів (серед продуктів поділу  $^{235}\text{U}$  більше 250 ядер, приблизно чверть з них є шлаками).

Безпосередньо робота системи борного регулювання в двоконтурних водо-водяних реакторах, як правило, забезпечується за допомогою системи підживлення та водоочищення першого контуру.

Оскільки в кислому середовищі посилюється корозія конструкційних матеріалів, рН розчину борної кислоти підтримується на рівні не менше 5.7 введенням в розчин лугів – аміаку і, для компенсації радіаційного розкладання аміаку, гідроксиду калію (для реакторів ВВЕР-1000, змішаний аміачно-калієвий водний режим реактора). У такому режимі максимальна концентрація борної кислоти в розчині становить до 16 г / кг.

Для зниження концентрації борної кислоти протягом реакторної кампанії використовується відбір і дистиляція води першого контуру, борна кислота регенерується в пристрої регенерації.

Великі кампанії активних зон енергетичних реакторів вимагають великих початкових запасів реактивності (15 - 22 бек), а значить, і великої кількості поглиначів для їх компенсації. Але переміщення в активній зоні «важких» поглиначів може викликати сильне спотворення нейтронного поля в реакторі, збільшуючи нерівномірність розподілу  $\Phi$  ( $r, H$ ) і тим самим знижуючи економічні показники роботи енергоблоку. Більш того, в деяких випадках перекося нейтронного поля можуть бути небезпечними, оскільки вони призводять до виникнення нестійкості нейтронного поля в реакторі.

Для того щоб уникнути цього реалізована ідея в борному регулюванні, рідкий поглинач (борна кис-

лота  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ) вводиться в теплоносій (воду) першого контуру, і оскільки теплоносій безперервно циркулює через активну зону реактора, в останній в будь-який момент часу буде міститися строго певну кількість бору, що дорівнює добутку концентрації борної кислоти в теплоносії на величину обсягу, займаного теплоносієм в активній зоні. Отже, якщо величина концентрації борної кислоти в воді першого контуру постійна, то що міститься в обсязі активної зони борна кислота компенсує певну постійну величину запасу реактивності, а якщо концентрація борної кислоти в першому контурі буде змінюватися, то буде змінюватися і скомпенсований запас реактивності реактора. У цьому – первинний сенс борного регулювання.

Таким чином, на початку кампанії, створюючи досить високу концентрацію борної кислоти в воді, домагаються компенсації здебільшого початкової загальної запасу реактивності, залишаючи на частку оперативного запасу невелику величину, необхідну для забезпечення маневрування реактора, що не перевищує величини 0.6 - 0.8 бек, що забезпечує виключення виникнення ядерно небезпечних ситуацій навіть при помилках операторів, пов'язаних із вивільненням великих позитивних реактивностей при переміщеннях рухомих поглиначів в активній зоні.

За необхідності підвищення величини оперативного запасу реактивності підживлення першого контуру ведеться вже не розчином борної кислоти, а чистим дистиллятом, тим самим змінюючи звичайний баланс між витокком борної кислоти (разом з протіканням першого контуру) і її заповненням (від системи борного регулювання). Простіше кажучи, підживленням першого контуру чистою водою домагаються зниження концентрації кислоти в контурі шляхом розведення розчину в ньому чистою водою.

Таким чином, головними гідностями борного регулювання, які зумовили застосування цього способу регулювання у вітчизняних ВВЕР, є:

- «м'якість» регулювання, тобто незмінність при регулюванні форми нейтронного поля в активній зоні реактора;

- можливість підтримки поточної величини оперативного запасу реактивності реактора в необхідних безпечних межах, що виключають виникнення режимів некерованого розгону реактора внаслідок вивільнення великих позитивних реактивностей при випадкових помилкових діях оперативного персоналу.

Ефективність борної кислоти  $C_{\text{бор}}$  при концентрації  $C_{\text{бор}}$  є величиною реактивності, яку



втрачає реактор при підвищенні концентрації борної кислоти в теплоносії від 0 до:

$$\rho_{бор}(C_{бор}) = \int_0^{C_{бор}} \alpha_{бор} dC_{бор},$$

де  $\alpha_{бор} = f(C_{бор}) = \frac{\partial \rho_{бор}}{\partial C_{бор}}$  – коефіцієнт реактивності борної кислоти.

Величина  $\alpha_{бор}$  визначалася з альбому НФХ для 284.72 ефективних діб (рисунок 1).

$$\alpha_{бор} = -1.58 \% / \text{г/кг} = -0.0158 \text{ л} / \text{г/кг}.$$

Зменшення концентрації борної кислоти в теплоносії відбувається за рахунок введення в теплоносій знесоленої води. Монотонне введення/виведення борної кислоти потрібне для зменшення кількості рідких радіоактивних відходів.

Із рисунку 2 видно, що зміна концентрації борної кислоти і знесоленої води відбувається за експоненціальним законом. Для моделювання цієї



Рис. 1. Залежність ефективності борної кислоти від ефективної доби вигорання палива:  
1 – потужність реактора N=1500 МВт;  
2 – N=2100МВт; 3 – N=2700 МВт; 4 – N=3000 МВт

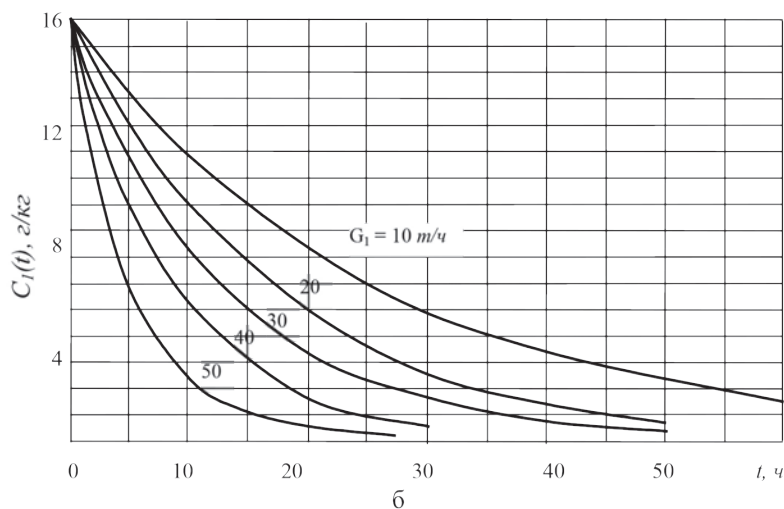
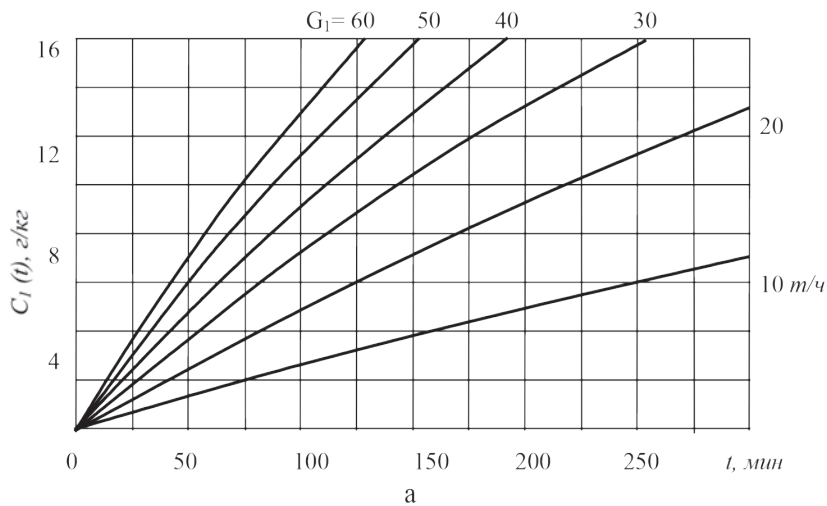


Рис. 2. Зміна концентрації борної кислоти в теплоносії у разі підживлення концентрованою борною кислотою (а) і знесоленою водою (б)

залежності були ідентифіковані і описані диференціальними рівняннями:

при введенні розчину борної кислоти

$$T_4 \cdot \frac{dC_{бор}}{d\tau} + \Delta C_{бор} = k_4 \cdot \Delta G_{бор},$$

при введенні знесоленої води

$$T_5 \cdot \frac{dC_{бор}}{d\tau} + \Delta C_{бор} = k_5 \cdot \Delta G_{H2O},$$

де  $C_{бор}$  – концентрація борної кислоти, г/кг;  
 $k_4, k_5$  – коефіцієнти передачі,  $\frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$ ;  
 $T_4, T_5$  – постійні часу, с;  
 $\Delta G_{бор}$  – зміна витрати борної кислоти, т/ч;  
 $\Delta G_{H2O}$  – зміна витрати знесоленої води, т/ч.

Для розрахунку було прийнято, що номінальна витрата борної кислоти  $G_{бор} = 40 \text{ т/ч}$ , номінальна витрата знесоленої води  $G_{H2O} = 40 \text{ т/ч}$ . Для таких витрат борної кислоти і знесоленої води коефіцієнти передачі і постійні часу:  $k_4 = 40 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$ ,  $k_5 = 16 \frac{\text{г/кг}}{\text{т/ч}}$ ,  $T_4 = 22318 \text{ с}$ ,  $T_5 = 47714.7 \text{ с}$

Для процесів введення і виведення бору з теплоносія коефіцієнти передачі відрізняються у 2,5 разу, а постійні часу – у 2 рази. Отже, можна зробити висновок, що виведення з теплоносія борної кислоти введенням знесоленої води відбувається довше.

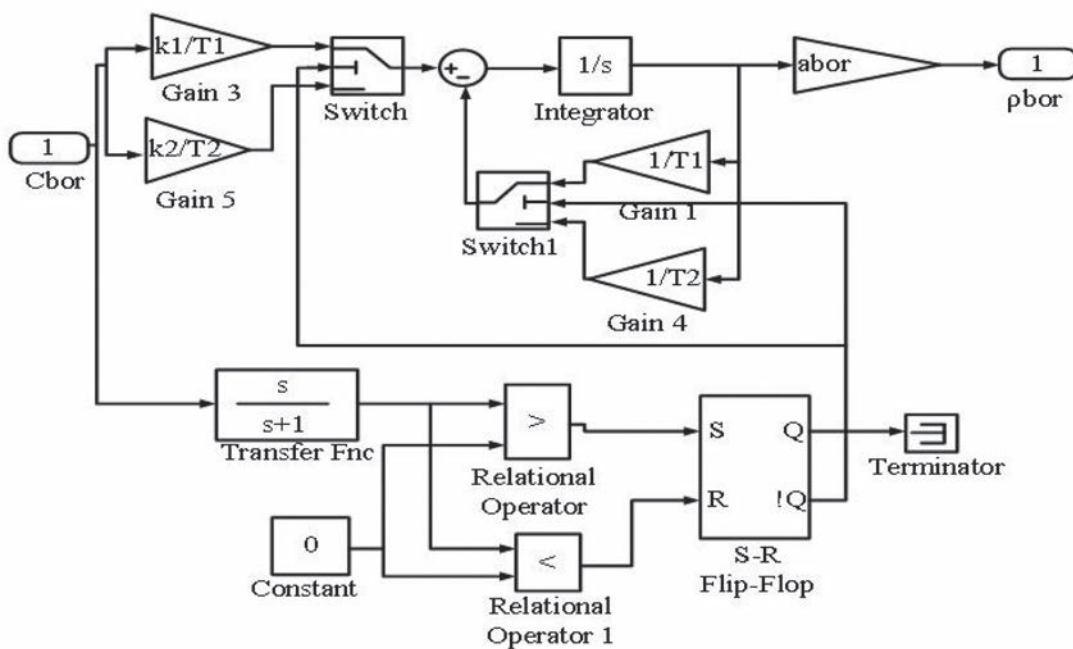


Рис. 3. Імітаційна модель впливу концентрації борної кислоти на реактивність для усієї АКЗ

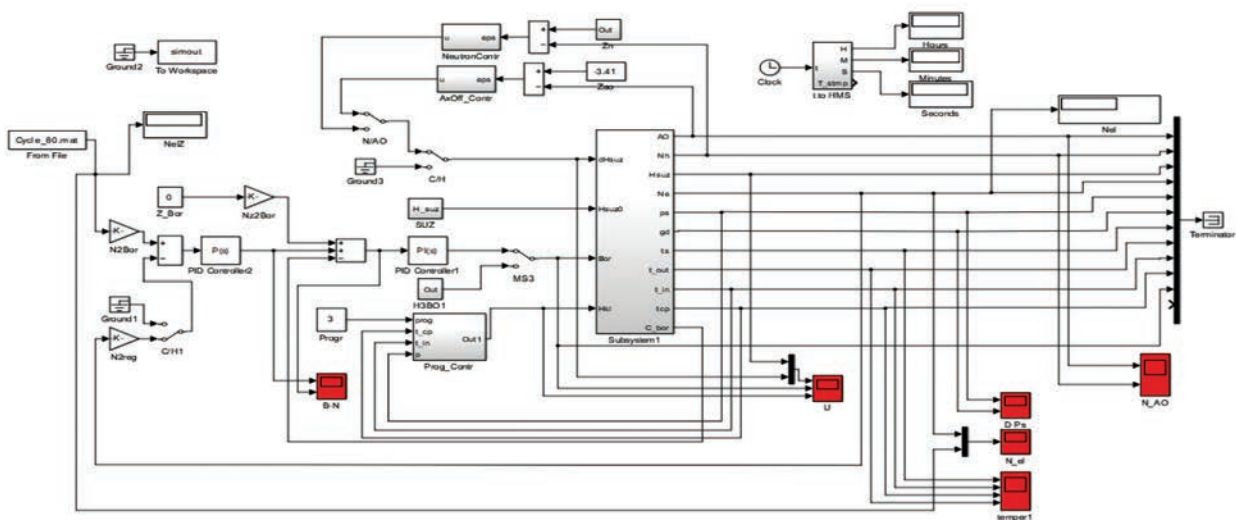


Рис. 4. Структурна схема АСР з борним регулюванням

Імітаційна модель впливу концентрації борної кислоти на реактивність для усієї АКЗ представлена в середовищі моделювання Simulink пакету Matlab (рисунок 3).

Структурна схема моделі АСУ в прикладному пакеті Simulink, підставимо знайдені настройки регулятора і скоректуємо їх для отримання необхідних перехідних процесів (рисунок 4).

### Моделювання при зміні концентрації борної кислоти

**Висновки.** Робота містить отримані результати, які полягають у створенні автоматизованої системи керування потужністю енергоблоку з рідким поглиначом, що дозволяє регулювати потужність енергоблоку за допомогою борного розчину. З'ясовано, що система регулювання потужності енергоблоку з рідким поглиначом є актуальною і дієвою.

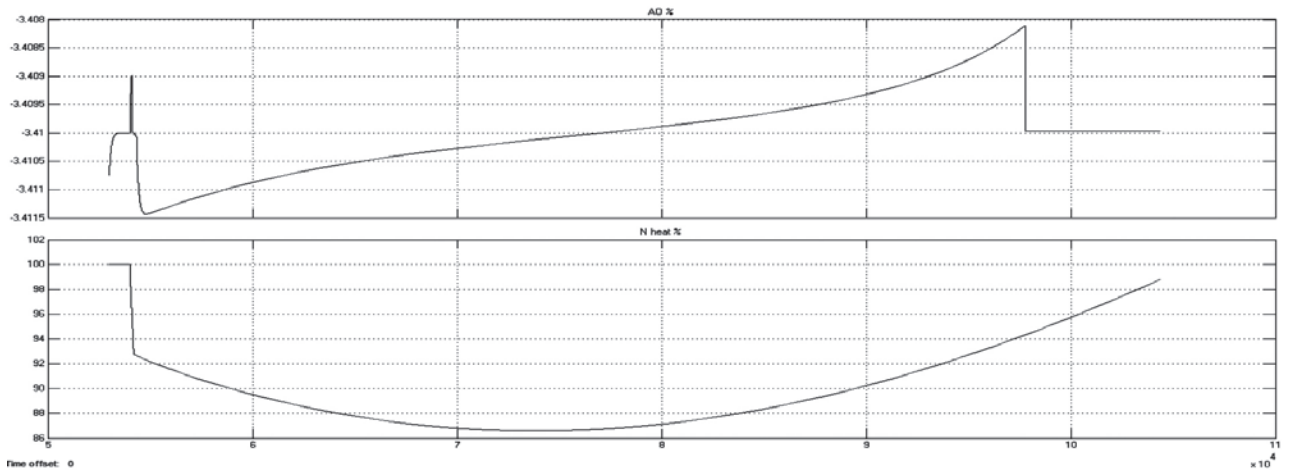


Рис. 5. Перехідний процес потужності аксіального офсет при включеному регуляторі борної кислоти

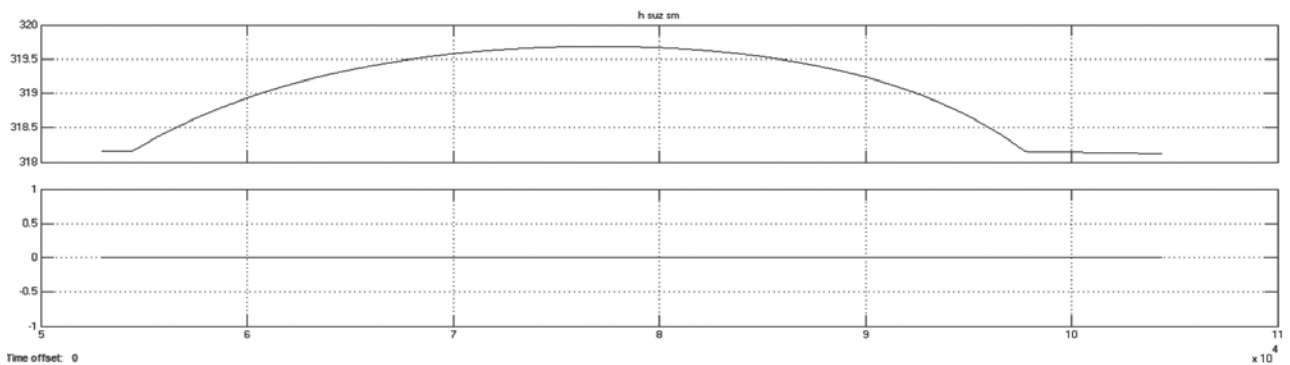


Рис. 6. Положення ОР СУЗ при включеному регуляторі борної кислоти

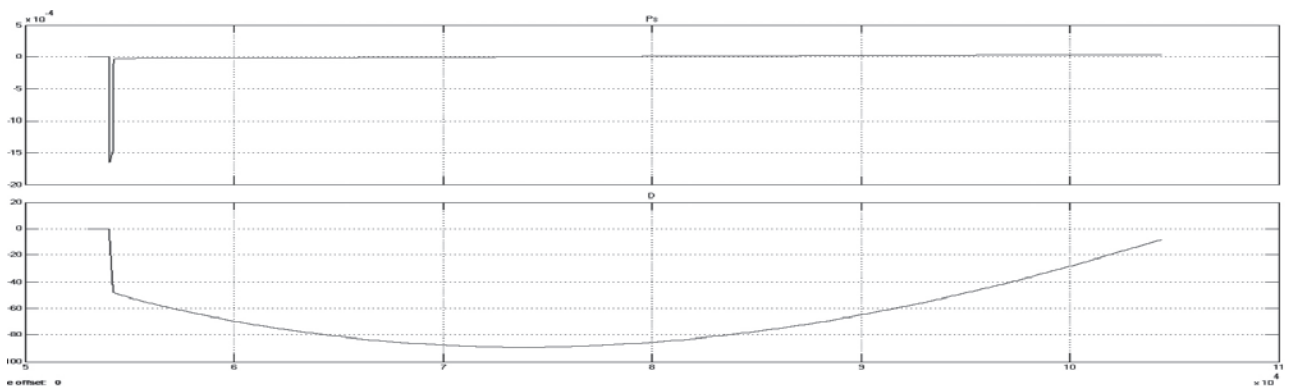


Рис. 7. Перехідний процес витрати пари і тиску при включеному регуляторі борної кислоти

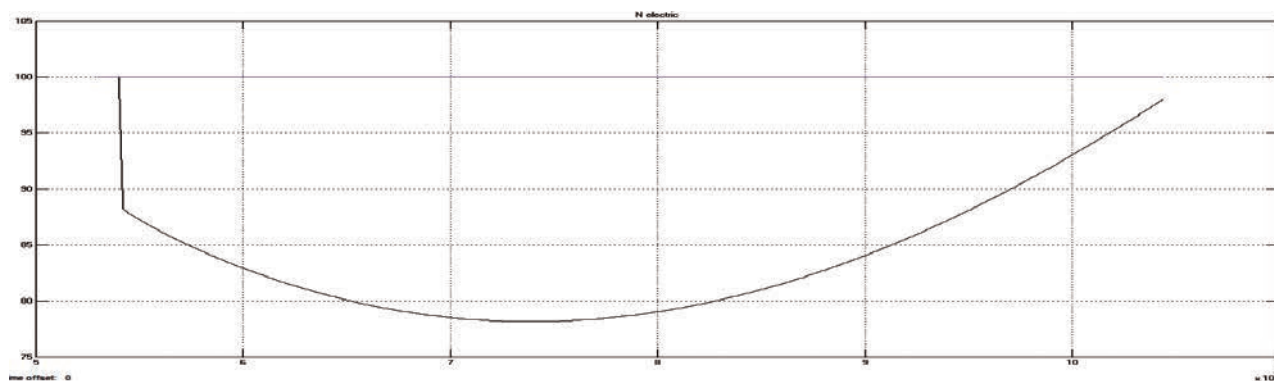


Рис. 8. Перехідний процес потужності електричного заряду при включеному регуляторі борної кислоти

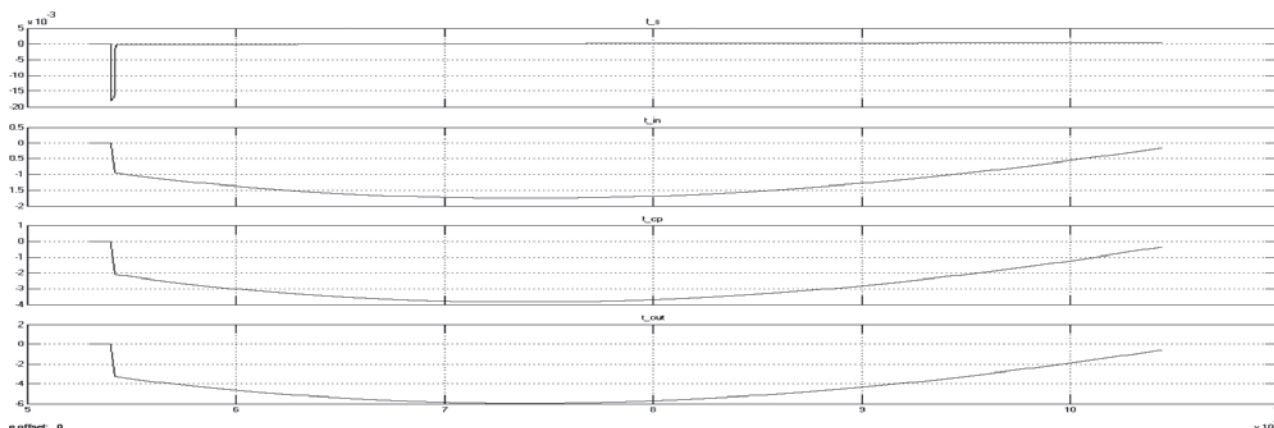


Рис. 9. Перехідні процеси температур при включеному регуляторі борної кислоти

#### Список літератури:

1. Демченко В.А. Автоматизація і моделювання технологічних процесів АЕС і ТЕС. Одеса : Астропринт, 2001. 305 с.
2. Ключев А.С., Лебедев А.Т., Семенов Н.П., товарно А.Г. Настройка автоматических систем и устройств управления технологическими процессами. Довідковий посібник. Москва : Энергия, 1977. 400 с.
3. Методичні вказівки з курсового проектування по дисципліні «Автоматичні системи управління технологічними процесами об'єктів АЕС». Одеса, 1988 р.
4. Довідник з ядерної енергетики на сайті «BBC» (укр.).
5. Запорізька АЕС, офіційний сайт (рос.).
6. Системи турбінного відділення (частина 1), центр підготовки персоналу. Росенергоатом, 2000 р.
7. Тиск насиченої пари води. URL : <http://fptl.ru/spravo4nik/davlenie-vodyanogo-para.html>.

#### Petlinskyi I.I. RELEVANCE OF THE AUTOMATIC POWER CONTROL SYSTEM OF THE POWER PLANT OF A NUCLEAR POWER PLANT WITH A LIQUID ABSORBER

*Extremely high energy intensity and significant natural reserves of nuclear fuel contribute to the widespread use of nuclear energy in transport, energy, and space technology.*

*The main purpose of NPP operation in Ukraine is electricity generation. The best mode of operation of nuclear reactors in terms of safety and reliability is the mode of operation at rated power. But in practice, the power system imposes its requirements, so it is necessary to provide the ability to change the capacity of the unit to ensure the mode of passage of the load. Therefore, modern systems for automation of reactor plants are subject to increased requirements, primarily for process control algorithms, which must provide reliable and safe operating conditions.*

*Priority remains the management of reactors with water-water power reactors (WWER) with a unit capacity of 1000 MW, in which a nuclear reaction takes place directly: in the event of an accident, the reactors are the main sources of radioactive contamination.*

*The use of boron control for the control of WWER-1000 reactors allows to increase the operating time at maximum capacity, ensuring the cost-effectiveness of the unit, as well as to maintain the RU within the required safe limits, which prevent the occurrence and development of emergencies.*

*When developing and implementing control algorithms for the process of boron control, it is advisable to predict the change in the basic parameters of the power unit using simulation systems.*

*An extremely important fact is the fact that nuclear energy has proven its economic efficiency in almost all parts of the globe. In addition, even with a large scale of energy production at nuclear power plants, nuclear energy will not create transport problems, as it requires low transport costs, frees society from the constant transportation of fossil fuels. Currently, eleven RUs with WWER-1000 are operated at Ukrainian NPPs. They are part of Zaporozhe, Rivne, Khmelnytsky and South Ukrainian NPPs. The latter generate about 93% of the electricity of Ukrainian nuclear power plants and save more than 28 million tons of coal or 16 million tons of oil annually.*

**Key words:** reactor, NPP, RU, reactivity, mathematical model, axial offset, power unit, process control system, WWER - 1000, automatic power regulator.

**Серт І.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

**Беглов К.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## МОДЕЛЬ СПАЛЮВАННЯ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ЗМІННОГО СКЛАДУ В КОТЛІ

*Автоматизація є невід'ємною частиною життя сучасного суспільства. Оскільки ми живемо в епоху інформатизації та великих обсягів виробництва на підприємствах, то виникає потреба у скороченні часу праці виробництва з метою підвищення вигоди підприємства.*

*Є багато різних способів підвищення якості праці (від кваліфікування персоналу до закупівлі новітнього обладнання та розробки рішень, які виявляються в процесі виробництва). Хоча вже існує багато технічних рішень вирішення виробничих проблем, проте з кожним днем виникають нові проблеми, для яких належить розробляти нові методики вирішення. Виробництво електроенергії є важливою ланкою у сфері виробництва для потреб суспільства через значну потребу.*

*І скільки б не існувало методів вирішення проблем, які є у теплоенергетиці, актуальним нині залишається виявлення та своєчасне налаштування системи під час зміни вхідного складу палива через перехід котлів на нові види, тому робота присвячена саме з'ясуванню цього.*

*За розрахунками були отримані вихідні дані для створення передавальних функцій, за допомогою них побудована АСР (автоматична система регулювання), зняті показники кривих розгону та налаштовані балансувальний і коригувальний регулятори, а також лінійні та нелінійні об'єкти систем, проведено синтез цих моделей для порівняння їх роботи та ефективності.*

*Проаналізовано перехідні процеси цих моделей із метою з'ясування ефективності додавання нелінійної моделі спалювання газоподібного палива для виявлення складу палива. Результат моделювання цих моделей дав змогу визначити, що у разі незначних відхилень від номінальної величини витрати палива та його складу обидві системи працюють майже однаково.*

*З'ясовано, що внаслідок значних змін витрати палива (близько 50% від номінального значення) та/або зміни його складу штатна система регулювання не забезпечує необхідної якості перехідних процесів.*

**Ключові слова:** нелінійна модель, концентрація димових газів, котел, склад димових газів, склад палива.

**Постановка проблеми.** Нині залишається актуальним питання з'ясування складу димових газів на виході з котла. Раніше, коли як газоподібне паливо використовували природний газ та його склад був незмінним, потреби у нелінійній моделі, яка буде розглянута у роботі, не було.

Найбільшою проблемою є те, що не можна заздалегідь знати, скільки треба виділити повітря для спалювання газоподібного палива зі змінним складом, а це може змінювати аеродинаміку котла у гірший бік, що збільшить потрібну кількість спалювання (витрати) палива для певної потужності котла, а це є небажаним явищем під час вироблення електроенергії.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Хоча вже було неодноразово проведено дослідження у сфері енергетики щодо з'ясування складу хімічних сполучень, однак під час спалювання природного палива використовували лінійну модель, яка була більш простою у застосуванні, але вона не дозво-

ляла заздалегідь з'ясувати склад палива, тому саме виникнення нелінійної моделі уможливило використання різноманітнішого газоподібного палива.

Нами проаналізовано попередні роботи [1, с. 44–52], де розглянуто процес спалювання несертифікованого палива, а саме нафтопродукту, на відміну від того, де розглядається біогаз ([2, с. 32–36]) та те, як можна зменшити кількість продуктів згоряння з використанням альтернативних горючих газів, а також визначення складу вуглеводневого пального досліджено у роботі [3, с. 51–59].

У роботі [4, с. 127–136] запропоновано визначення палива зі змінним складом за допомогою методу, заснованого на рівнянні хімічної термодинаміки, а у роботі [5, с. 90] використано метод оптимального розподілення теплового навантаження між одиницями обладнання зі змінною калорійністю.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідити, як буде змінюватися концентрація кисню у вихідних

димових газах за умов зміни складу палива. Задля розрахунку змінного складу палива потрібно створити нелінійну модель спалювання газу (для підтримання системою оптимального процесу горіння).

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- на основі відомих математичних моделей побудувати нову математичну модель спалювання газу в топці котла з можливістю зміни складу палива в процесі моделювання. Нова модель ураховує зміни коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha$ ) залежно від складу палива, а не тільки зміни його витрати;

- провести верифікацію, побудованої математичної моделі за відомих початкових умов, тобто за умови, коли склад палива є незмінним;

- проаналізувати, як штатна система регулювання компенсує зміну складу палива.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для регулювання відомою є лінійна математична модель об'єкта котла, наведена у формулах (1), (2), (3) та 4, які були взяті з [6, с. 73–74]. На прикладі розрахунку котла КВГМ-50 взяті значення у формулах (1, 2, 3, 4) та отримані значення об'єкта, наведені у передавальній функції (5). Динамічні властивості лінійного та нелінійного об'єктів є однаковими та з'ясовуються геометричними характеристиками котла. У статті розглянуто саме нелінійну модель спалювання палива. Уважається, що коефіцієнт  $\alpha$  є сталим для лінійної моделі, проте через зміну складу палива та димових газів цей коефіцієнт буде розрахований. Наше нововведення полягає у тому, що коефіцієнт  $V_0$  та  $\alpha$  (1) буде розраховано у процесі роботи об'єкта, завдяки чому отримано графіки концентрації складових частин у димових газах (рис. 4). Ми досліджуємо поведінку лінійної і нелінійної моделі для однакових витрат, перехідні процеси яких зображені на рис. 5 і рис. 6.

$$\left. \begin{aligned} Q_L &= \alpha * V_0 * Q_T \\ \frac{C_{O_2}}{21} + \frac{C_{CO_2}}{K} &= 1 \\ \alpha &= \frac{K}{C_{CO_2}} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} C_{O_2} &= 21 - \frac{21}{\alpha}; \\ \alpha &= \frac{Q_L}{V_0 Q_B}. \end{aligned} \quad (2)$$

де  $r_{O_2}$  – об'ємна частка кисню в повітрі.

Після лінеаризації отримаємо:

$$\Delta C_{O_2} = \frac{21}{Q_L \alpha} \Delta Q_L - \frac{21}{Q_B \alpha^2} \Delta Q_B. \quad (3)$$

де,  $Q_T$  – витрата димових газів;

$Q_L$  – витрата повітря;

$C_{O_2}, C_{CO_2}$  – концентрація кисню вуглекислого газу;  $K$  – максимально теоретична досяжна концентрація  $CO_2$  для заданого палива.

$V_0$  – теоретично необхідна витрата повітря для згорання одиниці палива  $m^3/m^3$ .

$$V_0 = \frac{1}{r_{O_2}} \left[ 0.5C_{O_2} + 0.5H_2 + 2CH_4 + 1.5H_2S + \sum \left( m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2 \right] \quad (4)$$

$$W(S) = \frac{1}{T_2^2 + T_1 S + 1} e^{\tau_3 s} \quad (5)$$

Коли котел розраховано на один вид палива і працює в одному режимі, то потреба у системі регулювання майже зникає (через простоту регулювання роботи котла). Під час зміни складу палива та складу димових газів виникають певні проблеми у вигляді зменшення ефективності вироблення енергії, збільшення споживання палива, неправильного розподілення між котлами для потрібного навантаження та налаштування динамічних та статичних характеристик котлу, через що зменшується показник ккд.

Саме тому введено нелінійний об'єкт лінійної моделі спалювання несертифікованого палива, що показано на рис. 2. З'ясовано вхідний склад біогазу та його сполучень за умов різного коефіцієнта збитку повітря  $\alpha$ . У таблиці 1 представлено отримані сполучення за умов складу біогазу ( $CH_4$  – 55%;  $CO_2$  – 40%;  $H_2S$  – 3%;  $CO$  – 1%;  $H_2$  – 1%).

У системі застосовувалася схема недопалу  $\alpha > 0$  та перепалу  $\alpha < 0$  палива, що зображено на рис. 3, де  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря. Можна чітко простежити, що у разі недопалу палива сполучень немає, а за умов перепалу палива змістова концентрація водню та чадного газу зникає, що свідчить про правильні розрахунки цих сполучень.

Для порівняння цих моделей здійснено синтез їх АСР, який зображений на рис. 2.

де *zadanie* – завдання регулятора;

IPO1, IPO2 – уміст кисню, %;

S-dP1, S-dP2 – властивості об'єкта за каналом «хід регулювального органу – витрата повітря»;

$V_0$  – теоретично необхідний об'єм кисню,  $m^3 / m^3$ ;

$V_f$  – кількість палива,  $m^3/c$ ;

$V_A$  – стехіометрична витрата повітря,  $m^3 / m^3$ ;

Air Flow – витрата кисню,  $m^3 / m^3$ ;

Object\_nonlin – лінійний об'єкт;

Object\_lin – лінійний об'єкт.

Щоб з'ясувати, як змінюється склад димових газів на виході, було збільшено витрату палива та змінено його склад. На графіках перехідних процесів показано, що у разі невеликих збурень нелінійна модель працює майже так, як і

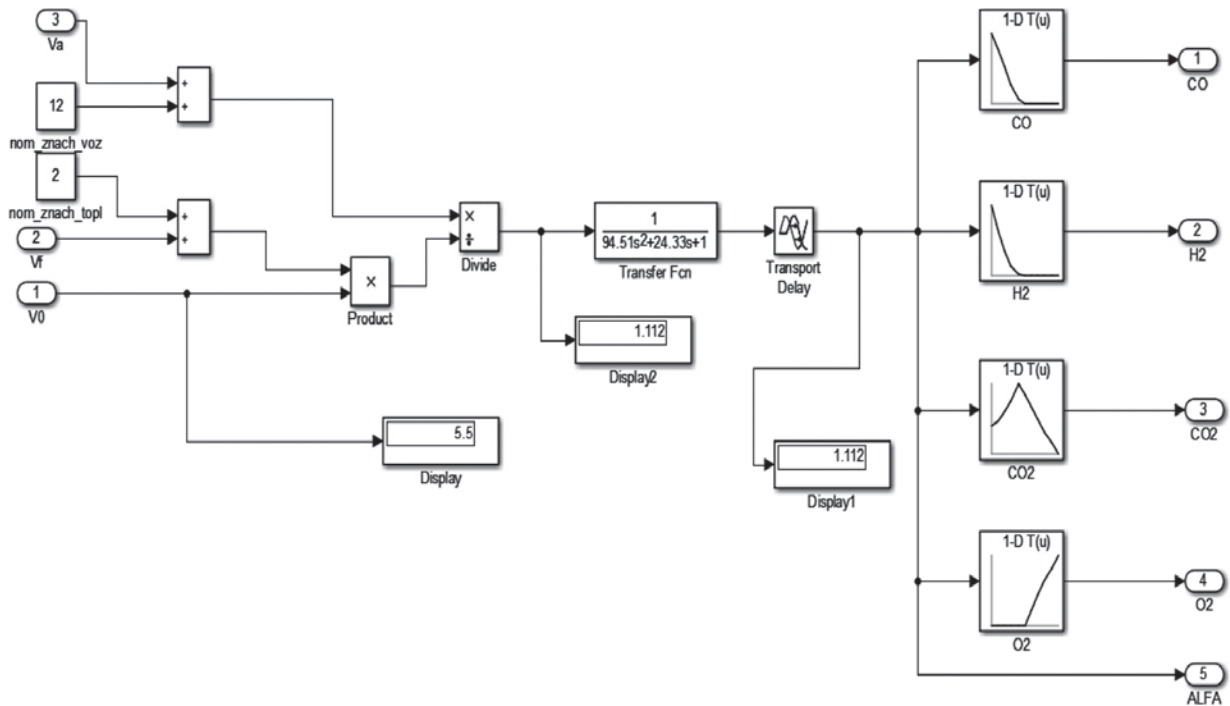


Рис. 1. Нелінійна модель об'єкта керування де, CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> – складники димових газів, які залежать від α

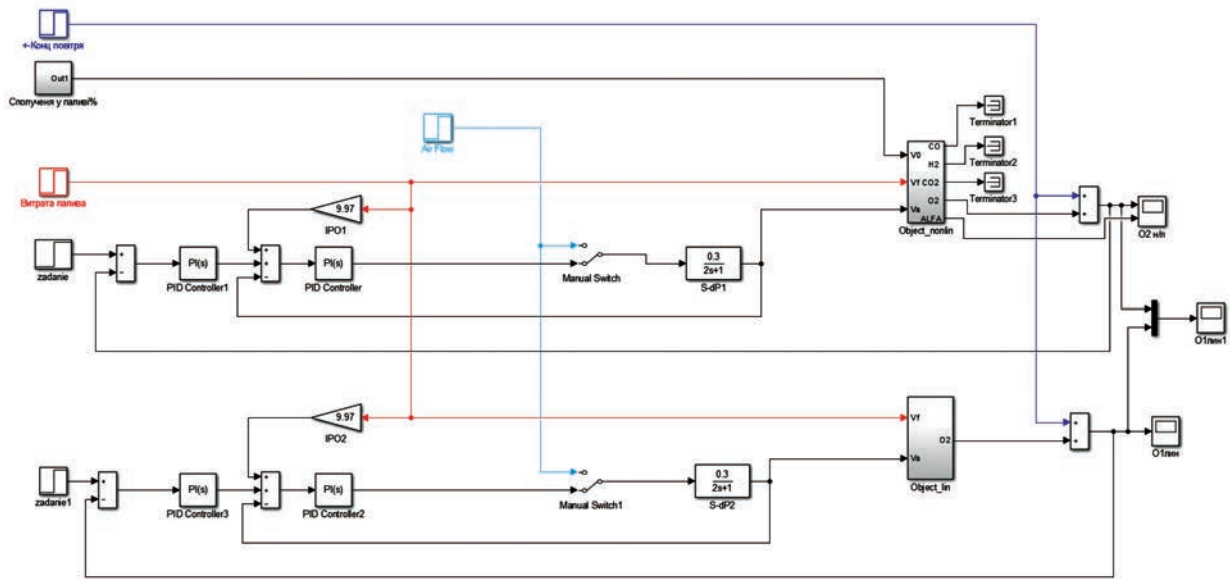


Рис. 2. Синтез лінійної АСР (знизу) та нелінійної (зверху) моделі спалювання газоподібного палива

Таблиця 1

Відсоткові сполучення у біогазі залежно від α

| α         | 0,8    | 0,84   | 0,88   | 0,92   | 0,96   | 1 | 1,04   | 1,08   | 1,12   | 1,16   | 1,2    |
|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|---|--------|--------|--------|--------|--------|
| $R_{CO}$  | 0,0328 | 0,0256 | 0,0176 | 0,0085 | 0,0021 | 0 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $R_{H_2}$ | 0,0311 | 0,0201 | 0,011  | 0,004  | 0,0006 | 0 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |
| $R_{O_2}$ | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 | 0,0068 | 0,0132 | 0,0192 | 0,0248 | 0,0301 |



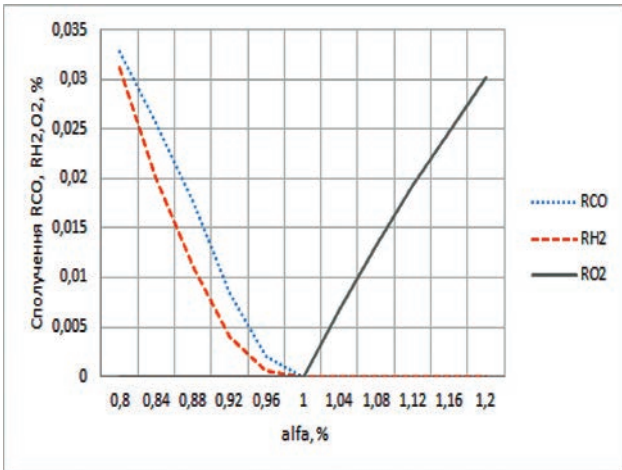


Рис. 3. Залежність кисню, водню та чадного газу від коефіцієнта  $\alpha$

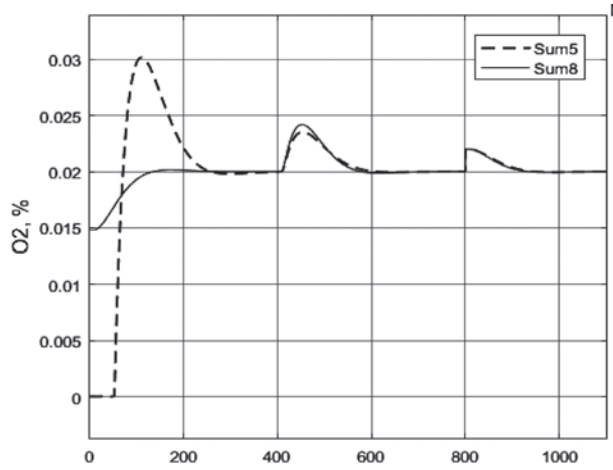


Рис. 4. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum8) систем за умов малих збурень ( $0,1 \text{ м}^3/\text{г}$  від номіналу) витрати палива й однакового складу палива

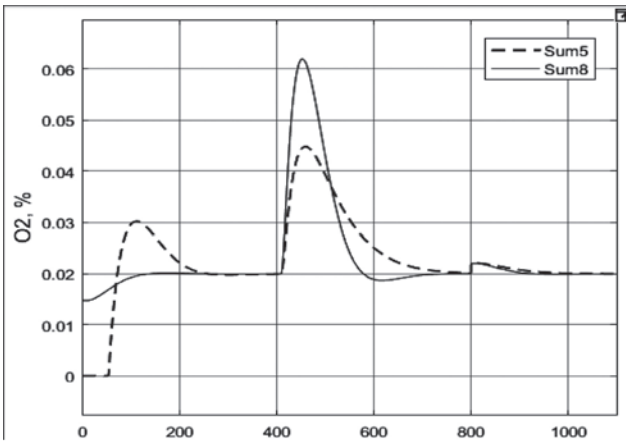


Рис. 5. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum8) систем за умов глибоких збурень ( $1 \text{ м}^3/\text{г}$  від номіналу) витрати палива й однакового складу палива

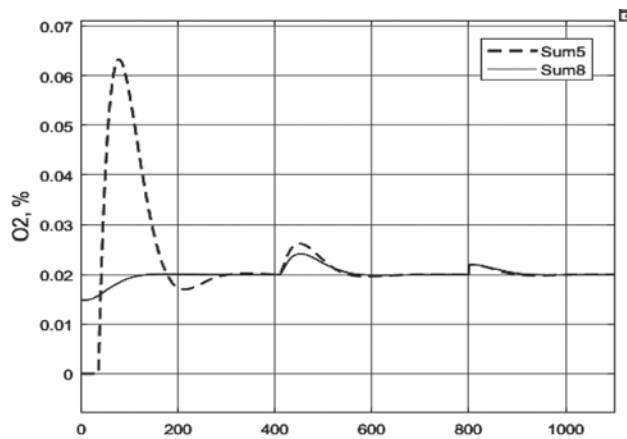


Рис. 6. Порівняння роботи нелінійної (sum5) та лінійної (sum8) систем за умов однакової витрати палива та різного складу

лінійна (рис. 4), проте якщо збурення більше запланованих (витрата палива, рис. 5) або збурення не є запланованими (зміна складу палива, рис. 6), вихідним складом палива був біогаз із таким складом: ( $CH_4 - 55\%$ ;  $CO_2 - 40\%$ ;  $H_2S - 3\%$ ;  $CO - 1\%$ ;  $H_2 - 1\%$ ), після зміни складу – ( $CH_4 - 36\%$ ;  $CO_2 - 50\%$ ;  $H_2S - 8\%$ ;  $CO - 3\%$ ;  $H_2 - 3\%$ ), то можна побачити, що лінійна система зразу здійснює регульовальний вплив на концентрацію кисню, на відміну від нелінійної, яка очікує зміну концентрації кисню на виході котла для цієї АСР, тому лінійна модель погано впорюється з ними.

**Висновки.** Отже, в цьому разі за допомогою використання прикладного пакета Matlab Simulink побудовано синтез лінійної АСР із лінійним та нелінійним об'єктами. Отримано нову

математичну модель після введення нелінійного об'єкта, яка враховує зміни коефіцієнта надлишку повітря ( $\alpha$ ) залежно від складу палива та димових газів, а не тільки зміни його витрати.

Після створення нелінійної моделі проведено верифікацію роботи цієї системи з лінійною моделлю у разі зміни витрати палива з малими та великими збуреннями.

А також проаналізовано, зважаючи на концентрацію кисню та менше відхилення від регульованої величини нелінійної моделі (порівняно з лінійною під час зміни складу палива), як штатна система реагує на це (порівняно з нелінійною). Отож, доцільно використовувати саме нелінійну модель. На основі цього умовиводу буде синтезовано новий регулятор для подальшого дослідження цієї теми.

**Список літератури:**

1. Maksimov M.V., Lozhechnikov V.F., Dobrovolskaya T.S., Bondarenko A.V., Mathematical model of noncertified burning fuels. East European journal of advanced technologies. 2014. Vol. 2. №8 (68). P. 44–52. URL: <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/6475/1/22420-40954-1-PB.pdf>
2. Brunetkin O.I., Gorban S.O. Heat transfer optimization of heat exchange surfaces of boiler equipment with decrease in consumption of combustion products. Proceeding of the Odessa Polytechnic University. 2017. Vol. 3 (53). P. 32–36.
3. Brunetkin O.I., Demidenko V., The method of determining the composition of hydrocarbon fuel by the ratio of fuel and air consumption and temperature of combustion products. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. 2019. Vol. 2(58). P. 51–59. URL: <https://www.pratsi.opu.ua/articles/show/18440>
4. Bondarenko A.V., Brunetkin O.I., Lysyuk A.V. Determining the quantitative composition of an unknown gaseous fuel and combustion products from the measured process parameters in the fuel combustion process. Odes'kyi Politechnichnyi Universytet Pratsi. 2014. Vol. 1(43). P. 127–136. URL: <https://www.pratsi.opu.ua/articles/show/1073>
5. Лысюк А.В., Беглов К.В. Оптимизация работы группы котельных агрегатов при сжигании несертифицированного топлива. Автоматика-2017: XXIV Міжнародна конференція з автоматичного управління (м. Київ, Україна, 13-15 вересня 2017 р.). Київ. 2017.
6. Демченко В.А. Автоматизация и моделирование технологических процессов АЭС и ТЭС. Одесса: Астропринт, 2001. 305 с.

**Sert I.V., Beglov K.V. MODEL OF COMBUSTION OF NATURAL GAS COMPOSITION OF NATURAL GAS IN A BOILER**

*Automation is an integral part of modern society. As we live in an age of informatization and large volumes of production in enterprises, there is a need to reduce the working time of production in order to increase the benefits of the enterprise.*

*There are many different ways to improve the quality of work, from staff training, to the purchase of the latest equipment and the development of solutions that are identified during production. Although there are already many technical solutions to solve production problems, new problems arise every day, for which new methods of solving them should be developed. Electricity generation has an important link in the production of society's needs, due to its widespread need.*

*And no matter how many methods there are to solve the problems that exist in the heat industry, it is important today to identify and timely adjust the system when changing the fuel input, due to the transition of boilers to their new types, so the work is dedicated to this clarification.*

*As a result of calculations, the initial data for creation of transfer functions were received, by means of them ACS (automatic control system) was constructed, indicators of acceleration curves were removed and balancing and correcting regulators, and also linear and nonlinear objects of systems were adjusted. Subsequently, a synthesis of these models was performed to compare their performance and efficiency.*

*An analysis of the transients of these models was performed to determine the effectiveness of adding a nonlinear model of gaseous fuel combustion to determine the fuel composition. As a result of modeling these models, it was clear that with small deviations from the nominal value of fuel consumption and its composition, both systems work almost equally.*

*It was found that due to large changes in fuel consumption (about 50% of the nominal value) and / or changes in its composition, the standard control system does not provide the required quality of transients.*

**Key words:** *nonlinear model, flue gas concentration, boiler, flue gas compositions, fuel composition.*

**Степанець О.В.**

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

**Багінський В.О.**

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

## САМОДІАГНОСТИКА ОБЛАДНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ТЕПЛООВОГО ПУНКТУ ЯК ЗАСІБ ОЦІНКИ СТАНУ ЙОГО ВУЗЛІВ

*Індивідуальні теплові пункти (далі – ІТП) набули широкого застосування як у громадському секторі так і на багатьох виробництвах. Ці установки забезпечують відповідні умови праці та проживання в холодні пори року для населення, а також беруть безпосередню участь у технологічних процесах на виробництвах.*

*Підтримання працездатності та забезпечення безперервної роботи великої кількості ІТП класичними методами потребує залучення значних людських ресурсів протягом короткого терміну та значних капіталовкладень, а також є малоефективним та вартісним. Під час виходу з ладу індивідуального теплового пункту завдаються значні збитки підприємствам, порушується проходження технологічних процесів, стає неможливим забезпечення комфортних умов проживання та праці. Таким чином виникає необхідність покращення або переосмислення підходів до діагностики та планування ремонту обладнання. Однією з концепцій, яка пропонується до застосування у процесі вирішення таких завдань, є самодіагностика. Цей підхід спрямований на аналіз даних роботи ІТП із подальшим результатом у вигляді зрозумілої для людини оцінки поточного стану. Упровадження таких систем на різних промислових об'єктах показує досить оптимістичні результати застосування систем самодіагностики*

*У статті розглядається процедура самодіагностики індивідуального теплового пункту. Метою системи є оптимізація процесів технічного обслуговування та ремонту шляхом оцінки стану обладнання за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення для аналізу даних роботи ІТП. Проаналізовано підходи до вирішення аналогічних завдань на обладнанні з різних галузей. На основі аналізу обрано підхід із застосуванням штучних нейромереж та класифікаційних моделей для оцінки як загального стану обладнання, так і окремих його вузлів. Об'єктом практичних досліджень щодо можливості реалізації обраної концепції системи самодіагностики обрано лабораторний стенд опалення, який імітує роботу системи опалення.*

*На основі результатів досліджень зроблено висновки, які свідчать про перспективність цього підходу, а також надано рекомендації щодо покращення ефективності роботи такої системи.*

**Ключові слова:** самодіагностика, предиктивна аналітика, штучна нейромережа, індивідуальний тепловий пункт, автоматизація.

**Постановка проблеми.** Під час роботи ІТП його вузли та агрегати поступово зношуються та виходять із ладу, що призводить до простою обладнання та, як наслідок, до збитків та незручностей. Нині найпоширенішими є два підходи до обслуговування обладнання [1]: реактивний (по факту поломки та виходу з ладу) та превентивний (проведення ремонтних робіт через сталі проміжки часу із заміною всіх вузлів, які зношуються під час роботи, без оцінки їх залишкового ресурсу).

Однак вони не забезпечують належної ефективності в умовах масштабованості та територіальної розгалуженості виробничих потужностей, тому потребують альтернативного підходу із застосуванням технологій четвертої промислової

революції. Такий підхід називають предиктивною самодіагностикою, метою якої є аналіз роботи обладнання за допомогою датчиків, які встановлені для контролю технологічного процесу, та додаткових датчиків для отримання специфічних даних про роботу вузлів обладнання (за необхідності).

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Предиктивна діагностика (з точки зору практичного застосування) – це інтелектуальний моніторинг обладнання для запобігання можливих майбутніх відмов [2]. Також предиктивна діагностика є однією з ключових тем Industry 4.0, метою якої є зниження часу простою, покращення продуктивності та зниження затрат на виробництво [3]. У різний час цієї проблемою

займалися різні вчені. Робота Li–Hua Li та ін. [4] присвячена самодіагностиці електричного двигуна в автоматичному вертикальному складі. У цій статті описується процес дослідження роботи електродвигуна автоматизованого вертикального ліфтового складу та розробки основи програмного забезпечення предиктивної аналітики. Джерелом даних, на основі яких визначається стан двигуна, є амперметр. Використовуючи дані амперметра, автор виміряв показники струму під час роботи двигуна за різних завантажень комірок складу та в режимах підйому і спуску комірок. Це дозволило використовувати електричні показники двигуна для оцінки його стану за допомогою нейромережі, вираховуючи його залишковий ресурс та, як наслідок, приблизний час залишкової роботи. У [5] розглянутий інший метод отримання даних. Для їх збору не використовуються додаткові пристрої або датчики, початкові дані беруться з архіву показань програмованого логічного контролера із зіставленням виявлених самим контролером аварій. У статті наведено також первинний алгоритм щодо обробки отриманих наборів даних до виду, придатного для застосування їх під час навчання нейромережі. Ifran Ulah, Fan Yang та ін. [6] використали елементи подібної діагностики упід час діагностики вузлів віддалених силових електричних підстанцій. На підстанціях були встановлені тепловізійні камери, котрі відстежували температуру обладнання та надсилали ці знімки на обробку. У цьому разі вирішується завдання класифікації, тобто віднесення вузла до одного з трьох станів а саме: такий, що нормально працює, незначний дефект, пошкодження. Отримані тепловізійні знімки переформатовують у відтінки сірого, де яскравіший відтінок відповідає вищій температурі. На зображеннях вручну були виокремлені зони, які відповідають обладнанню та які будуть аналізуватись. Для машинного навчання використано алгоритм Левенберга – Марквардта. Точність виявлення дефектів становила 84%. Варто зауважити, що під час створення таких систем найважливішим є отримані дані, особливо дані некоректної роботи. Так, у [7] досліджували електричне нагрівальне обладнання з метою створення системи предиктивної аналітики для передбачення виходу з ладу обладнання за 7 днів до його фізичної поломки. Дані збирались протягом 16 місяців за 91 параметром із періодичністю в 0,1 секунди. У зборі було задіяно 1 000 одиниць установленого обладнання, яке працює. Як наслідок, не дивлячись на сут-

тєвий період збирання даних, 90,8% становили дані нормальної роботи, 8,8% – несправностей через неполадки електромережі. Лише 0,4% необхідних даних показують суттєві поломки. Недостача даних некоректної роботи призвела до недостатнього навчання нейромережі, що зумовило суттєву похибку під час її роботи. У задачах передбачення можливих несправностей часто використовують нейромережі та штучний інтелект. Окрім вищезрозглянутих, цей підхід застосовується в [8; 9; 10]. Це зумовлено через евристичну природу та здатність до підлаштування до невизначених наперед умов.

Першим кроком у створенні системи предиктивної діагностики є обрання підходу до аналізу даних [11]. Одним із варіантів є робота з історичними даними. Він базується на використанні наявних історичних даних для аналізу стану обладнання. Інший підхід побудований на створенні максимально точної математичної моделі об'єкта, використовуючи проектну документацію для симуляції всіх процесів, які відбуваються під час роботи установки. Це необхідно для коректного аналізу даних, які були отримані під час симуляції (з даними надавачів реального обладнання).

Від якості отриманих даних та їх обробки залежить те, наскільки адекватно система виявлятиме аномальні показання давачів та генерувати коректні результати. Під час обробки «сирих» даних можуть виникнути проблеми [12] з відсутністю деяких значень у різні проміжки часу або занадто великою їх кількістю через малий період квантування, необхідність виокремлення даних про проблему для кожного набору даних, приведення даних до однієї системи вимірювання для коректних маніпуляцій.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка системи самодіагностики ІТП із використанням лише давачів, які потрібні для роботи системи опалення. Для досягнення мети необхідно вирішити такі завдання:

- проаналізувати наявну установку (її устрій та принцип роботи для розуміння зібраних даних);
- підготувати дані для навчання нейромережі, прийняти її структуру та провести навчання;
- перевірити результати роботи нейромережі на експериментальних даних;
- проаналізувати результати роботи системи діагностики на результатах роботи з використанням експериментальних даних.

**Опис обладнання для експериментів.** Лабораторний стенд системи опалення складається з двох контурів (рис. 1). Електрокотел із

вбудованим циркуляційним насосом нагріває теплоносії, який потрапляє в гідравлічну стрілку. У гідравлічній стрілці температура теплоносія вимірюється датчиком температури та за допомогою циркуляційних насосів направляється до контурів опалення. На стенді реалізовано два контури опалення: перший контур працює без регулювання температури теплоносія, другий – із контролем температури теплоносія на подачі за допомогою змішувального клапана з електроприводом. Контроль температури зворотного теплоносія та теплоносія на подачі в другому контурі здійснюється за допомогою датчиків температури. Теплообмін із навколишнім середовищем відбувається за допомогою двох радіаторів опалення.

Стенд обладнаний системою автоматичного керування на базі вільнопрограмованого контролера серії Schneider Electric Modicon M172, який дозволяє реалізовувати різні алгоритми керування та здійснювати обмін із зовнішніми системами за допомогою промислових протоколів зв'язку.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**1. Дані та метод для навчання штучної нейромережі**

Завдання штучної нейромережі (далі – ШН) – отримання прогнозу роботи стенду, а саме показань температури теплоносія на подачі та зворотного теплоносія, методом навчання на історичних даних роботи стенду. Для отримання історичних даних проведено низку експериментів, під час яких змінювалося положення регулювального клапана контуру опалення, змінювалися режими роботи елементів стенду та записувалася реакція кожного елементу системи. Для прикладу на рис. 2 наведена поведінка системи під час зміни керівного впливу на положення клапана. На вхід нейромережі подаються значення роботи змішувального клапана, а на виході отримуємо температуру теплоносія на подачі та зворотного теплоносія.

Навчання ШН виконано із застосуванням алгоритму Левенберга-Марквардта. Його реалізацію можна подати як послідовність таких кроків [13]:

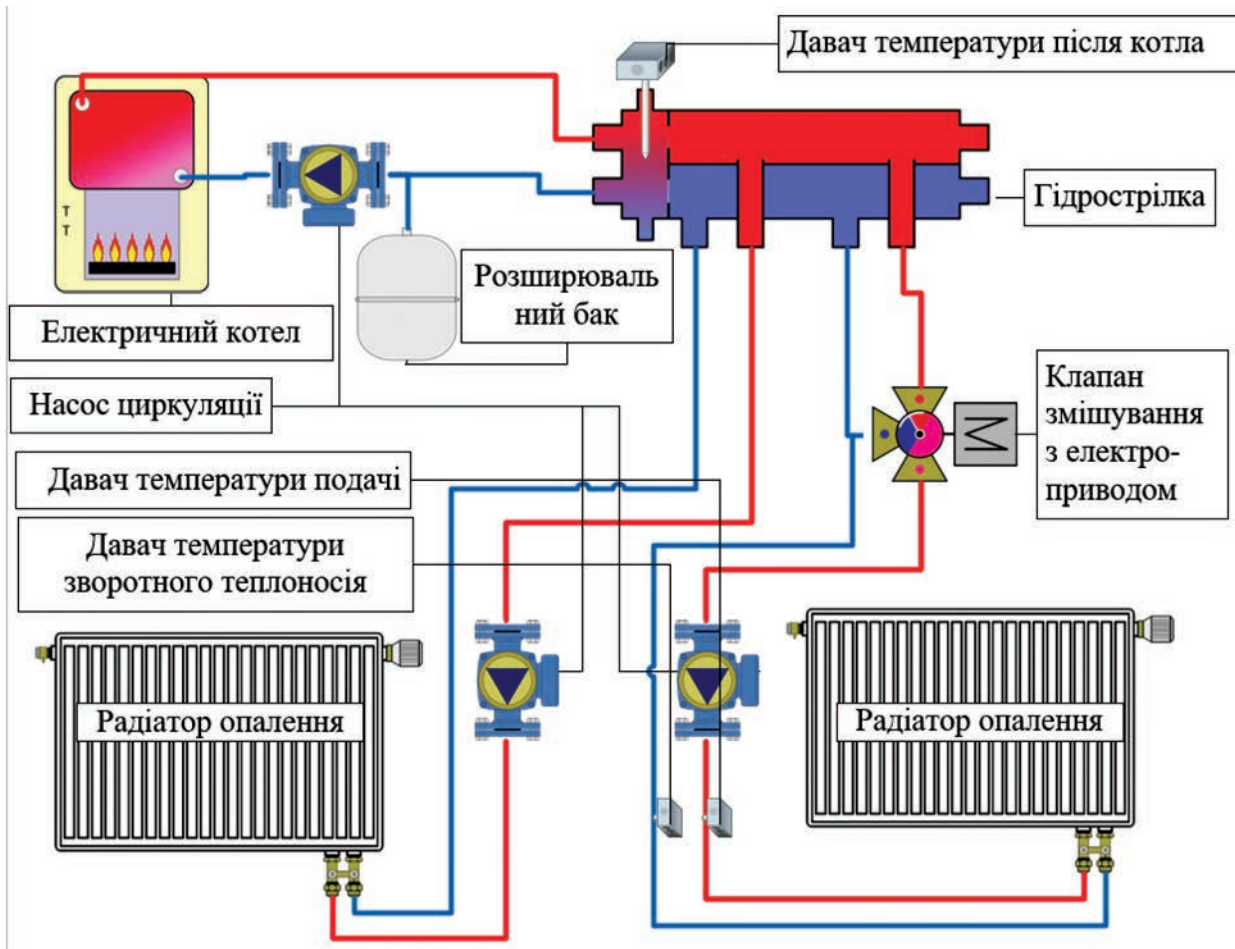


Рис. 1. Схема стенду опалення

- 1) завантажуюємо зразок до нейромережі та отримуємо розрахований мережею результат;
- 2) виконуючи зворотне поширення оновлюємо відповідні ряди матриці Якобіана;
- 3) повторюємо кроки 1–2 для всіх зразків навчального набору даних;
- 4) вирішуємо рівняння для отримання оновленого вектора коефіцієнтів ваги  $\Delta(w(n))$ ;
- 5) оновлюємо всі коефіцієнти ваги відповідно вектора  $\Delta(w(n))$  та обчислюємо значення помилки;
- 6) порівнюємо обчислене значення помилки з попереднім. У разі успішного навчання нове значення помилки менше за попереднє, в цьому разі переходимо до наступної епохи, тобто до 1-го кроку. Інакше повертаємось до п. 4 для обчислення нового вектора оновлення вагових коефіцієнтів.
- 7) повторюємо кроки 1–6, поки значення помилки не буде відповідати заданому або не буде досягнуто ліміту навчання.

## 2. Результати навчання та роботи нейромережі

На основі тестових прогонів алгоритму була обрана нейромережа з одним прихованим шаром, у якому міститься п'ять нейронів. Експериментальні дані роботи стенду були розділені на три категорії в таких співвідношеннях: дані для навчання – 70%, для перевірки – 15%, для тестування роботи – 15%. На рис. 3 можна спостерігати значення середньоквадратичної похибки для всіх наборів даних. Параметром, за яким

контролюється процес навчання, є середньоквадратична похибка (mse) у процесі перевірки (validation). Навчання припиняється, коли mse у процесі перевірки припиняє зменшуватись, ця точка позначається як перетин графіка Validation та графіка Best, а її результати – параметри нейромережі – обираються як найоптимальніші для її подальшого застосування.

Для перевірки коректності роботи нейромережі були взяті дані, отримані в процесі іншого експерименту. На вхід були подані дані положення змішувального клапана та температури після котла. Для перевірки можливості виявлення несправності були використані дані, де зімітовано несправність давача теплоносія на подачі. На рис. 4 зображено перевірку роботи нейромережі. У разі нормальної роботи максимальна похибка склала 2°C, а середня – не перевищила 1,1°C.

Наступним етапом стало вирішення задачі класифікації для отримання оцінки справності чи виходу з ладу обладнання. Виконання цієї задачі полягає у створенні класифікаційної моделі, результатом роботи якої є зарахування обладнання до класу, що нормально функціонує, або до класу зламаного (на основі аналізу вхідних даних). Є такі різновиди класифікаційних завдань [14]:

- бінарна класифікація – це класифікація з двома можливими результатами;

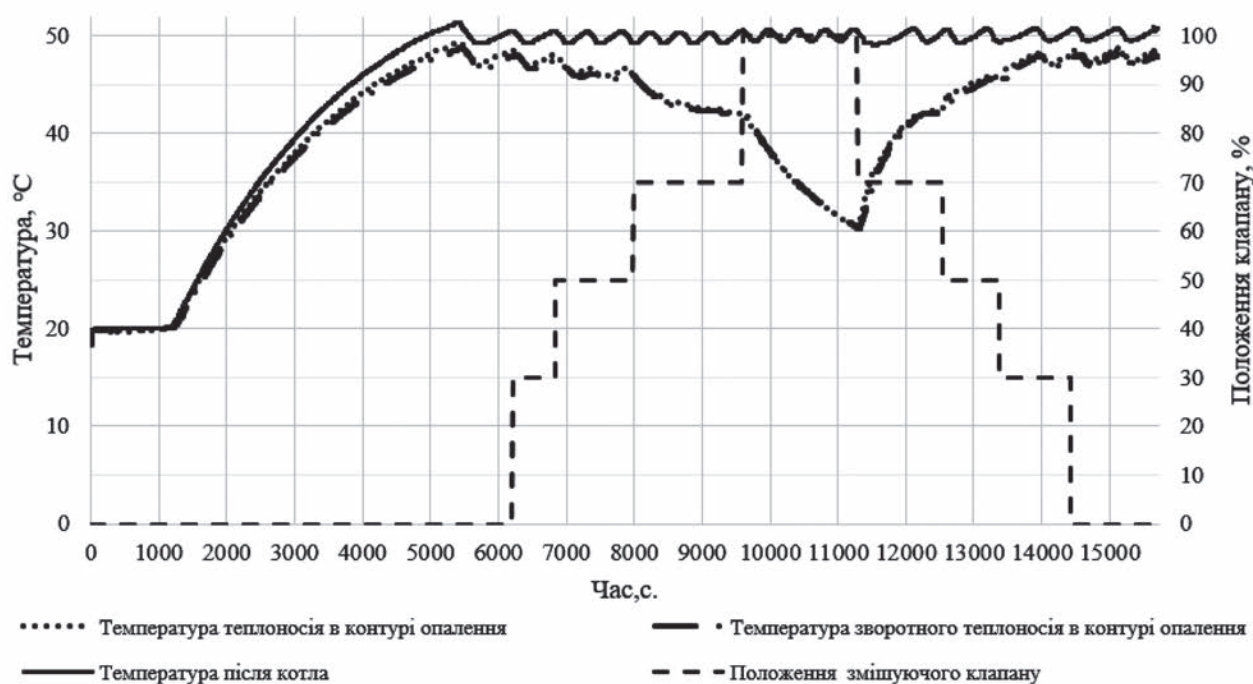


Рис. 2. Дані для навчання

– класифікація з декількома мітками – це завдання класифікації, яке може передбачати більше двох результатів.

У цьому разі використані експериментальні дані з розміткою стану обладнання (рис. 5), де

нормальна робота відповідає сигналу (0), а зони некоректної роботи позначені сигналом (1). Некоректна робота імітувалася шляхом безпосереднього фізичного впливу на чутливі елементи давачів температури.

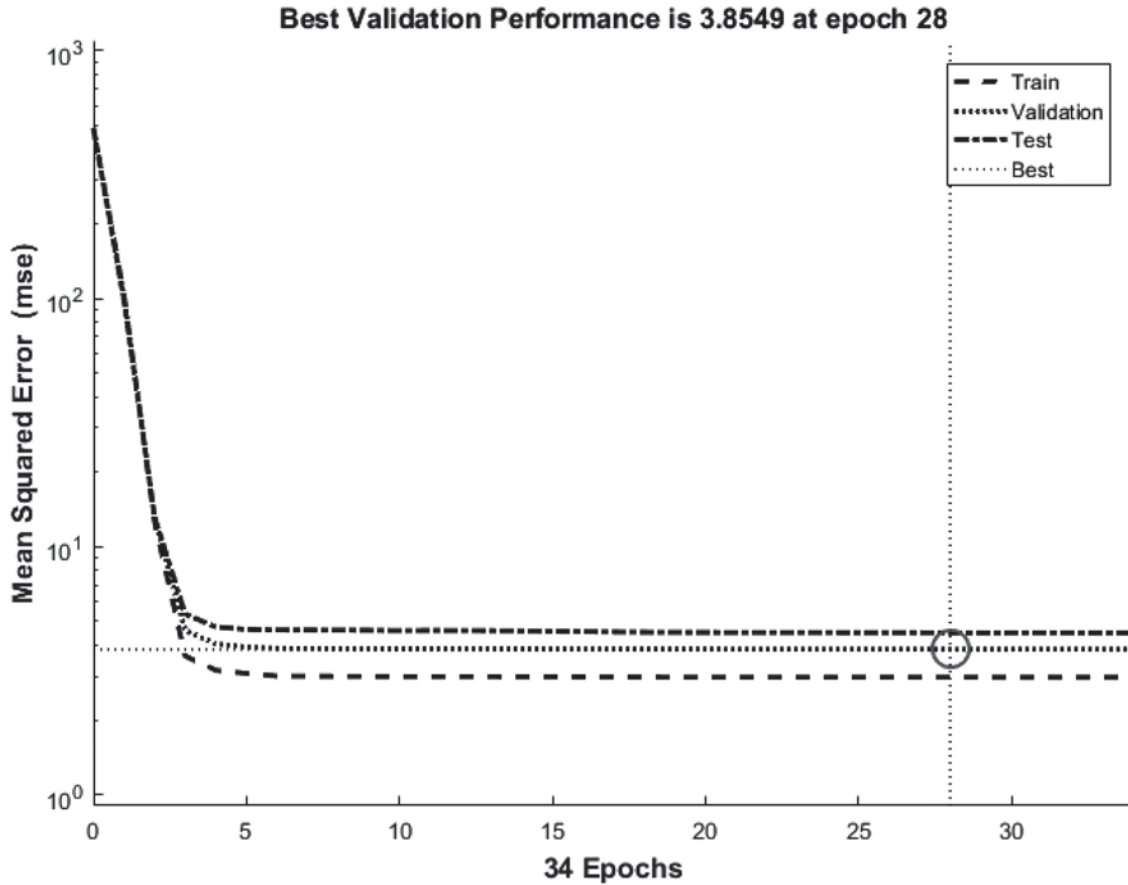


Рис. 3. Результати навчання та перевірки нейромережі

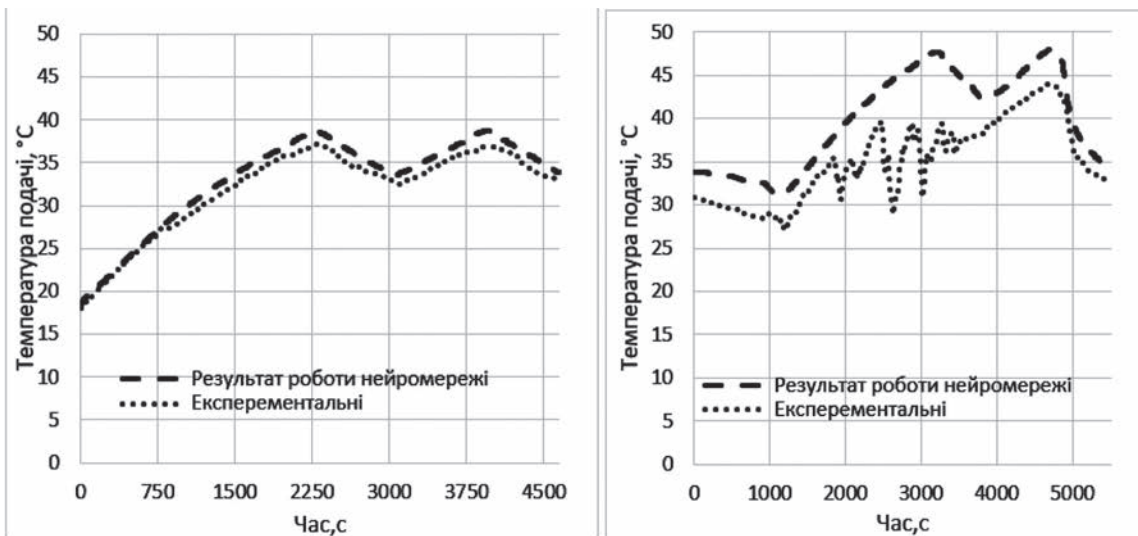


Рис. 4. Перевірка роботи нейромережі (а – нормальна робота установки, б – несправність)

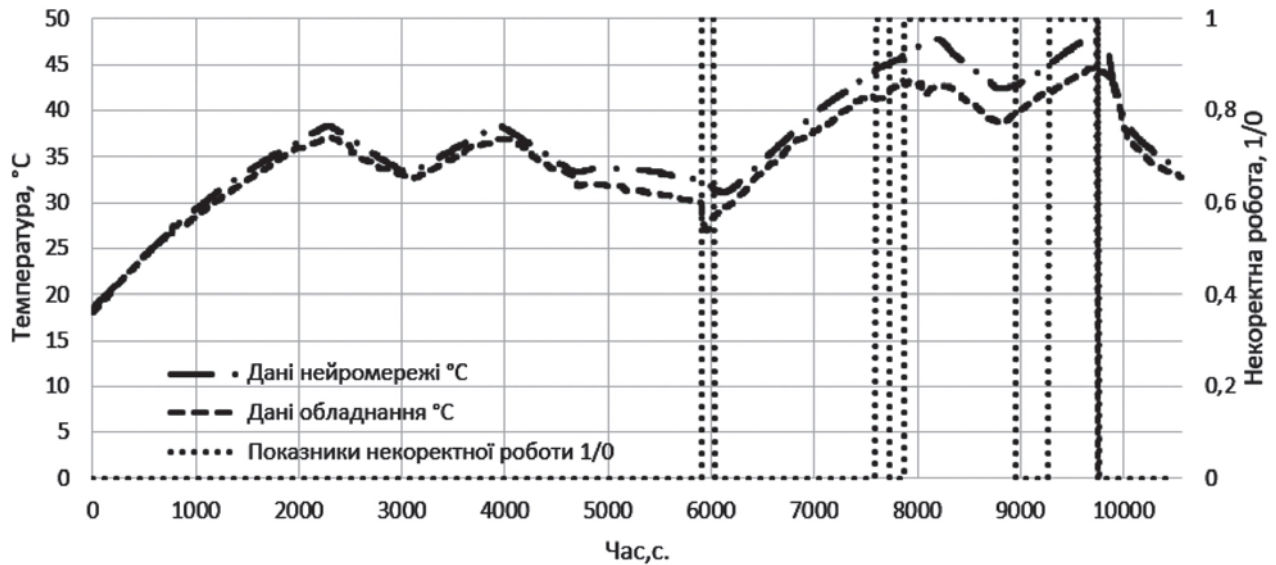


Рис. 5. Навчальні дані для класифікації

Результати навчання класифікаційної моделі зображені на рис. 6. Згідно з цими даними можна бачити таке. У зонах 1 та 4 зображено кількість правильних відповідей відповідно до класифікованого стану. У зонах 2 та 3 зображено відповіді, які були помилковими. У 99% випадках аналізу даних класифікаційна модель коректно ідентифікувала стан обладнання.

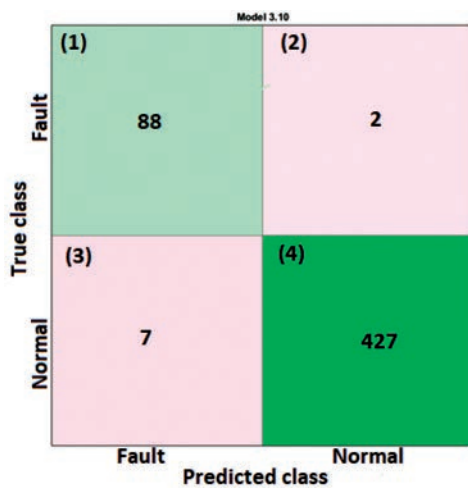


Рис. 6. Результати навчання класифікаційної моделі

Отримана класифікаційна модель перевірена на наборі даних, у якому зафіксовано несправність. Несправність полягала в некоректній роботі давача температури на подачі та виявлялась у занижених показниках та очевидно некоректній роботі. Результат застосування навченої класифікаційної моделі до експериментальних даних

зображено на рис. 7, зони нормальної та некоректної роботи позначені відповідно рис. 5, на якому видно, що модель адекватно виявляє некоректну поведінку давача температури. За умов візуальної оцінки результатів перевірки класифікаційної моделі можна говорити про правильну її роботу.

Рішення про впровадження будь-якої системи самодіагностики ухвалюється на основі економічних показників, які вираховуються на стадії проектування. Основними витратами на створення такого роду системи є розробка програмного забезпечення та встановлення додаткових давачів на вузли. На досліджуваному лабораторному стенді встановлено мінімальний набір давачів для роботи системи автоматизації, якого достатньо для загальної діагностики стану обладнання. Тепер необхідно дослідити, чи достатньо цього набору давачів для класифікації несправності певного вузла, використовуючи класифікаційну модель. На рис. 8 наведені експериментальні дані для навчання класифікаційних моделей, які відображують три види виходу з ладу обладнання:

- несправність давачів;
- поломку насосу;
- перекриття потоку на подачі до радіатора.

Визначення зон коректної та некоректної роботи аналогічно рис. 5.

Для кожного вузла проведено навчання своєї класифікаційної моделі. Результати навчання моделей класифікації стану зображені на рис. 9.

Маючи навчені моделі класифікації, перевіримо їхнє тестових даних із наведенням результатів роботи кожного класифікатора, які зображені на рис. 10.



Сигнали несправної роботи зображені так: нормальній роботі (0), давача на подачі (1), насосу (2), давача зворотного теплоносія (3), потоку (4).

Як видно, різні класифікаційні моделі однаково визначають різні типи несправностей, тобто дають хибні спрацьовування. Такий результат

пояснюється недостатністю датчиків для діагностики певної поломки. У разі виходу з ладу давача ми можемо спостерігати як швидку зміну показань датчиків під час виходу їх із ладу, так і повільну деградацію показань під час виходу з ладу інших вузлів.

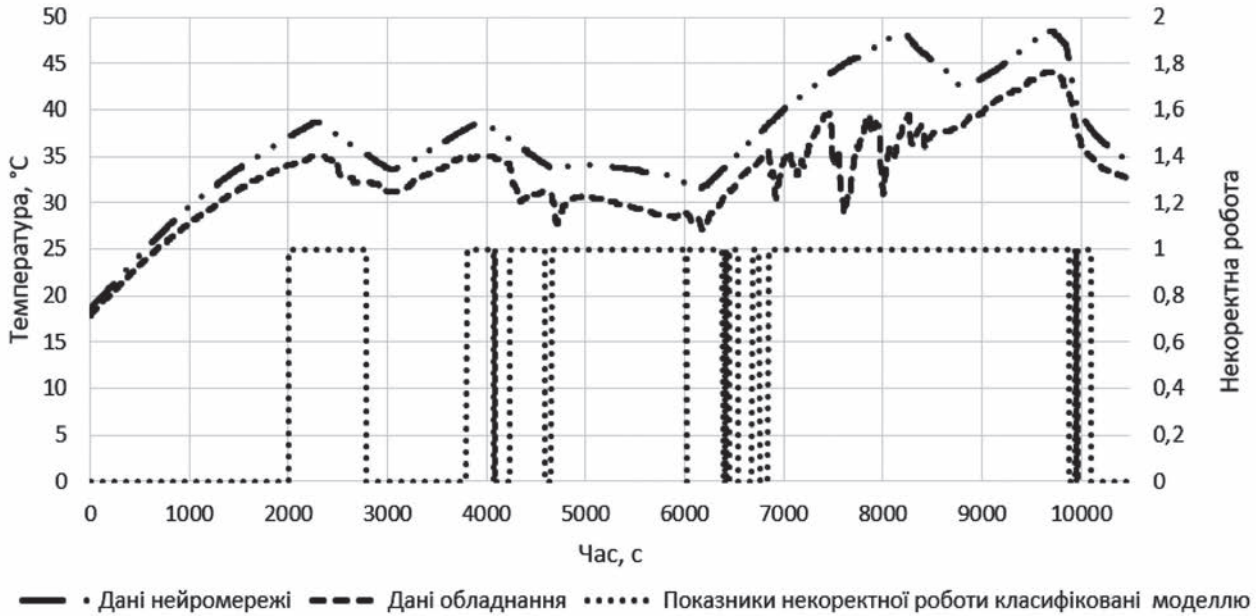


Рис. 7. Результат роботи класифікаційної моделі

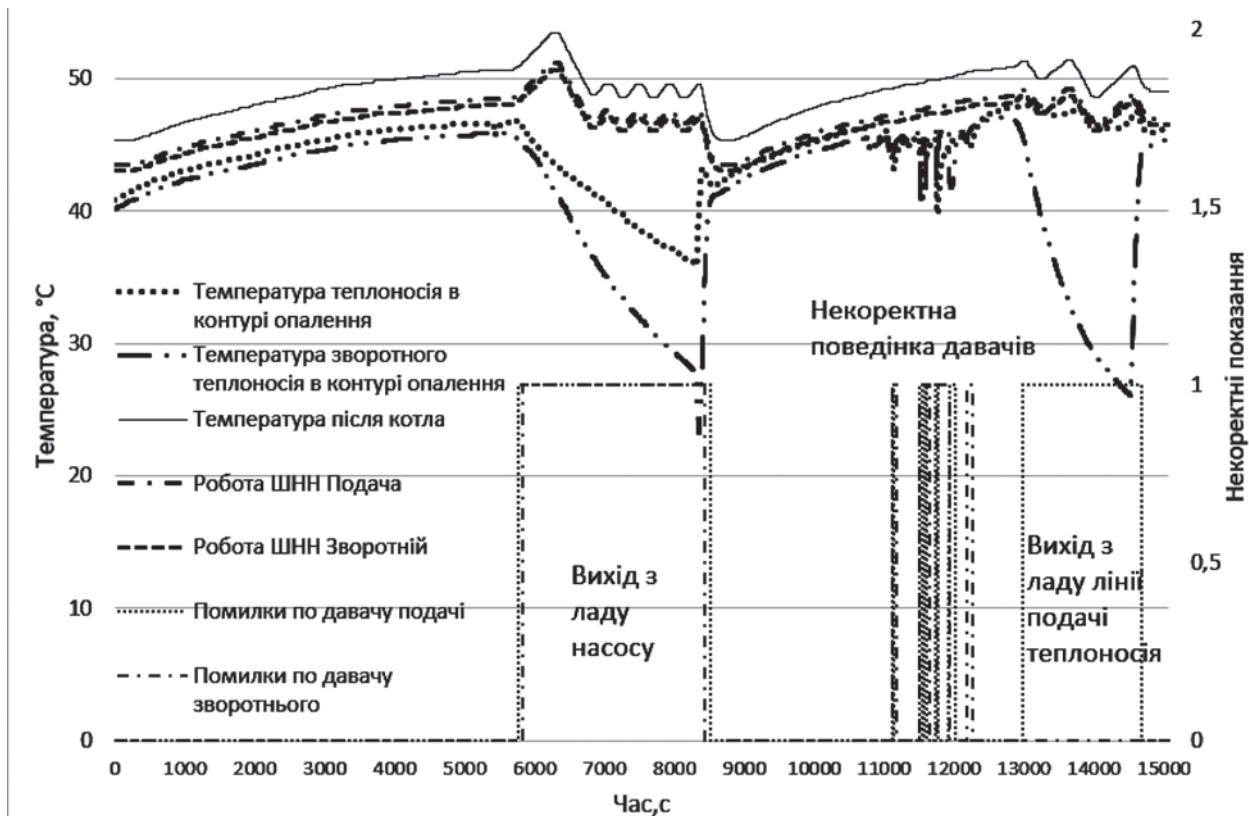


Рис. 8. Навчальні дані

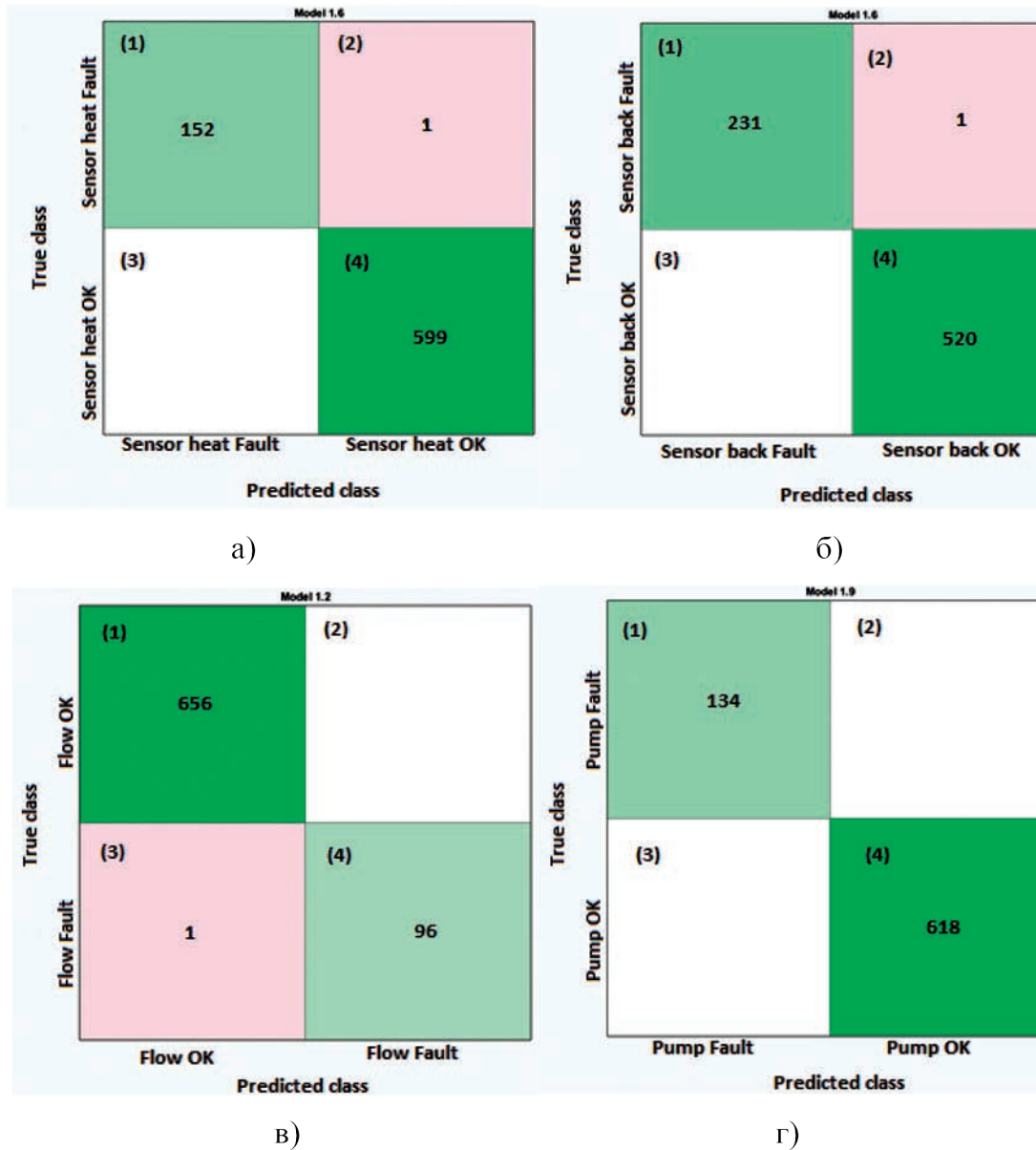


Рис. 9. Результати навчання моделей класифікації стану (а – давача на подачі, б – давача зворотного теплоносія, в – потоку, г – насосу)

**Висновки.** У статті розглянуто підхід розробки системи самодіагностики промислового об'єкта на прикладі лабораторного стенду ІТП. Бажаний результат досліджень полягав в отриманні прогностичних даних температури теплоносія та визначення несправності окремих вузлів установки.

Були експериментально зняті дані нормальної роботи у всьому діапазоні роботи клапана в обох напрямках. Також були отримані дані аномальної роботи стенду для подальшого порівняння результатів. Розроблена штучна нейромережа для прогнозу температур теплоносія забезпечила похибку не більше 2 °С. Для реалізації алгоритму самоді-

агностики використано машинне навчання класифікаційної моделі. За такого підходу вдалось класифікувати загальну несправність обладнання без можливості точної класифікації вузла, який вийшов із ладу. Під час реалізації аналогічним підходом методу для точної класифікації зламаною вузла виявлено недостатність наявних давачів. Для реалізації такого методу на кожен вузол необхідно встановити додаткові давачі.

Стаття підготовлена в межах виконання проекту «Розроблення техніко-технологічних схем та систем керування теплозабезпечення населених пунктів на основі термодинамічних підходів» (номер державної реєстрації НДР 0120U102168).

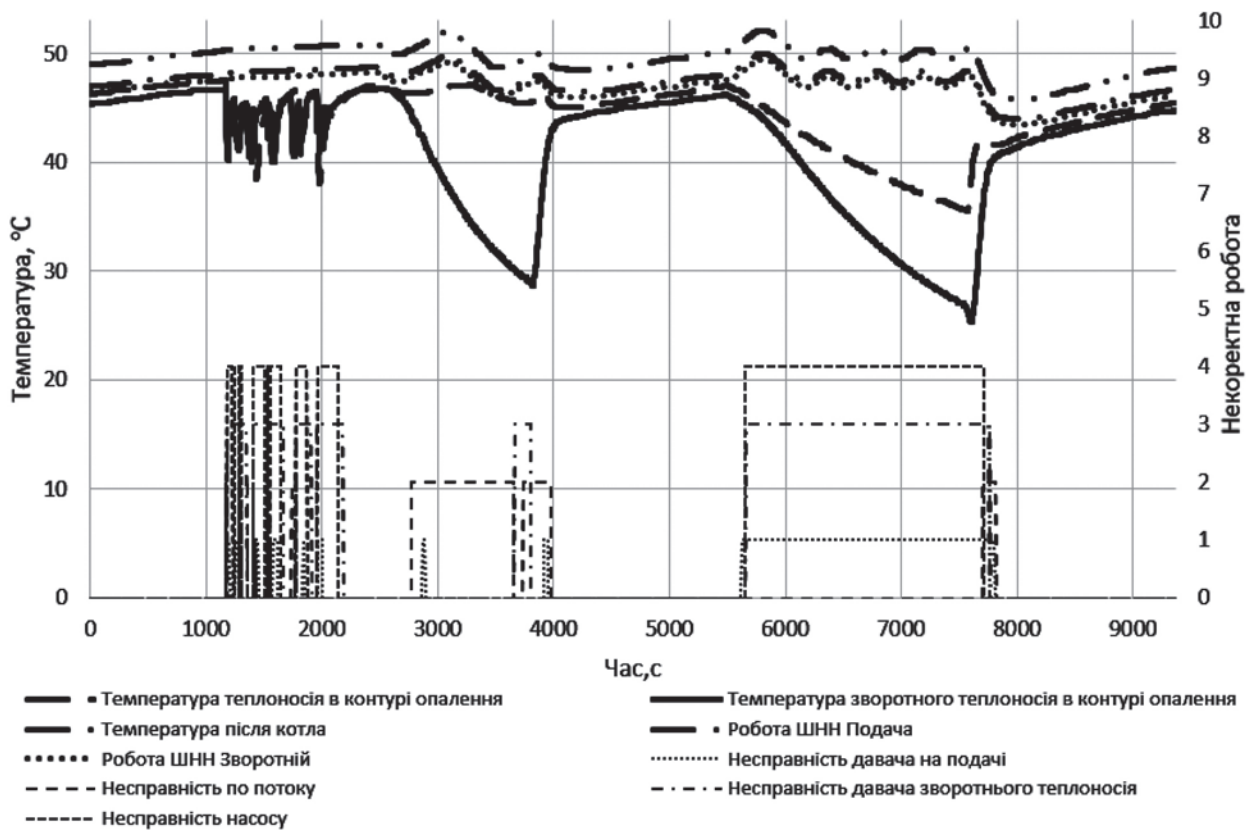


Рис. 10. Результат роботи класифікаційних моделей

Список літератури:

1. Eisemann R.C. Machinery malfunction diagnosis and correction: Vibration analysis and troubleshooting for process industries. 1998. С. 801
2. Calabrese M., Cimmino M., Manfrin M., Fiume F., Kapetis D., Mengoni M., Ceccacci S., Frontoni E., Paolanti M., Carrotta A., Toscano G. An Event Based Machine Learning Framework for Predictive Maintenance in Industry 4.0. *15th IEEE/ASME International Conference on Mechatronic and Embedded Systems and Applications*. Volume 9. 2019. DETC2019-97917, V009T12A037; 8 С.
3. Liu Z., Meyendorf N., Mrad N. The Role of Data Fusion in Predictive Maintenance Using Digital Twin. *44th Annual Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, № 37. 2018. С. 020023(1-6).
4. Li-Hua Li, Chang-Yu Lai, Fu-Hsiang Kuo and Pei-Yu Chai. Predictive Maintenance of Vertical Lift Storage Motor Based on Machine Learning. *International Journal of Applied Science and Engineering* № 16,2. 2019. С. 109–118.
5. Gutsch C., Furian N., Suschnigg J., Neubacher D., Voessner S. Log-based predictive maintenance in discrete parts manufacturing. *Procedia CIRP*. № 79. 2019. С. 528–533.
6. Ullah I., Yang F., Khan R., Liu L., Yang H., Gao B., Sun K.. Predictive Maintenance of Power Substation Equipment by Infrared Thermography Using a Machine-Learning Approach. *Energies*. № 10. 2017; № 12, 13 С.
7. Fernandes, S., Antunes, M., Santiago, A.R., Barraca, J.P., Gomes, D., Aguiar, R.L. Forecasting Appliances Failures: A Machine-Learning Approach to Predictive Maintenance. *Information*. № 11 2020. № 4, 13 С.
8. Peltola T. *Machine Learning in Predictive Maintenance: Classification Approach for Remaining Useful Life Prediction*. 2020. 90С.
9. Santiago A.R., Antunes M., Barraca J.P., Gomes D., Rui L. Aguiar R.L.. Predictive Maintenance System for Efficiency Improvement of Heating Equipment. *IEEE Fifth International Conference on Big Data Computing Service and Applications (BigDataService)*. 2019. № 5. 5 С.
10. Venkatesh K., Neethi M. Fault Analysis and Predictive Maintenance of Induction Motor Using Machine Learning. *Third International Conference on Electrical, Electronics, Communication, Computer Technologies and Optimization Techniques (ICECCOT)*. 2018. № 3. 5 С.
11. Satta R., Cavallari S., Pomponi E., Grasselli D., Picheo D., Annis C. A dissimilarity-based approach to predictive maintenance with application to HVAC systems. *CGnal Research Papers Series*. 2017. С. 20.
12. Fernandes S., Antunes M., Santiago A.R., Barraca J.P., Gomes D., Aguiar R.L. Forecasting Appliances Failures: A Machine-Learning Approach to Predictive Maintenance. *MDPI*. 2020. С. 13.

13. Bilski J., Kowalczyk B., Marchlewska A., Zurada J.M. Local Levenberg-Marquardt algorithm for learning feedforward neural networks. *JAISCR*. № 10. 2020. С. 299–316.

14. Sen P.C., Hajra M., Ghosh M. Supervised Classification Algorithms in Machine Learning: A Survey and Review. *Advances in Intelligent Systems and Computing*. № 937. 2018. С. 99–111.

**Stepanets O.V., Baginskyi V.O. SELF-DIAGNOSIS OF INDIVIDUAL HEATING POINT EQUIPMENT AS A MEANS OF OPTIMIZATION OF CONDITION ASSESSMENT AND EQUIPMENT MAINTENANCE**

*Individual heating points have become widely used by companies in the public sector or in many industries. These units provide appropriate working and living conditions in the cold season for the population, as well as take a direct part in technological processes in production.*

*Maintaining the efficiency and ensuring the smooth operation of a large number of heating points by classical methods requires the involvement of significant human resources in the short term and significant investment and is inefficient and costly. When an individual heating point fails, significant losses are inflicted on enterprises, the passage of technological processes is disrupted, and it becomes impossible to provide comfortable living and working conditions. That is why there is a need to improve or rethink approaches to diagnostics and equipment repair planning. One of the concepts proposed for use in solving such problems is self-diagnosis. This approach is aimed at analyzing the data of the individual heating point with the subsequent result in the form of a clear for a person assessment of his current condition. The introduction of such systems at various industrial facilities shows quite optimistic results of the use of self-diagnostic systems*

*The article considers the procedure of self-diagnostics of an individual heating point. The purpose of this system is to optimize the processes of maintenance and repair by assessing the condition of the equipment using specialized software for data analysis of heating point. Approaches to solving similar problems on equipment from different industries are analyzed. Based on the analysis, an approach using artificial neural networks and classification models was chosen to assess both the general condition of the equipment and its individual components. The object for practical research on the possibility of implementing the selected concept of the self-diagnostic system is a laboratory heating equipment, which simulates the operation of the heating system.*

*Based on the results of research conclusions are drawn that indicate the viability of this approach, and recommendations are given to improve the efficiency of this system.*

**Key words:** *self-diagnostics, predictive maintenance, artificial neural network, individual heating point, automation.*

**Топчій Н.В.**

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

**Білевська О.С.**

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

**АНАЛІЗ ЗАХИЩЕНОСТІ ІР-КАМЕР ВІДЕОСПОСТЕРЕЖЕННЯ**

*Відеоспостереження – основа сучасної системи безпеки. Воно забезпечує безпосередній моніторинг території, допомагає запобігти проникненням зловмисників, виявити підозрілу діяльність, визначити надзвичайні події та провести розслідування. Аналіз відеозаписів може допомогти виявити зловмисників, зокрема спроби підключення до локальної мережі з метою крадіжки важливої інформації.*

*Технологічний прогрес зробив ІР-відеоспостереження одним із найбільш розповсюджених рішень у сфері безпеки. Відеоспостереження все частіше розглядається не тільки як інструмент виявлення, а і як засіб отримання цінної інформації про діяльність співробітників та клієнтів. Відеоспостереження містить багато інформації, тому воно стало джерелом великої загрози.*

*Можливість використання аналітичних методів для вилучення корисної інформації з відеоданих набуває все більшого значення під час вибору систем відеоспостереження. З одного боку, відеосервери та відеокамери стають усе більш інтелектуальними завдяки нарощуванню процесорних потужностей.*

*У наш час дуже легко придбати камери відеоспостереження і відеореєстратори, тому що вони мають низьку ціну та повсюдно продаються. Ураховуючи цей споживчий попит, багато виробників розробляють нові ІР-камери, WEB-камери і відеореєстратори та не занадто піклуються про деталі їх захисту і вразливості.*

*Найпоширенішою є практика віддаленого доступу до камер відеоспостереження, адже для реалізації цього не потрібно володіти спеціальним програмним забезпеченням, а можна обійтися просто браузером і простими маніпуляціями, які може провести майже кожна людина. Якщо особа вміє знаходити ІР-адреси камер і їх вразливості, то вона може відкрити для себе тисячі камер у всьому світі.*

*Системи відеоспостереження, які підключені до мережі, дозволяють будувати розподілені системи з можливістю віддаленого доступу та широкими можливостями з інтеграції з іншими системами. Проте їм властиві і проблеми, пов'язані із захищеністю мереж, якими є вразливість даних і пристроїв.*

**Ключові слова:** ІР-камера, відеоспостереження, захист, злам, пароль, підключення, загроза, трафік, комутатор, відеореєстратор.

**Постановка проблеми.** Під час установаження камери безпеки або цифрового відеореєстратора необхідно зважати на той факт, що вони схильні до високого ризику зламу програмним забезпеченням, яке автоматично сканує на наявність уразливостей. Отож, важливо знати, як працюють атаки на камери безпеки, щоб захистити системи відеоспостереження. Водночас існує загроза несанкціонованого доступу до ресурсів корпоративної мережі передання даних, яка пов'язана із вадами в налаштуваннях безпеки бездротової мережі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У серпні 2017 року дослідники з компанії «Checkmarx» провели аналіз захищеності ІР-камер Loftek та VStartcam, які найбільш поширені в побуті у всьому світі. Під час дослідження виявлена серія вразливостей, які дозволяють

організувати атаки для отримання контролю за пристроями і їх використання для організації комп'ютерних мереж, заражених шкідливим програмним забезпеченням, або для проведення атак на комп'ютери в локальній мережі. Усього під час дослідження камер виявлено 21 вразливість, які можна зарахувати до категорії безпечних, або помірних. Серед наявних проблем виокремлюються зумовлені параметри входу без повідомлення про необхідність зміни пароля за замовчуванням, відсутність підтримки HTTPS (Hyper Text Transfer Protocol Secure), а також проблеми CSRF (Cross-site Request Forgery), які дозволяють виконувати iFrame (Inline Frame) для відправки команд на камери, що містяться у внутрішній мережі користувача, який зайшов на сторінку. Для приховування своєї присутності після успішного

отримання контролю над пристроєм зловмисник може завести нового користувача з ім'ям «%20» і порожнім паролем, який не буде помітний у списку користувачів в інтерфейсі адміністратора.

Експерт компанії Positive Technologies Ілля Сміт виявив і допоміг усунути критичну вразливість у вбудованому програмному забезпеченні IP-камер компанії Dahua, які широко використовуються для відеоспостереження в банківському секторі, енергетиці, телекомунікації, транспорті, системах «розумний дім» та інших сферах. Ця вразливість отримала назву «CVE-2017-3223» та є пов'язаною з можливістю переповнення буфера у web-інтерфейсі Sonia, який призначений для дистанційного керування і налаштування камер. Неавторизований користувач може відправити спеціально сформований POST-запит на вразливий web-інтерфейс і віддалено отримати привілеї адміністратора, що надає необмежений контроль над IP-камерою.

Незважаючи на значну кількість наукових публікацій, присвячених проблемам захищеності IP-камер, стрімкий розвиток систем комунікації та протоколів їх захисту зумовлює потребу подальших досліджень цієї тематики.

**Постановка завдання.** Метою статті є аналіз захищеності IP-камер відеоспостереження, виявлення нелегітимної активності з можливістю блокування несанкціонованих підключень до пристроїв або оповіщення сторонніх засобів фільтрації і блокування трафіка. Метою аналізу є своєчасне виявлення потенційних загроз і реагування на них (без негативного впливу на функціонування мережі відеоспостереження).

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для застосування найбільш ефективних інструментів захисту необхідно виокремити види загроз та провести аналіз методів нападу на системи відеонагляду. Можна виокремити три основних типи загроз для систем відеоспостереження:

- злам для отримання доступу до даних;
- злам для перехоплення керування або відключення системи;
- злам із метою несанкціонованого використання обчислювальних потужностей системи.

На стадії аналізу вразливостей системи необхідно врахувати, що системи відеоспостереження можуть використовуватися, зокрема, для розв'язання технологічних завдань і організації бізнес-процесів підприємства. Тому можливою ціллю зловмисників може бути інша система, а обладнання системи відеоспостереження може використовуватися як проміжний етап атаки. Крім

того, система відеоспостереження, як правило, інтегрована з іншими підсистемами безпеки і системами автоматизації. Питання інформаційної захищеності системи відеоспостереження переходить у завдання захисту всіх систем, у які вона інтегрована або з якими обмінюється даними.

В аналогових системах відеоспостереження відеокамера відправляє відеосигнал на монітор безпосередньо без стиснення. Це прості в монтажі, надійні, але громіздкі системи з обмеженим функціоналом. Сьогодні такі рішення використовують лише в невеликих системах із декількома камерами, які розміщені близько одна до одної або у вузькоспеціалізованих галузях. Аналогові системи мають обмежений функціонал і можуть тільки вести спостереження в режимі реального часу, а також записувати відеоінформацію на цифрові накопичувачі (DVR – Digital Video Recorder). Розширення функціоналу потребує витрат на додаткові пристрої і їх монтаж. Запис на DVR також має обмеження: декодування відео відбувається безпосередньо в DVR, а не на відеокамерах. Так, пристрій DVR необхідно фізично з'єднати з кожною камерою за допомогою кабелю.

IP-камера відеоспостереження знімає відео і транслює відеопотік у цифровому форматі з використанням мережевого протоколу, який забезпечує маршрутизацію пакетів. Тобто IP-камера складається з матриці, об'єктива, центрального процесора, процесора обробки, процесора стиснення та мережевого інтерфейсу. IP-камери відеоспостереження є самодостатнім окремим засобом спостереження, керування якими здійснюється через WEB-інтерфейси, передаючи всі потоки мережі. Майже всі сучасні цифрові IP-камери відеоспостереження побудовані на операційній системі Linux, яка дуже обмежена і має тільки найбільш необхідне для роботи. Сама по собі операційна система Linux безкоштовна, дуже надійна і стійка до зовнішніх впливів і зламів, тому виробники і будують на її базі відеореєстратори, відеосервери, камери відеоспостереження та інші пристрої.

Наявність модуля Wi-Fi і мережевого інтерфейсу RJ-45 дозволяють проводити безпосереднє підключення до IP-камер. Раніше для цього використовувалися спеціальні додатки, але зараз все можна проводити через стандартний браузер із мобільного телефону або комп'ютера. Їх слабкість у тому, що вони завжди включені і мають віддалений доступ, чим активно і користуються зловмисники.

Перевагою сучасних IP-камер є великий «інтелект», як-от система увімкнення запису за

розпізнаванням руху, автоматичне відстеження руху, виявлення залишених предметів, цифровий зум і фотофіксація особи, номера машини тощо. Крім того, IP-камери можуть стискати відео, відправляючи картинку з безлічі камер через один кабель. За допомогою кодування можна стискати відеофайли, скорочуючи завантаженість лінії зв'язку до 80%. Це зменшує вимоги до обсягів мережевих накопичувачів (NVR – Network video recorder), які можуть зберігати відеозаписи з якістю 720p тривалістю до 50 днів на жорсткому диску обсягом 4 Тб.

Зв'язок із NVR може здійснюватися через мережу Інтернет, тобто на основі IP-камер можна побудувати розподілену систему відеоспостереження, яка буде передавати дані відеозапису через мережу на віддалений накопичувач. Таку систему можна контролювати віддалено, зокрема з мобільних пристроїв, а мережевий накопичувач фізично не є доступним для потенційних зловмисників, оскільки може перебувати за сотні кілометрів від контрольованого об'єкта. Проте будь-які проблеми з переданням інформації можуть призвести до повного або часткового порушення працездатності системи.

Слід зазначити, що більшість IP-камер мають функцію P2P (Peer-to-peer) і можуть працювати без статичної IP-адреси, поєднуючи камеру і монітор через інтернет-сервер виробника камери. Мережа з функцією P2P заснована на рівноправності учасників. Найчастіше в такій мережі відсутні виділені сервери, а кожен вузол є як клієнтом, так і виконує функції сервера. Така організація дозволяє зберігати працездатність мережі за будь-якої кількості і будь-якому поєднанні доступних вузлів. Ця функція дозволяє організувати відеоспостереження у тому разі, коли провайдер не надає статичні IP-адреси. Крім того, налаштування камер P2P дуже просте.

Коли відбувається підключення камери з функцією P2P, їй присвоюється номер. За його допомогою відбувається визначення сервером можливості передання даних на сервері. Ідентифікатор звіряється і користувач отримує доступ до відеопотоку через персональний комп'ютер або пристрій під керуванням Android чи iOS. Крім отримання інформації, можна здійснювати безпосереднє керування роботою камери.

З одного боку, функція P2P в IP-камерах надає багато переваг, проте ця функція здатна змінити конфігурацію DMZ (Demilitarized Zone) на маршрутизаторі. DMZ – це спеціалізований локальний сегмент мережі, який містить загальнодоступні сервіси з повним відкритим доступом для внутріш-

ньої та зовнішньої мережі. У налаштуваннях маршрутизатора не можна використовувати для системи відеоспостереження функцію DMZ, оскільки вона може надати зловмисникові необмежений доступ до відеокамери, яка перебуває в мережі.

Для захисту лінії дротового зв'язку потрібно використовувати керовані комутатори. Необхідно здійснювати фільтрацію за MAC-адресою з підтримкою «білих» списків, роботу з VLAN, VPN, блокування портів, які не використовуються. Деякі комутатори можуть самі шифрувати вхідні дані та передавати їх далі на пристрій, який буде розшифровувати вхідний потік. Також комутатори можуть відслідковувати спроби недозволеного доступу або будь-які зміни в локальній мережі і повідомляти про них адміністратора системи.

Бездротові Wi-Fi IP/P2P-камери можуть заощадити значні засоби на встановленні відеоспостереження. Наразі пропускну здатності Wi-Fi мережі достатньо для передання відео високої роздільної здатності. Проте канал Wi-Fi може бути заблокований DDoS-атаками, відправленими через радіоканал, які спрямовані на порушення якості функціонування мережі або на абсолютне припинення доступу користувачів.

У цьому разі перерветься потік відео, який іде від камери на мережевий відеореєстратор. При цьому відключення мережі не означає припинення відеоспостереження, адже сучасні відеокамери мають убудовані карти пам'яті, які дозволяють згодом «вручну» переглянути відеозапис.

Загрозою конфіденційності відеоспостереження через мережу Wi-Fi є радіосніферінг. Сніфери займаються перехопленням та аналізом мережевого трафіка. Для того, щоб підвищити стійкість Wi-Fi мережі відеоспостереження, провести захист периметра і виявити спроби підключення небажаних користувачів, застосовуються програмно-апаратні комплекси. Ці прилади безперервно сканують кожен канал Wi-Fi і автоматично виявляють різнотипні загрози, включаючи поширені атаки шляхом перебору паролів, уторгнення за допомогою утиліт Airpwn, фазинг тощо. Програмне забезпечення сповіщає оператора про спробу вторгнення і дозволяє виявляти джерела перешкод, «глушилки» сигналу й іншу підозрілу активність у всьому діапазоні частот Wi-Fi, а також у мережах мобільного зв'язку 3G, 4G LTE і CDMA.

Необхідно враховувати безпеку не тільки камер, а і всієї інфраструктури, оскільки зловмисникам досить одного слабкого місця, щоб отримати доступ до всієї системи. Захищений зв'язок між камерами і мережевими компонентами забезпечується

шляхом призначення кожному елементу ключа автентифікації. Це електронний підпис, необхідний для перевірки всіх компонентів (від камер до керівного програмного забезпечення). Для забезпечення безпеки всього процесу автентифікації пристрої повинні підтримувати автентифікацію на основі імені користувача і пароля (IEEE 802.1x).

Для захисту даних відеоспостереження першочергове значення має шифрування потоків даних і збереженої інформації. Ефективний варіант реалізації шифрування на апаратному рівні – це використання у всіх IP-камерах і записувальних пристроях довіреного модуля TPM (Trusted Platform Module). Цей модуль є надійним сховищем криптографічних ключів для захисту даних. У разі зламу пристрою зломисники не зможуть скористатися витягнутою з нього інформацією. Коли дані потрапляють у керівне або клієнтське програмне забезпечення, криптографічний ключ допомагає розшифрувати дані, а також підтверджує, що камера – автентифікований мережевий партнер.

Ступінь конфіденційності даних відеоспостереження може варіюватися від несекретної до цілковито секретної. Але навіть мережі з надійними пристроями і безпечними каналами передання даних можуть стати жертвами людської помилки, тому надійні відеосистеми пропонують варіанти керування особистими правами доступу користувачів і підтримують дійсні галузеві стандарти. Рішення для інформаційного захисту систем відеоспостереження повинні відповідати провідним галузевим стандартам інфраструктури відкритих ключів PKI (Public Key Infrastructure). Можливі варіанти використання власних PKI-рішень виробника з власним сертифікаційним центром або підтримка сторонніх PKI-рішень.

Зміна пароля за замовчуванням для цифрового відеореєстратора або IP-камери не гарантує абсолютного захисту пристрою від атак зломисників. Технічні фахівці під час встановлення IP-камери або цифрового відеореєстратора змінюють пароль, установлений за замовчуванням, на інший, який видається більш безпечним і гарантує, що зломисник не зможе проникнути в систему. Ця процедура може допомогти, але не вирішує проблему захисту загалом. Камери відеоспостереження мають внутрішню операційну систему, а також інші програми, які можуть мати вразливості та дають можливість використовувати їх для отримання доступу до системи.

**Висновки.** Таким чином, можна виокремити основні рекомендації із гарантування безпеки бездротових Wi-Fi мереж:

Швидкий розвиток IP-відеоспостереження й інших мережевих систем безпеки вимагає безперервної співпраці між інтеграторами та виробниками для створення і реалізації передових методів, необхідних для забезпечення кібербезпеки.

Розглянемо основні способи рекомендації із гарантування безпеки, які пов'язані із системами відеоспостереження. Використовуючи їх, можна побудувати комплексну ефективну програму профілактики і реагування.

По-перше, необхідно регулярно проводити перевірку вразливості всіх компонентів системи IP-відеоспостереження. Ця перевірка повинна включати тестування всіх протоколів, апаратних засобів та прошивки. Таким чином, кожен компонент системи відеоспостереження буде ретельно перевірений на здатність протистояти кібератакам. Тестування протоколу – це перевірка безпеки мережевих комунікацій, надійності шифрування і можливості несанкціонованого перехоплення даних. Аналіз прошивки пристроїв повинен обов'язково містити встановлення доступних оновлень.

По-друге, необхідно обмежити кількість користувачів та мінімізувати фізичний доступ до системи IP-відеоспостереження. Чим більше людей можуть впливати на роботу компонентів або даних системи, тим більша ймовірність того, що система залишиться відкритою для кібератак.

По-третє, не можна використовувати паролі за замовчуванням. Підібрати до системи пароль (якщо він був установлений виробником) – не досить складно. Обов'язково необхідно міняти паролі до обладнання, які встановлені за замовчуванням. Таким чином, є велика ймовірність уникнення найбільш поширеної помилки жертв хакерських атак.

Не зайвим буде розглянути і заходи фізичної захисту систем відеоспостереження.

- використання замикальних телекомунікаційних шаф;
- розміщення серверного і важливого комутаційного обладнання у виокремленому замикальному приміщенні;
- прокладання кабелів у важкодоступних місцях;
- використання для прокладення і монтажу кабелів труб, закритих лотків і боксів, монтажних коробок;
- використання обладнання в спеціальному антивандальному виконанні на особливо відповідальних ділянках або в легкодоступних місцях.



**Список літератури:**

1. Дудатьев А.В., Баришев Ю.В., Войтович О.П. Метод оцінювання безпеки інформаційних ресурсів підприємства на основі аналізу вразливостей. *Вісник Хмельницького національного університету*. № 4. 2008. С. 78–83.
2. Erez Yalon, Exposing Wireless IP Camera Security Flaws. URL: [www.checkmarx.com](http://www.checkmarx.com).
3. Орлов С. IP-камеры с интеллектом. *Журнал сетевых решений/LAN*. 2013. № 11. С. 44–63.
4. Полевщиков А.А. *Кибербезопасность сетевого видеонаблюдения: теория и практика. Алгоритм безопасности*. 2017. № 5. С. 30–32

**Topchii N.V., Bilevska O.S. ANALYSIS OF THE SECURITY OF IP SURVEILLANCE CAMERAS**

*Video surveillance is the basis of a modern security system. It provides direct monitoring of the territory, helps prevent intruders from entering, detect suspicious activity, detect emergencies and conduct investigations.*

*Video analysis can help detect intruders, including detecting attempts to connect to a local network in order to steal important information.*

*Technological advances have made IP video surveillance one of the most common security solutions. Video surveillance is increasingly seen not only as a detection tool, but also as a means of obtaining valuable information about the activities of employees and customers. Video surveillance contains a lot of information, so it has become a source of great threat.*

*The ability to use analytical methods to extract useful information from video data is becoming increasingly important when choosing video surveillance systems. On the one hand, video servers and camcorders are becoming more intelligent thanks to the increase in processing power.*

*Nowadays, it is very easy to buy CCTV cameras and DVRs because they have a low price and are sold everywhere. Taking into account this consumer demand, many manufacturers are developing new IP cameras, WEB cameras and video recorders, but they do not care much about the details of their protection and vulnerabilities.*

*The best practice of remotely accessing CCTV cameras is due to their poor security. To implement this, you do not need to have special software, you can do just a browser and simple manipulations that can be carried out by almost everyone. If a person knows how to find the IP addresses of cameras and their vulnerabilities, then he can discover thousands of cameras around the world.*

*Video surveillance systems that are connected to the network allow you to build distributed systems with the ability to remotely access and ample opportunities for integration with other systems. However, they also have problems that are associated with the security of networks – first of all, the vulnerability of data and devices.*

**Key words:** *IP camera, video surveillance, protection, hacking, password, connection, threat, traffic, switch, video recorder.*

**Топчій Н.В.**

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

## АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД СУЧАСНИХ ОПТИЧНИХ СИСТЕМ: ПЕРЕВАГИ ТА НЕДОЛІКИ

*Проведено аналітичний огляд сучасних оптичних систем, визначено їх переваги та недоліки. Запропоновано схеми оптичних систем, які працюють на базі різних методів (відповідно до завдання, яке покладено на оптичний пристрій). Описано схему оптичного пристрою для тривимірного контролю розмірів деталей тіньовим методом, методом структурованого світла та телевізійним методом. Підкреслено, що принципи реалізації цих методів засновані на тому, що освітлювач формує випромінювання у сфері вимірювання положення з високим ступенем однорідності, поверхневий дефект розташовується під кутом до торцевої поверхні, у цьому разі відбувається розсіювання світла, що призводить до формування контрастного зображення дефекту. Наголошено, що для обробки інформації використовуються локальні дисперсійні характеристики інтенсивності зображення, алгоритми навчання та логічні правила ухвалення рішень. Наведено схему оптичної системи, яка використовує метод триангуляції. Обґрунтовано ефективність застосування портативного пристрою стандартного виду, який представлено жорстко закріпленою балкою, на краях якої встановлені камери високої роздільної здатності. Зазначено, що підсвічування об'єкта здійснюється за рахунок інфрачервоного випромінювання (для цього встановлений ІК-генератор). Запропоновано оптичну систему, що використовує метод триангуляції для вимірювання геометричних параметрів рухомих об'єктів, технічне рішення завдання контролю засноване на принципі самосканування з використанням набору датчиків вимірювання активного триангуляційного типу, де кожна частина деталі сканується паралельно і незалежно двома (внутрішнім і зовнішнім) вимірювальними датчиками. Розкрито принцип дії оптичної системи, що заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла. Для наведених систем сформовано перелік переваг та недоліків, визначено принципи підвищення швидкодії та ефективності.*

**Ключові слова:** оптична система, вимірювальна техніка, контроль, точність, геометричні розміри, безконтактний метод.

**Постановка проблеми.** Досягнення високого рівня якості виробництва в сучасній промисловості тісно пов'язане з проблемою застосування засобів вимірювальної техніки певної точності і швидкістю виконання вимірювань та контролю. Нині розроблено та успішно працює низка відомих методів і способів неконтактного (дистанційного) визначення лінійних розмірів і форми поверхні досліджуваних об'єктів, які реалізовані на базі відомих оптичних систем. Сучасні методи визначення орієнтацій поверхні і глибини (форми) за зображенням, як правило, розглядають відображену інтенсивність на непрозорих матеріалах. Крім того, під час виробництва складних деталей є безліч важкодоступних місць, для вимірювання яких доводиться застосовувати велику кількість нестандартних засобів вимірювань, як-от штангенінструмент. Для розширення можливостей і підвищення точності вимірювань необхідно розширювати інформативність оптичних систем, які отримують інформацію про об'єкт за рахунок різних властивостей оптичного

випромінювання, тобто отримати більше інформації про об'єкт, не вдаючись до додаткових засобів, наприклад за рахунок поляризації випромінювання. Вирішення цих проблем вимагає від метрологічної служби підприємства пошуку способів ефективного застосування 3D-вимірювальних оптичних систем для порівняння результатів вимірювань із заданою ідеальною 3D-моделлю еталона.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Генезис наукової думки стосовно оптичних систем припадає на початок ХХ століття. Учені різних наукових течій формували власне бачення структурного складника сучасної оптичної системи.

В.О. Чадюк [1] розглянув фізичні процеси та засоби передавання випромінювання (оптичні лінії зв'язку), перетворення випромінювання (помноження його частоти, фотоприймання), використання випромінювання для запису та оброблення інформації, а також для вимірювання різних величин. Особливу увагу приділено новому напрямку оптоелектроніки – нанофотоніці.

Дзеркальні панкреатичні об'єктиви дослідили І.Г. Чиж та О.В. Шкарбан [2]. Науковці розглянули оптичні системи дзеркальних об'єктивів зі змінною фокусною відстанню. У статті вказані переваги та недоліки систем з одним та декількома рухомими дзеркалами.

І.О. Брагинець, О.Г. Кононенко, Ю.О. Масюренко [3] розкрили питання аналітичного огляду та здійснили вибір оптичних лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів у потужних гідрогенераторах. Авторами проведено аналіз відомих оптичних лазерних систем (далі – ОЛС) для вимірювання лінійних розмірів та переміщень механічних об'єктів із метою їх застосування для визначення повітряних зазорів потужних гідрогенераторів. Установлено фактори, які брались до уваги під час розгляду вказаних ОЛС. Указано на властивості конструкції гідрогенераторів і вимоги до точності та часу однократного вимірювання повітряного зазору. Розглянуто основні методи вимірювання відстані, на яких базуються ОЛС, і визначено переваги та недоліки кожного з них.

Оптико-електронний метод визначення геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій розкрили В. В. Кухарчук та В. Й. Білинський [4]. У статті запропоновано метод контролю геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій і оптико-електронний прилад, який дозволяє вимірювати розміри дефектів досліджуваних об'єктів, зокрема тріщин стін із субпіксельною точністю.

Із зарубіжних праць варто вказати на роботи таких авторів, як Schubnell J., Jung M., Le C.H. [5], C. K. Toh, A. N. Le, and Y. Z. Cho [6], Schork B. [7], Stenberg T, Lindgren E, and Barsoum Z [8], Harati E., Svensson L-E, and Karlsson L. [9], Babicz, S., Stawarz-Graczyk, B., Wierzba, P. [10], Kosarac, A., Sikuljak, L., Salipurevic M., Mladenovic C., Zeljkovic M. [11], Pawlus P., Reizer R., Wiczorowski M. [12] та ін.

Ураховуючи описані наукові напрацювання з теми, питання структурованого аналітичного огляду сучасних оптичних систем залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

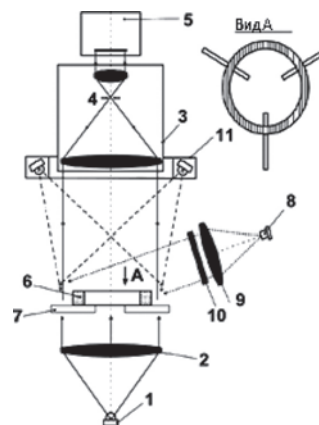
**Постановка завдання.** Мета статті – розглянути дійсні сучасні оптичні системи, що створюють виміряні 3D-моделі і порівнюють їх з еталонами, що дозволить вирішити проблему швидкості і точності вимірювань.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Оптична система 3D-вимірювань становить мобільну координатно-вимірювальну машину, яка використовує в основі методи вимірювання.

Однією з найбільш застосовуваних на сучасних промислових підприємствах є автоматична оптична система для безконтактного 3D-контролю всіх геометричних розмірів виробів. Принцип вимірювання пояснюється оптичною схемою, зображеною на рис. 1. Для контролю розмірів деталей використовуються три методи: тіньовий метод вимірювання внутрішнього і зовнішнього діаметрів і співвісності цих діаметрів, метод структурованого світла для вимірювання висоти, площинності і паралельності їх лицьових поверхонь, а також телевізійний метод для виявлення дефектів на лицьових поверхнях.

Тіньовий канал складається зі світлодіода 1, лазерних діодних колімувальних лінз 2, телецентричного об'єктива 3 і приймальної цифрової камери 5. Деталь 6 розміщується на столі 7. Структурований світловий канал включає напівпровідниковий лазер 8, колімувальний об'єктив 9 і дифракційний оптичний елемент 10, утворюючи  $N$  світлових смуг. Реєстрація зображення смужок здійснюється камерою 5 через об'єктив 3. Канал передавання включає кільцевий освітлювач 11, об'єктив 3 і камеру 5. Таким чином, для всіх геометричних вимірів використовується один і той же блок фотоприймача кільцевого контролю параметрів різними методами, що забезпечує компактність і спрощує конструкцію пристрою.

Принциповою проблемою в контролі тривимірних об'єктів тіньовим методом є облік впливу товщини  $d$  цих частин, а також параметрів оптичної системи (кутового розміру джерела й апертурної діафрагми) У цьому разі теорія формування зображення Кірхгофа-Френеля не працює [2].



**Рис. 1.** Схема оптичного пристрою для тривимірного контролю розмірів деталей тіньовим методом, методом структурованого світла та телевізійним методом: 1 – світлодіод, 2 – колімувальна лінза, 3 – телецентричний об'єктив, 4 – апертурна діафрагма, 5 – цифрова камера, 6 – деталь, 7 – стіл, 8 – напівпровідниковий лазер, 9 – колімувальний об'єктив, 10 – дифракційний оптичний елемент, 11 – освітлювач

Виявлення тріщин і дефектів металізації на торцях деяких деталей (як-от кілець) – дуже важлива проблема для замовників. Для цього використовується кільцевий освітлювач на базі 6 світлодіодів (розташований поруч з об’єктивом). Освітлювач формує випромінювання у сфері вимірювання положення з високим ступенем однорідності. Як правило, поверхневий дефект розташовується під кутом до торцевої поверхні. У цьому разі відбувається розсіювання світла, що призводить до формування контрастного зображення дефекту. Для обробки інформації використовуються локальні дисперсійні характеристики інтенсивності зображення, алгоритми навчання та логічні правила ухвалення рішень.

$$I_{\text{пр.рівень}} = I(0) = \frac{1}{4} + \frac{1}{3\pi^2} \frac{\theta_s^2}{\theta_{ap}^2} - \frac{\theta_{ap}}{\sqrt{2\pi}\theta_{cr}} \quad (1)$$

де  $I_{\text{пр.рівень}}$  – пороговий рівень;  
 $\theta_{cr} = \sqrt{\lambda/d}$  – критичний дифракційний кут, під яким тривимірні ефекти максимальні;  
 $\theta_s$  – кутовий розмір джерела;  
 $\theta_{ap}$  – отвір.

Оптична система, яка використовує метод триангуляції, наведена на рис. 2. Портативний пристрій стандартного виду представлено жорстко закріпленою балкою, на краях якої встановлені камери високої роздільної здатності. Підсвічування об’єкта здійснюється за рахунок інфрачервоного випромінювання, адже для цього встановлений ІК-генератор. Така система працює безконтактно. Завдання створення 3D-вимірювальних систем пов’язане зі спробами розробки та використання машинного зору. Можна сказати, що загальний

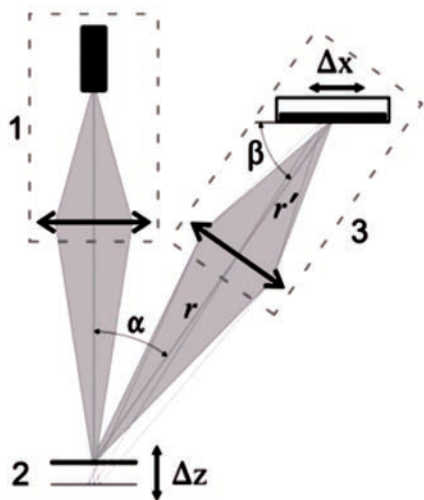


Рис. 2. Оптична система, що використовує метод триангуляції:  
 1 – випромінювач, 2 – вимірюваний об’єкт, 3 – приймач

принцип роботи систем машинного зору полягає в тому, що сигнал, отриманий від аналогової відеокамери, перекладається у цифрову форму, яка становить набір пікселів (точок) відповідно до перепадів яскравості, на базі яких комп’ютер обчислює кордон вимірюваного об’єкта на площині. Набагато важче визначати висоту, а також координати перебування кожної точки в тривимірному просторі, що моделюється. Для визначення висоти, а також інших розмірів у більшості оптичних приладів використовується метод оптичної триангуляції. Застосування методу триангуляції дозволяє досягати точності в 0,001 частки вимірюваної відстані [1; 2].

Оптична система, що використовує метод триангуляції, складається з трьох частин: випромінювач 1, вимірюваний об’єкт 2 і приймач 3.

Випромінювач 1 формує зображення світлової плями на вимірюваному об’єкті 2. Потім розсіяний вимірюваним об’єктом світловий промінь потрапляє у фотоприймач 3. Фотоприймач фіксує зображення розсіяного світлового променя. Переміщення вимірюваного об’єкта  $\Delta z$  створює зсув світлового променя у фотоприймачі  $\Delta x$ . Залежність переміщення вимірюваного об’єкта  $\Delta z$  від зсуву світлового променя  $\Delta x$  має такий вигляд:

$$\Delta z = r \cdot \sin\varphi / \sin(\alpha - \varphi), \quad (2)$$

де  $\varphi = \arctg(A \cdot \Delta x / (1 + B \cdot \Delta x))$ ,

$$A = \sin\beta / r',$$

$$B = -\cos\beta / r',$$

$r$  і  $r'$  – відстань від вимірюваного об’єкта 2 відповідно до об’єктива фотоприймача 3 і від об’єктива до фотоприймача [3].

Оптична система для вимірювання геометричних параметрів рухомих об’єктів наведена на рис. 3. Технічне рішення завдання контролю засноване на принципі самосканування з використанням набору датчиків вимірювання активного триангуляційного типу, де кожна частина деталі сканується паралельно і незалежно двома (внутрішнім і зовнішнім) вимірювальними датчиками. Подальша комбінована обробка дозволяє визначити профіль поверхні руху і розрахувати необхідні геометричні параметри.

Наведена оптична система вимірює такі параметри рухомих об’єктів:

- ширину (A);
- товщину обода (B);
- товщину фланця (C);
- діаметр поверхні руху (D);
- відстань між внутрішніми гранями (E);

- рівномірну прокатку ( $F$ );
- різницю діаметрів у парних об'єктах.

Описана оптична система дозволяє зменшити кількість осей із некоректно реконструйованим профілем в умовах зовнішнього впливу, чим може підвищити достовірність результатів вимірювань. Похибка вимірювання становить близько 0,5 мм.

Вимірювання локального профілю металевої поверхні є актуальним завданням у багатьох галузях промисловості, особливо для профільного контролю 3D-деталей і їх поверхневих дефектів із мікрометровим/нанометровим дозволом. Оптична система нового покоління із застосуванням методу інтерферометрії білого світла наведена на рис. 4.

Принцип вимірювання профілю поверхні об'єкта заснований на явищі інтерференції частково когерентних (в часі) світлових хвиль, випромінюваних поліхроматичним джерелом світла (як-от лампою розжарювання).

Положення і поперечна конфігурація інтерференційної зони на ПЗЗ-матриці визначається перетином еталонної поверхні і поверхні під виміром. Цей перетин визначає ізолінію, яка відповідає заданій глибині на осі  $Z$  в напрямку променя світла, що падає на об'єкт. Реєстрація цих ділянок ПЗЗ-камерою дозволяє відновити цю ізолінію. Для отримання тривимірної моделі досліджуваних об'єктів використовується високоточна процедура сканування на глибині  $Z$  шляхом зміни умовного положення вимірюваної поверхні і блоку інтерферометра.

Діапазон сканування залежить від довжини когерентності джерела світла і може досягати десятків мікрон.

Використовуючи атомне гладке дзеркало, а також програмно-алгоритмічне забезпечення в опорному плечі інтерферометра, можна досягти підвищення якості вимірювання до 20 пм.

Застосування оптичної системи, заснованої на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла, дуже ефективно для науки, включаючи вивчення наноструктур і наноматеріалів, вимірювання товщини плівки, перевірки поверхні різних полімерів, виявлення мікротріщин і нанометрології.

Генератор лазерного зображення працює в полярних координатах. Принцип

його роботи заснований на формуванні візерунків на поверхневій підкладці з покриттям фоторезистом, сфокусованим лазерним променем у режимі кругового реєстрового сканування (рис. 5).

Основа розміщується на високоточному шпинделі, який обертається мотором і управляється модулем обертання. Лазерний промінь фокусується на підкладку записувальною головкою мікроскопа, а його потужність змінюється оптичним модулятором під керуванням приводу. Переміщення  $f_i$  здійснюється високоточною кареткою, на якій розміщені лазерний модулятор і друкарська головка мікроскопа. Зсув  $f_i$  вимірюється лазерним інтерферометром. Запис інформації на криволінійній поверхні здійснюється рухомою записувальною головкою мікроскопа (у вертикальному напрямку  $Z$ ) з використанням модуля автофокусування.

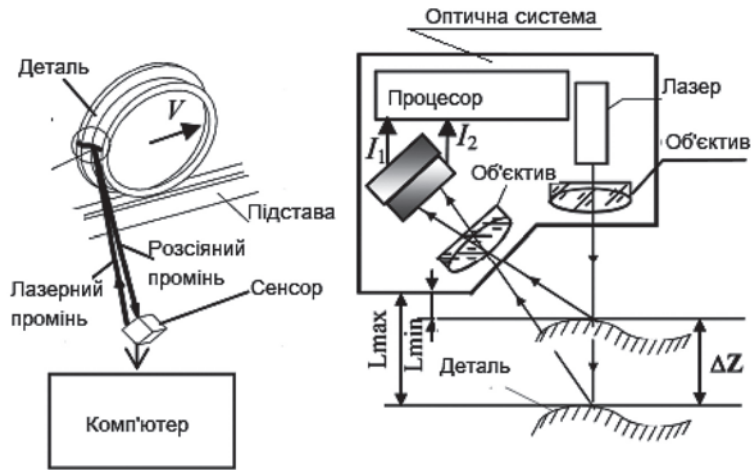


Рис. 3. Оптична система, що використовує метод триангуляції для вимірювання геометричних параметрів рухомих об'єктів

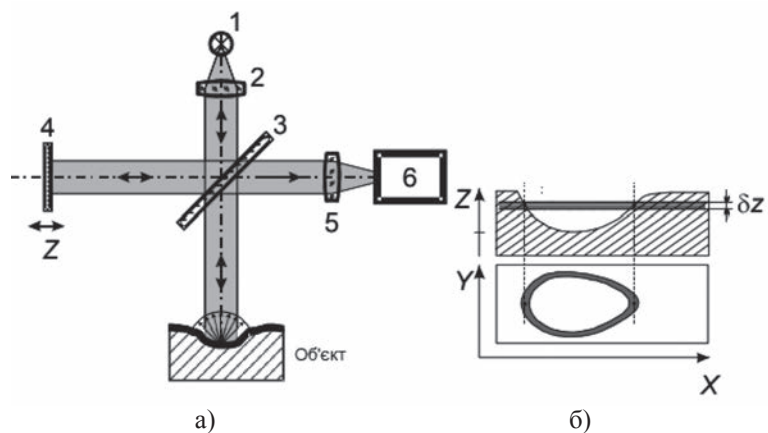


Рис. 4. Оптична система, заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла: інтерферометр Майкельсона (а), формування ізолінії (б): 1 – джерело білого світла, 2 – колімація, 3 – розділене дзеркало, 4 – опорне дзеркало, 5 – ціль, 6 – ПЗЗ-матриця камери,  $I(z)$  – інтенсивність корелограми

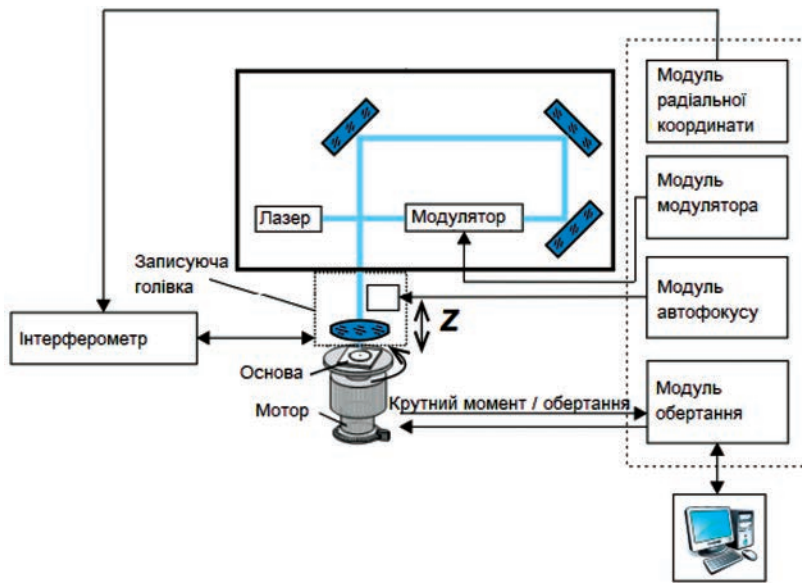


Рис. 5. Оптична система, заснована на принципі вимірювання профілю поверхні методом інтерферометрії білого світла

Багатоканальна модуляція, що поєднує аналогову і цифрову пряму модуляцію лазерного струму й акустооптичну модуляцію, розширює динамічний діапазон інтенсивності лазерного променя, який потрібен у процесі растрового сканування, враховуючи великий діапазон лінійної швидкості.

Переваги застосування оптичних систем 3D-вимірювань:

**Портативність.** Загалом, оптичні системи мають компактні розміри і можуть використовуватися в будь-яких стандартних приміщеннях.

**Незалежність.** Оптичні системи не залежать від освітленості об'єкта, оскільки на їх базі користуються інфрачервоне випромінювання.

**Широкі можливості.** Дослідження статичного стану, порівняння з CAD-моделлю, виявлення браку; виміри об'єкта в динаміці, визначення навантажень та деформаційних змін.

**Простота калібрування.** Більшу частину налаштувань оптична система виконує автоматично і не збивається з часом.

**Компенсація.** Виробничі вимірювання завжди пов'язані з роботою у важких умовах (вібрації, сильні шуми, переміщення об'єкта). Автоматизо-

вана оптична система вміє розпізнавати похибки й ефективно компенсувати їх.

**Окупність.** Ураховуючи високу швидкість роботи, підвищену ефективність та корисність, сучасна оптична система здатна з успіхом замінити будь-які сучасні способи вимірів і швидко окупитися.

До недоліків розглянутих систем належать:

**Вартість.** Оптичні системи сучасного покоління є дорогими.

**Сферична аберація.** Виникає через розбіжності фокусів для променів світла, які проходять на різних відстанях від оптичної осі.

**Хроматична аберація.** Виникає через заломлення світла під час фокусування.

**Дисторсія.** Виникає під час аберації оптичної системи, коли порушується подібність між об'єктами.

Однак зазначені недоліки можна виправити за рахунок автоматизації оптичних систем та застосування елементів підвищеної якості.

**Висновки.** У роботі розглянуто дійсні сучасні оптичні системи, що створюють виміряні 3D-моделі і порівнюють їх з еталонами, що дозволило вирішити проблему швидкості і точності вимірювань. Нині є безліч оптичних систем, що дозволяють вирішити значний спектр завдань, пов'язаних із точністю вимірювань. Кожна із них базується на методах вимірювання та на відповідних алгоритмах розпізнавання у 3D-вимірах. Сучасні оптичні системи забезпечують швидкість і зручність за умов масового контролю деталей у промисловому виробництві, що дозволяє вирішити безліч інших завдань на основі вдосконалення засобів і алгоритмів.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на вдосконаленні сучасних оптичних систем за рахунок упровадження автоматизованого модуля для мінімізації розглянутих недоліків та підвищення якості вимірів на промисловому підприємстві.

#### Список літератури:

1. Чадюк В.О. Оптоелектроніка: від макро до нано. Передавання, перетворення та приймання оптичного випромінювання : навч. посіб. У 2-х кн. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2019. Кн. 2. 336 с.
2. Шарбан О.В., Чиж І.Г. Дзеркальні панкратичні об'єктиви. «Погляд у майбутнє приладобудування»: матеріали XI науково-практичної конференції студентів та аспірантів (15–16 травня 2018 р., м. Київ, Україна): збірник статей / КПІ ім. Ігоря Сікорського, ПФФ. Київ : Центр учбової літератури, 2018. С. 184–186.

3. Брагинець І.О., Кононенко О.Г., Масюренко Ю.О. Аналітичний огляд та вибір оптичних лазерних систем для вимірювання повітряних зазорів у потужних гідрогенераторах. *Праці Інституту електродинаміки Національної академії наук України*. 2018. Вип. 49. С. 103–110.
4. Кухарчук В.В., Білинський В.Й. Оптико-електронний метод визначення геометричних параметрів поверхневих механічних деформацій. *Вісник КДПУ імені Михайла Остроградського*. 2008. Вип. 4. (51). Ч. 2. С. 125–127.
5. Schubnell J., Jung M., Le C.H. *et al.* Influence of the optical measurement technique and evaluation approach on the determination of local weld geometry parameters for different weld types. *Weld World*. 2020. Vol. 64. P. 301–316.
6. Jonsson B., Samuelsson J., Marquis G.B. Development of weld quality criteria based on fatigue performance. *Weld World*. 2011. Vol. 55(11–12). P. 79–88.
7. The effect of the local and global weld geometry as well as material defects on crack initiation and fatigue strength / B.Schork, *et al.* *Engineering Fracture Mechanics*. 2018. Vol. 198. P. 103–122.
8. Stenberg T., Lindgren E., & Barsoum Z. Development of an algorithm for quality inspection of welded structures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* 2012. Vol. 226.6. P. 1033–1041.
9. Harati E., Svensson L. E., & Karlsson L. The measurement of weld toe radius using three non-destructive techniques. In *6th International Swedish Production Symposium 2014*. 2014. P. 1–8.
10. Babicz S., Stawarz-Graczyk B., Wierzba P. Phase object observation system based on diffraction phase microscopy. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. 25(1), 213–221.
11. Košarac, A., Šikuljak, L., Šalipurević, M., Mladenović, C., & Zeljković, M. Prediction of self-excited vibrations occurrence during aluminium alloy AL 7075 milling. In *2019 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA (INFOTEH) IEEE*. 2019. P. 1–6.
12. Pawlus, P., Reizer, R., & Wiczorowski, M. Comparison of results of surface texture measurement obtained with stylus methods and optical methods. *Metrology and Measurement Systems*. 2018. Vol. 25(3). P. 589–602.

#### **Topchii N.V. ANALYTICAL REVIEW OF MODERN OPTICAL SYSTEMS: ADVANTAGES AND DEFECTS**

*An analytical review of modern optical systems, identified the advantages and disadvantages of these systems. Schemes of optical systems that work on the basis of different methods in accordance with the task assigned to the optical device are proposed. The scheme of the optical device for three-dimensional control of the sizes of details by a shadow method, a method of structured light and a television method is described. It is emphasized that the principle of implementation of this method is based on the fact that the illuminator generates radiation in the measurement area with a high degree of homogeneity, the surface defect is at an angle to the end surface, in this case light scattering, which leads to a contrasting image of the defect. It is emphasized that local dispersion characteristics of image intensity, learning algorithms and logical decision-making rules are used for information processing. The scheme of the optical system, which uses the method of triangulation, is given. The efficiency of application of a portable device of standard type, which is represented by a rigidly fixed beam, on the edges of which high-resolution cameras are installed, is substantiated. It is noted that the illumination of the object is carried out by infrared radiation – for this purpose an IR generator is installed. An optical system using the triangulation method to measure the geometric parameters of moving objects is proposed, the technical solution of the control problem is based on the principle of self-scanning using a set of sensors of active triangulation type, where each part is scanned in parallel and independently by two (internal and external) measuring sensors. The principle of operation of the optical system based on the principle of measuring the surface profile by the method of white light interferometry is revealed. The list of advantages and disadvantages is formed for the given systems, the principles of increase of speed and efficiency are defined.*

**Key words:** optical system, measuring equipment, control, accuracy, geometric dimensions, non-contact method.

**Чайковський С.Ю.**

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

## РОЗРОБЛЕННЯ МЕТОДИК ОЦІНЮВАННЯ РІВНЯ ЯКОСТІ ПІД ЧАС ПРОВЕДЕННЯ ВИПРОБУВАНЬ ЯК АКТУАЛЬНИЙ НАПРЯМ ДОСЛІДЖЕНЬ

Здійснено дослідження, структурування та розробку методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань продукції. Визначено принципи проведення оцінки якості продукції. Структуровано такі основні завдання оцінки якості, як формування різних (економічних, технічних, ергометричних, гігієнічних та ін.) вимог до продукції, достовірна оцінка досягнутого рівня якості продукції шляхом проведення випробувань, контроль якості продукції в процесі виробництва і приймання продукції замовником тощо. Підкреслено, що в процесі проектування метрологічне забезпечення спрямоване на досягнення необхідних характеристик розроблюваної продукції шляхом науково обґрунтованого вибору методів вимірювань; визначення сукупності параметрів і характеристик, що підлягають вимірам; установлення значень допустимих відхилень на кожен із параметрів; обліку умов проведення вимірювань; використання необхідних засобів, що забезпечують вимір і контроль обраних параметрів і характеристик виробів і технологічних процесів із необхідною точністю; правильного виконання вимірювань і обробки їх результатів відповідно до стандартизованих методик або інноваційних, що підлягають розробленню. Здійснено розроблення послідовності та етапів проведення робіт зі створення методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань. Запропоновано та математично обґрунтовано шкали оцінювання якості під час проведення випробувань, які використовуються як формування відносин властивостей або їх заходів на вимірюваній множині. Зазначено, що кожна з наведених шкал оцінювання якості під час проведення випробувань має свою сферу застосування, однак вони не є взаємозамінними та застосовуються окремо одна від одної. Наголошено, що за умов комплексної оцінки якості під час проведення випробувань оцінюються найважливіші показники якості, від яких залежить придатність продукції.

**Ключові слова:** методика, розробка, якість, випробування, продукція, кваліметрія, метод, метрологія, характеристика, стандартизація.

**Постановка проблеми.** У забезпеченні високоякісних показників зразків продукції, що випускаються на підприємстві, першочергова роль належить достовірним вимірам технічних параметрів: без правильно виконаних вимірювань не можна говорити про якість та надійність останніх. Достовірність результатів вимірювань залежить від обраних, методів і засобів вимірювань, а також від правильного визначення їх результатів, які повинні забезпечити єдність і необхідну точність. У процесі виробництва і експлуатації підтримка конкурентоспроможності продукції на необхідному рівні досягається за рахунок інформації, одержуваної в результаті:

– вимірювання метрологічних характеристик, що визначають якість вимірювання параметрів під час контролю, діагностики та прогнозування технічного стану;

– вимірювання режимів і умов функціонування продукції.

Метрологічне забезпечення якості продукції сприяє отриманню достовірної інформації і має дві

мети: її використання в процесах застосування за призначенням і управління технічним станом. Щоб конкретизувати призначення вимірювань і порядок їх виконання, доцільно розглянути основні етапи життєвого циклу продукції: підготовку до застосування, застосування за призначенням, технічне обслуговування, зберігання тощо.

Якість є найбільш узагальненою і водночас єдиною характеристикою предмета, що відбиває сукупність нескінченної кількості всіх його властивостей. Товар повинен володіти такою сукупністю фізико-механічних, хімічних, електричних та інших властивостей, яка становить його споживчу вартість і відповідає вимозі покупця товару.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В останні кілька років чимало як зарубіжних, так і вітчизняних учених, здійснили відкриття у сфері оцінювання рівня якості під час проведення випробувань продукції.

С.В. Дишлюк [1] провів дослідження методів метрології, її оцінку якості та основні завдання.



С.М. Бондаренко та А.Ю. Леус [2] розглянули диференційний, комплексний та експертний методи оцінювання рівня якості продукції на підприємстві та класифікацію показників якості.

Якість та надійність технологічних систем дослідили Г.П. Клименко, Я.В. Васильченко та М.В. Шаповалов [3]. У посібнику викладено основні поняття якості та надійності технологічних систем. Наведено роз'яснення до вивчення кваліметричного підходу до управління якістю, результати досліджень якості і надійності технологічних систем на прикладі збірного різального інструменту та процесів його експлуатації.

У [4] розглянуто основні теоретичні питання аналізу оцінки рівня якості і побудови системи якості продукції в машинобудівному виробництві, сучасні підходи і методи управління якістю, принципи організації виробництва, його сертифікації. Приділено увагу способам виявлення першопричин браку та оцінки їх впливу на якість.

В.Н. Шапошник, І.М. Щур, І.І. Сидорко, Р.П. Симонов та Е.В. Білоконь [5] висвітлюють питання забезпечення якості проведення випробувань у процесі акредитації випробувальних лабораторій. Авторами підкреслено, що проблема забезпечення якості продукції є комплексною (науковою, технічною, економічною та соціальною). У її вирішенні мають брати участь висококваліфіковані спеціалісти, які вільно володіють сучасними методами управління якістю (незалежно від того, в якому секторі вони працюють (державному чи приватному, на великих підприємствах чи в малому й середньому бізнесі, оскільки загальні принципи організації й забезпечення високої якості продукції та послуг не залежать від розміру підприємства)).

Із зарубіжних авторів варто вказати на роботи таких науковців: М.М.В. Abdullah, J.J. Tari [6], L.C.F.M. Barbosa, O. Oliveira, G. Santos [7], G.W. Corder, D.I. Foreman [8], M. Hollander, D.A. Wolfe, E. Chicken [9], A.S. Shirkorshidi, S. Aghabozorgi, T.Y. Wah [10], J. Uthayakumar, T. Vengattaraman, P. Dhavachelvan [11], K. Vasileiou, J. Barnett, S. Thorpe, T. Young [12], Y. Wooluru, D.R. Swamy, P. Nadesh [13] та ін.

Ураховуючи описані наукові напрацювання з теми, питання розробки методик оцінювання рівня якості під час проведення випробувань продукції залишається відкритим та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідити, структурувати та розробити методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань продукції.

### Виклад основного матеріалу дослідження.

Необхідний рівень якості продукції закладається вже на етапі її розробки, реалізується на етапах технологічної підготовки виробництва і власне виробництва і підтримується у процесі експлуатації. При цьому вирішуються такі основні завдання:

- формування різних (економічних, технічних, ергометричних, гігієнічних та ін.) вимог до продукції;

- достовірна оцінка досягнутого рівня якості продукції шляхом проведення випробувань;

- контроль якості продукції в процесі виробництва і приймання продукції замовником тощо.

Очевидно, що контроль якості посідає важливе місце в розробці і виробництві продукції, оскільки використовується для своєчасного виявлення помилок, що допускаються під час розроблення для отримання повної і достовірної інформації про всі відхилення в процесі її виготовлення.

Досягнення високих показників у розроблюваних зразках продукції можливе за умов забезпечення необхідної точності і повноти вимірювань параметрів розроблюваних зразків, а також умов, за яких ці параметри вимірюються. У процесі розроблення зразків продукції вимірювання є одним з основних джерел отримання необхідної та достовірної інформації про досягнутий рівень технічних характеристик. Пояснюється це тим, що розрахунки, які виконуються під час проектування технічних систем, мають порівняно невисоку точність. Для отримання остаточних проектних рішень необхідні експериментальні дослідження характеристик і режимів роботи створюваних зразків продукції.

Результати вимірювань використовують також для своєчасного виявлення і попередження помилок і дефектів, допущених у проектуванні. Тому під час розроблення продукції проводять різні випробування дослідних зразків у різних лабораторіях, а також у реальних умовах експлуатації. При цьому основними засобами отримання інформації є різні вимірювальні прилади, системи і комплекси.

У процесі проектування метрологічне забезпечення спрямоване на досягнення необхідних характеристик розроблюваної продукції шляхом науково обґрунтованого вибору методів вимірювань; визначення сукупності параметрів і характеристик, що підлягають вимірам; установлення значень допустимих відхилень на кожен із параметрів; обліку умов проведення вимірювань; використання необхідних засобів, що забезпечують вимір і контроль обраних параметрів

і характеристик виробів і технологічних процесів із необхідною точністю; правильного виконання вимірювань і обробки їх результатів відповідно до стандартизованих методик або інноваційних, що підлягають розробці.

Наразі на підприємствах використовуються методики з оцінювання рівня якості під час проведення випробувань, відповідно до яких оцінюються окремі напрями (рівень відмов, показники надійності, технічний рівень, витрати на якість тощо). Сучасні методи оцінювання якості обмежуються проведенням контролю під час виготовлення продукції та проведення всіх видів досліджень, тобто практично виходить, що оцінюються зразки, які були виготовлені та надійшли в експлуатацію. Оцінка якості зводиться до перевірки характеристик виробів, тобто до проведення контрольних операцій із визначення відповідності показників якості тим нормам, які регламентовані нормативними вимогами.

Послідовність та етапи проведення робіт у межах нової методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань наведено на рисунку 1.

Наведена послідовність забезпечує розробку методики оцінки якості під час проведення випробувань із виокремленням у ній напряму з розроблення механізму визначення вагових коефіцієнтів показників експертними методами і з подальшою перевіркою достовірності отриманих результатів.

Методика оцінки якості під час проведення випробувань визначається видом шкал оцінювання, використовуваних для вимірів часткових показників, властивостей, параметрів, критеріїв, характеристик, показників якості тощо, порівнюваних об'єктів, а також варіантами «змішування» оцінок, отриманих за різними шкалами.

Шкали оцінювання якості під час проведення випробувань використовуються як формування відносин властивостей або їх заходів на вимірюваній множині.

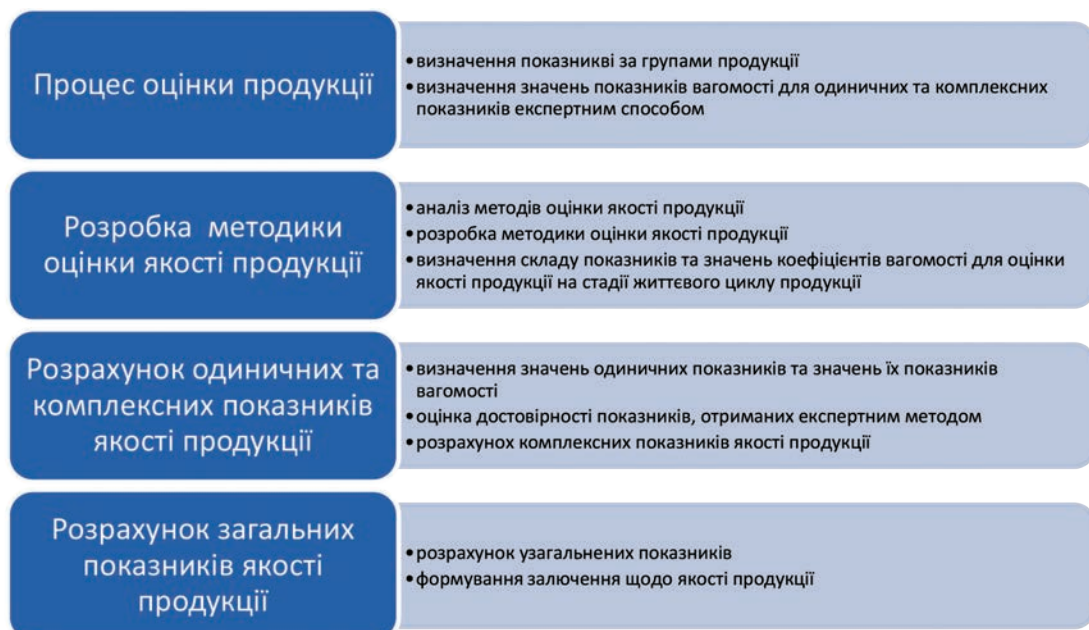
У науковій літературі [10–13] пропонується низка шкал оцінювання якості під час проведення випробувань:

- шкала найменувань (далі – ШН);
- шкала порядку (далі – ШП);
- шкала інтервалів (далі – ШІ);
- шкала відносин (далі – ШВ);
- абсолютна шкала (далі – ША).

Шкала найменувань застосовується у разі порівняння кількох показників з еталоном. Однак під час застосування цієї шкали не визначається відповідність розміру (збільшення або зменшення) згідно з базовим (еталонним) показником, а визначається тільки належність або невідповідність. Застосування такої шкали є найбільш простим, але і найменш достовірним.

Математичний опис шкали найменування можна представити у вигляді відношення:

$$P_i = \text{або} \neq P_j \quad (1)$$



**Рис. 1. Послідовність та етапи проведення робіт зі створення методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань**

\* власна розробка автора на основі [14]

де  $P_i$  – розмір, із яким порівнюють (базовий розмір);  
 $P_j$  –  $i$ -ий із порівнюваних розмірів ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )  
 $n$  – кількість порівнюваних розмірів.

В основі шкали порядку лежить послідовна низка значень, що дає структуроване представлення величин, що порівнюються за властивостями, ознаками або якостями. Процес зіставлення величин характеризується виявленням вимірвальних розмірів у порядку порівняння попереднього з наступним, із відокремленням кращого або гіршого. Під час виявлення однакових розмірів співвідношення встановлюється як однаково вагоме. Далі відбувається ранжування у порядку зростання (убування) отриманих значень. Результатом застосування шкали порядку є низка значень за шкалою порядку (убування, зростання) послідовності.

Математичний опис шкали порядку можна представити у вигляді відношення:

$$P_i = \text{або} \neq \text{або} < > P_j \quad (2)$$

де  $P_i$  – розмір, із яким порівнюють (базовий розмір);  
 $P_j$  –  $i$ -ий із порівнюваних розмірів ( $i = 1, 2, 3, \dots, n$ )  
 $n$  – кількість порівнюваних розмірів.

Під час порівняння  $P_i$  і  $P_j$  визначають такі співвідношення: дорівнює ( $=$ ), не дорівнює ( $\neq$ ), більше ( $>$ ), менше ( $<$ ).

Застосування шкали інтервалів можливе у разі відсутності чисельних розмірів величин, що спостерігаються, але є значення відмінностей між пізнаваними зіставленнями розмірів. Як наслідок, на шкалі інтервалів фіксуються відмінності розмірів, що зіставляються у межах проведення дослідження. Ця форма представлення результатів є найбільш універсальною та досконалою, оскільки на шкалі інтервалів є умовні, але цілком певні одиниці вимірювань, що дозволяє чисельно охарактеризувати співвідношення параметрів, що вимірюються у межах дослідження.

Математичний запис шкали інтервалів має вигляд:

$$\Delta P_{i,j} = P_i - P_j \quad (3)$$

За шкалою інтервалів визначають такі співвідношення розмірів: більше ( $>$ ), менше ( $<$ ), дорівнює ( $=$ ), не дорівнює ( $\neq$ ), сума ( $+$ ), різниця ( $-$ ).

Головним аспектом шкали інтервалів є неможливість визначення того, у скільки разів один розмір більший або менший за інший.

Шкала відносин є найбільш повною вимірвальною шкалою, яка враховує як чисельне значення величини, так і математичне відношення вимірвального розміру  $P_i$ , що береться за одиницю виміру  $[P]$ .

Вимірювання за шкалою відносин у своїй основі визначає зіставлення невідомого розміру з відомим та представлення першого значення через друге у кратному або частковому відношенні.

Математичний запис оцінювання за шкалою відносин представляється у вигляді:

$$q_i = P_i / [P] \quad (4)$$

де  $i = 1, 2, 3, \dots, n$ ;

$n$  – номер розміру, що підлягає вимірюванню.

У межах шкали відносин лежить шкала інтервалів із заданим масштабом вимірювань у вигляді  $[P]$ , початком вимірювань завжди є нульовий елемент.

На основі того, що у межах шкали відносин визначаються такі значення вимірюваних розмірів, як дорівнює ( $=$ ), не дорівнює ( $\neq$ ), більше ( $>$ ), менше ( $<$ ), сума ( $+$ ), різниця ( $-$ ), множення ( $\times$ ), ділення ( $:$ ), є можливість говорити про доцільність та потенціал здійснення різних арифметичних дій під час проведення дослідження низки вимірів для отримання більш точного результату.

Шкала відносин найбільш прийнятна для реалізації методу оцінювання якості під час проведення випробувань, оскільки дає можливість представити більш повну картину отриманих чисельних значень у межах заданого інтервалу.

Щодо шкали абсолютних величин, то тут у основі закладено механізм визначення абсолютних кількісних значень вимірюваного показника, тобто відокремлення чистого показника. Властивості цієї шкали ідентичні зі шкалою відносин (із тією лише різницею, що величини, позначені на цій шкалі, мають абсолютні, а не відносні значення). Застосування цієї шкали рекомендовано у разі наявності неточних вимірів, оскільки шкала абсолютних величин є найбільш чутливою саме до таких показників.

Шкали абсолютних величин, інтервалів та відносин іменуються метричними. Головною причиною такого поділу є принцип побудови шкал, у зазначених трьох шкалах лежить принцип міри, або розміру.

Шкали порядку та найменувань є якісними або ж не зовсім визначеними стосовно істинної величини і за величиною відмінностей між ними.

Види шкал оцінювання якості під час проведення випробувань наведено у таблиці 1.

Кожна з наведених шкал оцінювання якості під час проведення випробувань має свою сферу застосування, вони не є взаємозамінними й застосовуються окремо одна від одної.

У межах застосування наведених шкал оцінювання якості під час проведення випробувань найбільш доцільно використовувати такі методи:

## Порівняльний аналіз шкал оцінювання якості під час проведення випробувань [9; 10]

| Характеристика        | Шкала найменувань     | Шкала порядку          | Шкала інтервалів           | Шкала відносин та абсолютних величин |
|-----------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| Тип характеристики    | Якісні характеристики |                        | Кількісні характеристики   |                                      |
| Відношення            | $\neq$                | $\neq \langle \rangle$ | $\neq \langle \rangle + -$ | $\neq \langle \rangle + - \cdot /$   |
| Результативність      | Низька                | Середня                | Висока                     | Дуже висока                          |
| Чутливість до похибок | Низька                | Середня                | Висока                     | Дуже висока                          |

– для визначення нормованих значень одиничних та узагальнених показників якості виробів – метод групового опитування;

– для розрахунку значень коефіцієнтів вагових одиничних показників якості – метод безпосередніх вимірювань, ранжування.

За комплексної оцінки якості під час проведення випробувань оцінюються найважливіші показники якості, від яких залежить придатність продукції.

**Висновки.** У роботі досліджено етапи розроблення методики оцінювання рівня якості під час проведення випробувань.

У процесі метрологічного забезпечення виробництва зразків продукції досягаються необхідні показники якості за допомогою об'єктивного вимірювального контролю кожної операції технологічного процесу, взаємозамінності виробів, що виготовляються, підвищення продуктивності за рахунок автоматизації процесів вимірювань і вимірювального контролю, збільшення стабіль-

ності технологічних процесів і зниження витрат на усунення недоліків.

Висока якість випущених зразків продукції залежить від стабільності виробництва і не є можливою без достовірної інформації про якість вихідних матеріалів, сировини, напівфабрикатів, режимів і параметрів технологічних процесів. Уся ця інформація, одержувана за допомогою різноманітних вимірів, є основою управління якістю продукції, що випускається. Зважаючи на це, контроль, який раніше розглядався як вимушена, але небажана процедура, стає невід'ємною частиною сучасного технологічного процесу виготовлення продукції.

Існування значної кількості методів оцінювання рівня якості продукції під час проведення випробувань говорить про те, що проблема оцінювання якості є досить складним завданням, а проведені дослідження показали, що відсутні об'єктивні методи за кількісним оцінюванням якості, які б застосовувались як виробниками, так і споживачами продукції.

## Список літератури:

1. Дишлок С.В. Методи оцінювання якості продукції. *Студентський науковий вісник МНАУ*. 2017. Вип. 2 (10). С. 66–70.
2. Бондаренко С.М., Леус А.Ю. Оцінка рівня якості продукції на підприємстві. *Ефективна економіка*. 2017. № 4. URL: <http://www.economy.nayka.com.ua/?op=1&z=5527#> (дата звернення: 08.04.2021)
3. Клименко Г.П., Васильченко Я.В., Шаповалов М.В. Якість і надійність технологічних систем. Краматорськ : ДДМА, 2018. 200 с.
4. Савуляк В.В. Управління якістю продукції : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2012. 91 с.
5. Шапошник В.Н., Щур И.М., Сыдорко И.И., Симонов Р.П., Билоконь Е.В. Обеспечение качества проведения исследований при аккредитации лаборатории. *Ветеринарна медицина України*. 2015. № 2 (228). С. 5–7.
6. Abdullah M.M. B., & Tari J. J. Hard quality management and performance: The moderating role of soft quality management. *International Journal for Quality Research*. 2017. Vol. 11(3). P. 587–602. doi: 10.18421/IJQR11.03-07
7. Barbosa L. C. F. M., Oliveira O., Santos G. Proposition for the alignment of the integrated management system (quality, environmental and safety) with the business strategy. *International Journal for Quality Research*. 2018. Vol. 12(4), 925–940. doi: 10.18421/IJQR12.04-09
8. Corder, G. W., & Foreman, D. *Nonparametric statistics: a step-by-step approach*, 2nd edition. John Wiley & Sons. Dalton, L., Ballarin, V., & Brun, M., 2014.
9. Hollander M., Wolfe D. A., & Chicken E. *Nonparametric statistical methods*, 3rd edition. New York: John Wiley & Sons. Iglesias, F., & Kastner, W., 2013.

10. Shirkorshidi, A. S., Aghabozorgi, S., & Wah, T. YA Comparison Study on Similarity and Dissimilarity Measures in Clustering Continuous Data. *PLoS one*. 2015. Vol. 10(12). P. e0144059. doi: 10.1371/journal.pone.0144059
11. Uthayakumar, J, Vengattaraman, T., & Dhavachelvan, P. A survey on data compression techniques: From the perspective of data quality, coding schemes, data type and applications. *Journal of King Saud University - Computer and Information Sciences*. 2018. doi: 10.1016/j.jksuci.2018.05.006.
12. Vasileiou, K., Barnett, J., Thorpe, S., & Young, T. Characterising and justifying sample size sufficiency in interview-based studies: systematic analysis of qualitative health research over a 15-year period. *BMC medical research methodology*. 2018. Vol. 18(1). P. 148. doi: 10.1186/s12874-018-0594-7
13. Wooluru, Y., Swamy, D. R., & Nadesh, P. Process capability estimation for nonnormally distributed data using robust methods - a comparative study. *International Journal for Quality Research*. 2016. Vol. 10(2). P. 407-420. doi: 10.18421/IJQR10.02-11.

#### **Tchaikovsky S.Yu. TESTS LEVEL QUALITY METHODS AS A CURRENT DIRECTION OF RESEARCH**

*Research, structuring and development of methods for assessing the level of quality in product testing. The principles of product quality assessment are determined. The main tasks of quality assessment are structured, such as: formation of various (economic, technical, ergometric, hygienic, etc.) requirements for products; reliable assessment of the achieved level of product quality by conducting tests; product quality control in the process of production and acceptance of products by the customer, etc. It is emphasized that in the design process metrological support is aimed at achieving the required characteristics of the developed products through a scientifically sound choice of measurement methods, determining the set of parameters and characteristics to be measured, setting tolerances, deviations for each parameter, taking into account measurement conditions, using the necessary tools. , providing measurement and control, selected parameters and characteristics of products and technological processes with the required accuracy, correct execution of measurements and processing of their results in accordance with standardized methods, or innovative methods to be developed. The sequence and stages of work on the creation of methods for assessing the level of quality during testing have been developed. The scales of quality estimation at carrying out of tests which are used as, formation of relations of properties or their actions on the measured set are offered and mathematically substantiated. It is noted that each of the above scales of quality assessment in testing has its own scope and in most cases they are not interchangeable and are used separately from each other. It is emphasized that in a comprehensive assessment of quality during testing, the most important quality indicators are assessed, on which the suitability of products depends.*

**Key words:** methodology, development, quality, testing, products, qualimetry, method, metrology, characteristics, standardization.

**Шаманіна Т.В.**

Одеська спеціалізована школа № 117

**Павленко В.Д.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ІНСТРУМЕНТАЛЬНІ ЗАСОБИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ОКУЛОМОТОРНОЇ СИСТЕМИ ЛЮДИНИ НА ОСНОВІ МОДЕЛІ ВОЛЬТЕРРИ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЇ АЙТРЕКІНГУ

*Розроблено інструментальні алгоритмічні та програмні засоби побудови непараметричної динамічної моделі окуломоторної системи (далі – ОМС) людини з урахуванням її інерційних і нелінійних властивостей на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід» із використанням інноваційної технології айтрекінгу. При цьому застосовується поліноміальна модель Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій. Розроблено інформаційну технологію отримання експериментальних даних для ідентифікації ОМС за допомогою тестових візуальних стимулів та застосування технології айтрекінгу для відстеження відповідних рухів ока. Розроблено програму Signal Manager генерування тестових візуальних стимулів (яскравих точок), що відображаються на екрані монітора комп'ютера в заданих координатах. Розроблено програмне забезпечення eSmart для визначення координат зіниці ока в кадрах відеоряду, отриманих у процесі айтрекінгу на Android-смартфоні. Реалізовано обчислювальні алгоритми ідентифікації ОМС у вигляді перехідних функцій у програмі VolterraApp, яку розроблено в середовищі Matlab.*

*Виконано експериментальні дослідження ОМС за допомогою технології айтрекінгу та визначено на основі даних окулографічних досліджень перехідні функції першого, другого та третього порядків. Дослідження ОМС за допомогою отриманих перехідних функцій засобами комп'ютерного моделювання підтверджують адекватність побудованої апроксимаційної моделі реальній системі.*

*Здійснено аналіз варіативності перехідних функцій, що відповідають різним психофізіологічним станам індивіда (станам втоми). Установлено, що діагональні перетини перехідних функцій другого і третього порядків щодо перехідних функцій першого порядку для станів втоми істотно змінюються за величиною. Таким чином, їх можна використовувати як джерела початкових даних під час формування просторів діагностичних ознак для побудови класифікаторів психофізіологічних станів людини за допомогою засобів машинного навчання. Розроблені інструментальні програмні засоби доцільно використовувати в діагностичних дослідженнях у сфері нейронаук та психології.*

**Ключові слова:** окуломоторна система, ідентифікація, модель Вольтерри, багатовимірні перехідні функції, тестові візуальні стимули, технологія айтрекінгу, айтрекер на андроїд-смартфоні, класифікатор психофізіологічних станів людини, нейронауки, психологія.

**Постановка проблеми.** Нині активно розвивається інноваційна технологія айтрекінгу (Eye-tracking), що представляє собою процес визначення точки, на яку спрямовується погляд, або траєкторії руху ока щодо голови. Знання про рух очей мають велике теоретичне і прикладне значення, розширюючи можливості вивчення специфіки багатьох професій із метою підвищення ефективності функціонування суб'єкта трудової діяльності [1–4].

Дослідження рухів очей людини і траєкторії їх переміщення дозволяють розкрити структуру взаємин індивіда із середовищем, людини зі світом. Аналіз взаємозв'язку окуломоторики з централь-

ною нервовою системою, з одного боку, із вмістом психічних процесів – з другого, з різноманітними формами активності (поведінкою, діяльністю, спілкуванням) – з третього, сприяє вивченню механізмів роботи мозку і їх порушення, виявлення динаміки психофізіологічних станів людини, закономірностей сприйняття, мислення, уявлень, диференціації інтенцій, намірів і установок особистості [2].

Популярність досліджень з окуломоторної тематики останніми роками неухильно зростає, а разом із нею зростає і кількість науково-теоретичних і прикладних робіт, які націлені на вивчення руху очей як індикатора уваги, психофізіологічних станів, психічних процесів і поведінки [4].

Технологія айтрекінгу в останні 10 років отримала подальший розвиток та ефективно застосовується під час побудови математичної моделі процесу неперервного відстеження руху ока з метою виявлення аномалій у цих відстеженнях для кількісної оцінки рухових симптомів хвороби Паркінсона [5–8]. При цьому використовуються нелінійні динамічні моделі Вінера і Вольтерри-Лагерра [9]. Їх побудова заснована на використанні тестових випадкових впливів, що вимагає застосування методів кореляційного аналізу та отримання великого обсягу експериментальних даних (великої тривалості експериментальних досліджень).

Для побудови моделі Вольтерри окуломоторної системи (далі – ОМС) людини можливо використовувати детерміновані тестові впливи, як-от ступінчасті сигнали (найбільш адекватні для дослідження динаміки ОМС), що дозволить спростити обчислювальний алгоритм ідентифікації та істотно зменшити час обробки експериментальних даних [10–12].

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка інструментальних алгоритмічних та програмних засобів побудови моделі Вольтерри, що враховує інерційні і нелінійні властивості ОМС людини, на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід» із використанням тестових ступінчастих сигналів та технології айтрекінгу.

Для досягнення мети поставлені та вирішені такі **завдання**:

- реалізувати технологію айтрекінгу отримання експериментальних даних для ідентифікації ОМС за допомогою відеореєстрації;
- реалізувати обчислювальні методи ідентифікації ОМС у вигляді багатовимірних перехідних функцій (далі – ПФ) за допомогою тестових ступінчастих сигналів різної амплітуди;
- виконати експериментальні дослідження ОМС за допомогою технології айтрекінгу та визначити на основі даних окулографічних досліджень перехідні функції першого, другого та третього порядків;
- здійснити на основі отриманих багатовимірних перехідних функцій дослідження психофізіологічного стану респондентів (стану за глибиною втоми).

*Галузь досліджень:* науки про життя, нові технології профілактики та лікування поширених захворювань.

*Об'єкт дослідження* – процес відстеження руху очей як відгуку на зовнішнє збурення у вигляді деякого візуального стимулу (процес айтрекінгу).

*Предмет дослідження* – інструментальні обчислювальні і програмні засоби побудови моделі Вольтерри, визначення перехідних функцій першого, другого та третього порядків ОМС за даними айтрекінгу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розроблені інструментальні засоби ідентифікації ОМС дозволяють вирішувати такі завдання, як:

– дослідження взаємозв'язків психічних станів та когнітивних процесів у навчальній діяльності, посттравматичний стресовий розлад, діагностика стадії хвороби Паркінсона та Альцгеймера, перевірка психофізіологічного стану пілотів та водіїв, професійної придатності, синдрому втоми [5; 13–15];

– взаємодія психічних станів та когнітивних процесів під час навчальної діяльності студентів та школярів, об'єктивна оцінка рівня їх пізнавального розвитку, оцінка ефективності навчання для вдосконалення психічних процесів (тобто процесів мислення) та для психологічної корекції особистості [13–15];

– подовження творчого життя особистості за рахунок ранньої діагностики дегенеративних процесів когнітивних функцій мозку. Виявлення обдарованої особистості (побудова психологічної моделі особистості) та оцінка її здібностей. Професійний відбір (виявлення та підготовка менеджерів) [16; 17];

– засвоєння наукових знань та відповідних навичок є головною метою та головним результатом навчальної діяльності. Процес засвоєння знань є центральною частиною процесу навчання. Управління цим процесом передбачає існування ефективних об'єктивних показників для оцінки інтелектуальних здібностей особистості [18–23].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Запропоновані в роботі методи психофізіологічної ідентифікації людини, засновані на отриманні експериментальних даних із використанням технології айтрекінгу та обчислювальних засобів їх обробки, дозволять здійснювати моніторинг та діагностику стану когнітивних процесів у процесі навчальної діяльності студентів.

**Інтелектуальна інформаційна технологія діагностування нейрофізіологічних станів людини.** Запропонована інтелектуальна інформаційна технологія для діагностики станів нейронних процесів, що ґрунтується на непараметричній ідентифікації ОМС у вигляді нелінійних динамічних моделей Вольтерри. Технологія передбачає послідовне розв'язання таких завдань, як:

1. *Ідентифікація ОМС.* Мета – побудова інформаційної моделі ОМС у вигляді багатовимірних

ПФ – інтегральних перетворень ядер Вольтерри. Етапи реалізації: подача тестових візуальних стимулів із різною амплітудою на вході ОМС (за напрямками: горизонтально, вертикально, діагонально), вимірювання відгуків ОМС на тестові сигнали за допомогою айтрекера, обчислення багатовимірних ПФ на основі даних експерименту «вхід-вихід».

2. *Побудова діагностичної моделі ОМС.* Мета – формування простору діагностичних ознак. Етапи реалізації: стискання ПФ, визначення діагностичної значущості ознак, вибір оптимальної системи ознак (редукція діагностичної моделі).

3. *Побудова класифікатора психофізіологічного стану індивіда на основі моделі ОМС.* Метою є побудова сукупності вирішальних правил оптимальної класифікації. Етапи реалізації: побудова вирішальних правил за результатами ідентифікації ОМС (машинне навчання), оцінка достовірності класифікації (екзамен), оптимізація діагностичної моделі.

4. *Діагностика нейронних процесів.* Мета – оцінка станів індивіда. Етапи реалізації: ідентифікація ОМС; оцінка діагностичних ознак; класифікація – віднесення досліджуваного індивіда до певного класу за психофізіологічним станом.

**Моделі Вольтерри та ідентифікація нелінійних динамічних систем (НДС).** Основою для створення математичної (інформаційної) моделі досліджуваного об'єкта є результати вимірювань його вхідних і вихідних змінних і розв'язання завдання ідентифікації, пов'язане з отриманням експериментальних даних та їх обробкою з урахуванням шумів вимірювань.

Для опису об'єктів невідомої структури доцільно використовувати найбільш універсальні нелінійні непараметричні динамічні моделі – моделі Вольтерри [9; 24–26]. При цьому нелінійні і динамічні властивості досліджуваного об'єкта однозначно описуються послідовністю інваріантних відносно виду вхідного сигналу багатовимірних вагових функцій – ядер Вольтерри (далі – ЯВ).

Співвідношення «вхід-вихід» для НДС із невідомою структурою (типу «чорний ящик») з одним входом і одним виходом може бути представлено дискретним поліномом Вольтерри ступеня  $N=3$  у вигляді [24]:

$$y[m] = \sum_{n=1}^{N=3} \hat{y}_n[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[k_1] x[m-k_1] + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m w_2[k_1, k_2] x[m-k_1] x[m-k_2] + \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m \sum_{k_3=0}^m w_3[k_1, k_2, k_3] x[m-k_1] x[m-k_2] x[m-k_3], \quad (1)$$

де  $\hat{y}_n[m]$  –  $n$ -а парціальна складова відгуку моделі НДС;  $w_1[k_1]$ ,  $w_2[k_1, k_2]$ ,  $w_3[k_1, k_2, k_3]$  – дискретні

вагові функції (ядра Вольтерри) першого, другого та третього порядків;  $x[k]$ ,  $y[k]$  – вхідна (стимул) і вихідна (відгук) функції системи, яка моделюється, відповідно;  $k$  – змінна часу.

Структурна схема моделі Вольтерри має вигляд (рис. 1).

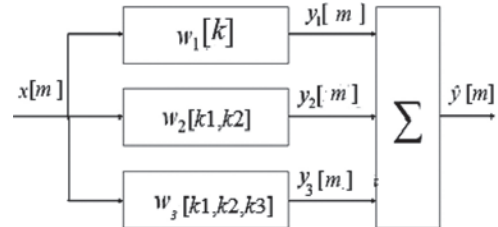


Рис. 1. Структурна схема моделі Вольтерри

Завдання ідентифікації полягає у виборі тестових впливів  $x[m]$  і розробці алгоритму, який дозволяє за вимірюваними реакціями  $y[m]$  виокремлювати парціальні складники  $y_n[m]$ , ( $n=1, 2, 3$ ) і визначати на їх основі ЯВ  $w_1[k_1]$ ,  $w_2[k_1, k_2]$ ,  $w_3[k_1, k_2, k_3]$  [25, 26].

**Відстеження руху очей для ідентифікації ОМС.** Розроблено інформаційну технологію побудови непараметричної динамічної моделі ОМС людини з урахуванням її інерційних та нелінійних властивостей на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід». Модель Вольтерри ОМС використовується у вигляді багатовимірних ПФ.

Методи та інструментальні засоби ідентифікації ОМС розроблено за допомогою технології айтрекінгу. Одержані ПФ застосовуються для побудови простору діагностичних ознак та здійснення оптимальної класифікації нейрофізіологічних станів особистості для досліджень у нейроінформатиці та обчислювальній неврології. Експериментальні дослідження ОМС індивідів проводились із використанням айтрекера Tobii TX300 (частота кадрів 300 Гц) та відповідного програмного забезпечення в лабораторії аналізу руху та ергономіки інтерфейсів Люблінського технологічного університету (Люблін, Польща) [10].

Ураховуючи специфіку досліджуваного об'єкта, для ідентифікації використовуються тестові багатоступінчасті сигнали з різними амплітудами  $a_i$  ( $i=1, 2, \dots, L$ ;  $L$  – кількість експериментів,  $L \geq N$ )  $x_i(t) = a_i \theta(t)$ ,  $\theta(t)$  – одинична функція Гевісайда. Відгуки ОМС, які при цьому вимірюються, позначимо як  $y_1[m]$ ,  $y_2[m]$ , ...,  $y_L[m]$ . Якщо визначити парціальні складники відгуку моделі  $\hat{y}_1[m]$ ,  $\hat{y}_2[m]$ ,  $\hat{y}_3[m]$ , то це призведе до оцінки перехідних функцій першого порядку  $\hat{h}_1[m]$  та діагональних перетинів перехідних функцій  $n$ -го порядку ( $n=2, 3$ )  $\hat{h}_2[m, m]$ ,  $\hat{h}_3[m, m, m]$ :



$$\begin{aligned} \hat{y}_1[m] &= \hat{h}_1[m] = \sum_{k_1=0}^m w_1[m-k_1] \\ \hat{y}_2[m] &= \hat{h}_2[m, m] = \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m w_2[m-k_1, m-k_2] \\ \hat{y}_3[m] &= \hat{h}_3[m, m, m] = \sum_{k_1=0}^m \sum_{k_2=0}^m \sum_{k_3=0}^m w_3[m-k_1, m-k_2, m-k_3] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \\ \dots \\ \hat{y}_N[m] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^L a_i^2 & \sum_{i=1}^L a_i^3 & \dots & \sum_{i=1}^L a_i^{N+1} \\ \sum_{i=1}^L a_i^3 & \sum_{i=1}^L a_i^4 & \dots & \sum_{i=1}^L a_i^{N+2} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \sum_{i=1}^L a_i^{N+1} & \sum_{i=1}^L a_i^{N+2} & \dots & \sum_{i=1}^L a_i^{2N} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^L a_i y_i[m] \\ \sum_{i=1}^L a_i^2 y_i[m] \\ \dots \\ \sum_{i=1}^L a_i^N y_i[m] \end{bmatrix}, \quad (7)$$

Відгуки поліноміальної моделі Вольтерри дорівнюють

$$\tilde{y}_i[m] = a_i \hat{y}_1[m] + a_i^2 \hat{y}_2[m] + a_i^3 \hat{y}_3[m], \quad i=1, 2, \dots, L. \quad (3)$$

Для визначення перехідних функцій  $h_1[m], h_2[m, m], h_3[m, m, m]$  використовується метод найменших квадратів (далі – МНК), який забезпечує мінімум середньоквадратичної похибки відхилення відгуків моделі від відгуків ОМС на один і той же стимул:

$$J_N = \sum_{i=1}^L \left( y_i[m] - \sum_{n=1}^N a_i^n \hat{y}_n[m] \right)^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Мінімізація критерію (4) зводиться до вирішення системи нормальних рівнянь Гауса [25], яку у векторно-матричній формі можна записати у вигляді

$$A'A\hat{y} = A'y, \quad (5)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} a_1 & a_1^2 & \dots & a_1^N \\ a_2 & a_2^2 & \dots & a_2^N \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_L & a_L^2 & \dots & a_L^N \end{bmatrix}, \quad y = \begin{bmatrix} y_1[m] \\ y_2[m] \\ \dots \\ y_L[m] \end{bmatrix}, \quad \hat{y} = \begin{bmatrix} \hat{y}_1[m] \\ \hat{y}_2[m] \\ \dots \\ \hat{y}_N[m] \end{bmatrix}.$$

Розв'язавши систему рівнянь (5) щодо  $\hat{y}_1[m], \hat{y}_2[m], \hat{y}_3[m]$ , отримуємо оцінки багатовимірних перехідних функцій ОМС у кожен момент часу  $m$  на інтервалі спостереження. Із рівняння (5), отримуємо

$$\hat{y} = (A'A)^{-1} A'y. \quad (6)$$

Виконавши в (6) матричні операції

отримуємо оцінки ПФ першого, другого і третього порядків [24].

Процес моделювання ОМС на основі моделі Вольтерри наведено на рис. 3.

**Організація та методика експериментальних досліджень.** Під час експериментальних досліджень здійснюються такі дії:

- респондент (людина, яка досліджується) сідає перед комп'ютером так, щоб його очі були на рівні центру монітора на відстані 40–50 см від нього;

- голова фіксується так, як показано на рис. 4, щоб не допускати її рухів під час досліджень та для забезпечення однакових умов експерименту; після цього, за готовністю пацієнта, слід запустити програму формування тестових стимулів *Signal Manager*;

- на екрані монітора комп'ютера з'являється кружок червоного кольору – стартова позиція (рис. 5, а); після невеликої паузи кружок у стартовій позиції зникає і з'являється кружок іншого кольору в точці із заданими координатами, який є візуальним стимулом – тестовим сигналом (рис. 5, б), що відображається протягом заданої тривалості; ця дія змушує око рухатись в напрямку на візуальний стимул;

- далі цей кружок зникає і з'являється кружок червоного кольору в стартовій позиції, що змушує око рухатись у зворотному напрямку до стартової позиції.

Після цих дій експеримент завершується. За допомогою айтрекера визначаються координати зіниці ока в процесі його руху (реакції на візуальний стимул) в період зі зникнення червоного сигналу до подальшого його формування.

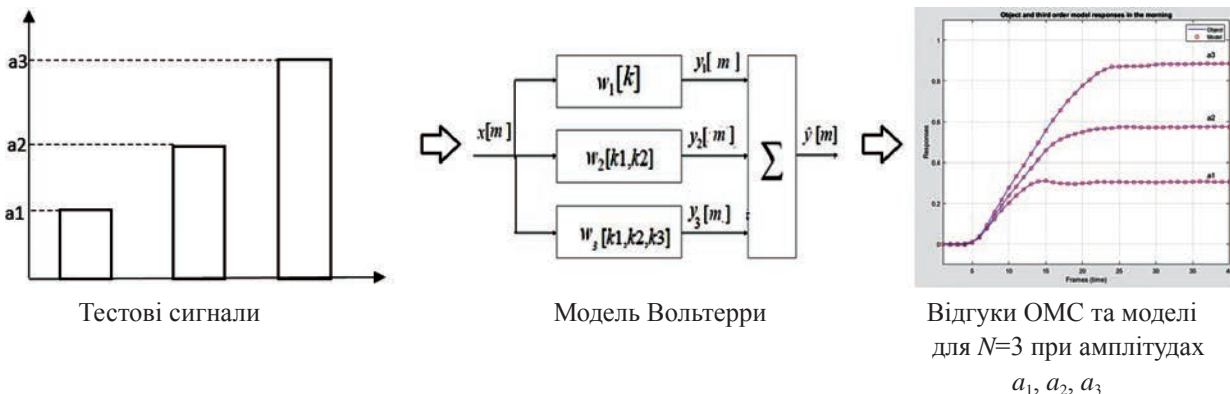


Рис. 3. Процес моделювання ОМС на основі моделі Вольтерри

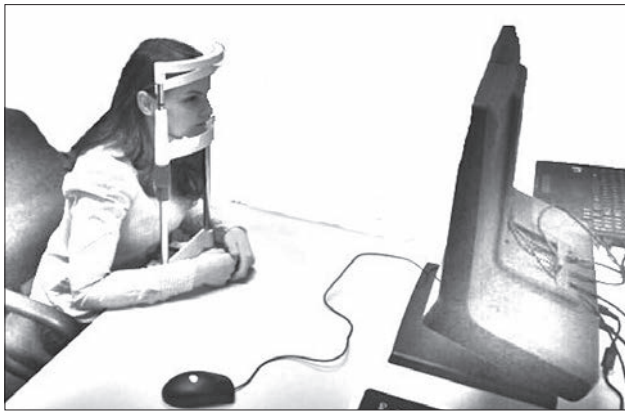


Рис. 4. Фіксація голови респондента

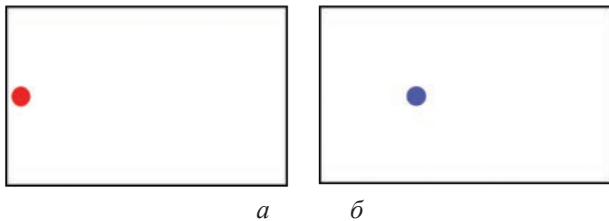


Рис. 5. Стартовий сигнал (а), та тестовий стимул (б)

У дослідженнях стартові сигнали мають тривалість 3 сек., тестові сигнали – 2 сек.

У дослідженні кожного респондента реалізовані послідовно цикл «від центру – вправо по горизонталі». У кожному циклі послідовно виконуються 3 незалежні експерименти з амплітудами тестових сигналів  $a_1 = 0.33$ ,  $a_2 = 0.66$ ,  $a_3 = 1.0$  (у відносних одиницях від ширини екрану монітора). Таким чином, реалізується така послідовність вхідних візуальних сигналів, координати яких (у відносних одиницях):

- експеримент 1:  $(x = 0, y = 0)$  та  $(x = 0.33, y = 0)$ ;
- експеримент 2:  $(x = 0, y = 0)$  та  $(x = 0.66, y = 0)$ ;
- експеримент 3:  $(x = 0, y = 0)$  та  $(x = 1.0, y = 0)$ .

На рис. 6 представлено схему процесу айтрекінгу.

**Програмні засоби визначення перехідних функцій ОМС.** Обчислювальні алгоритми та програмні засоби розроблені для підтримки технології ІТ-діагностики нейрофізіологічних процесів на основі нелінійної динамічної ідентифікації ОМС: *Signal Manager* – програма генерації тестових візуальних стимулів; *eSmart* – програма реєстрації відгуків ОМС на смартфоні Android; *VolterraApp* – програма ідентифікації ОМС «вхід-вихід» на основі поліномів Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій.

**Програма «Signal Manager».** Розроблено застосунок, який дозволяє формувати на екрані монітора комп'ютера детерміновані або випадкові тестові візуальні стимули будь-якої конфігурації для проведення ідентифікаційних експериментів «вхід-вихід» з ОМС людини із застосуванням інноваційної технології айтрекінгу.

Програму розроблено з використанням технології WinForms та мови програмування С# на платформі Microsoft.NET Framework. Для збереження даних-координат позицій для відображення стимулів та їх параметрів (форми, кольору, таймінгу), використовується база даних Microsoft Access і технологія Entity Framework – для доступу до бази даних з програми як її об'єктного представлення. Для збереження списків тестових сигналів використовується серіалізація списків у xml-файл. Під час запуску застосунка xml-файл десеріалізується у списки тестових сигналів.

Структура файла бази даних включає дві таблиці: «Point\_lists» та «Points» (рис. 7). Перша таблиця містить поля з інформацією про списки точок: point\_list\_id – ідентифікатор; point\_list\_name – ім'я списку точок; generation\_type – ім'я алгоритму генерації. Друга таблиця містить поля: id; list\_id – ідентифікатор списку до якого належить точка; x, y – координати по горизонталі та вертикалі відповідно; width, height – ширина та

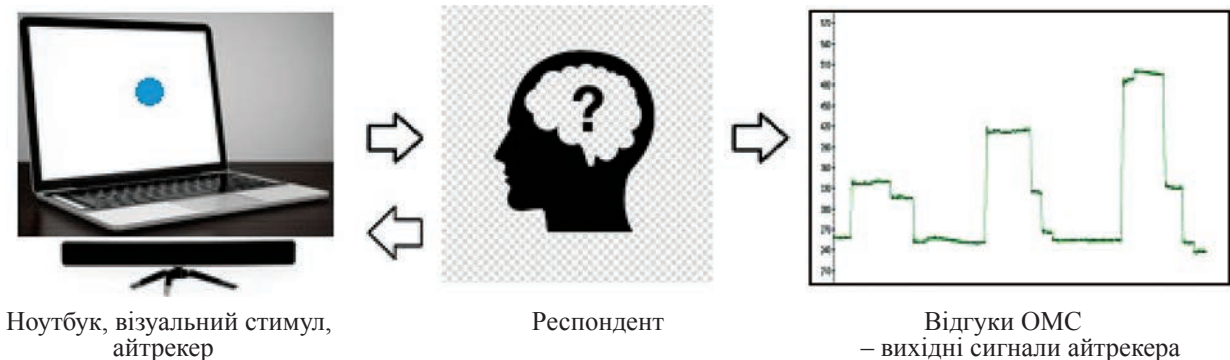


Рис. 6. Схема процесу айтрекінгу

висота точки відповідно; type, argb – інформація про форму (еліпс/прямокутник) та колір точки у форматі argb відповідно; display\_time – тривалість відображення точки на екрані в ms; is\_starting\_point – інформація про тип точки (стартова / тестовий стимул); metadata – згруповані дані (напрямок та ін.).

Тестові сигнали відображаються за вісьмома напрямками: від границь екрана (рис. 8) або від центру екрана (рис. 9). При цьому в кожному напрямку використовуються  $L$  циклів із детермінованими позиціями візуальних стимулів:  $(x_i = il_x/L, y_i = 0.5l_y)$  – у напрямку «По горизонталі»,  $(x_i = 0.5l_x, y_i = il_y/L)$  – у напрямку «По вертикалі» та  $(x_i = il_x/L, y_i = il_y/L)$  – у напрямку «По діагоналі», де  $l_x, l_y$  – ширина і висота екрана;  $x_i, y_i$  – координати по горизонталі і вертикалі відповідно;  $i=1,2,\dots,L$ . На границях або в центрі екрану розміщуються стартові точки (червоний кружок), які відображаються тривалістю  $T_1$  (рис. 10). Потім стартовий сигнал зникає і одночасно з'являється кружок синього кольору (візуальний стимул), який відображається протягом часу  $T_2$ .

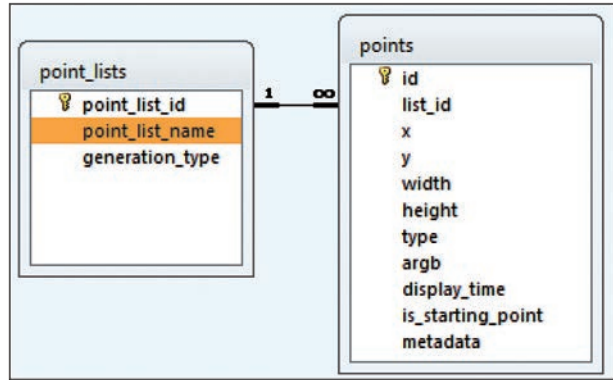


Рис. 7. Структура бази даних

Програма «Signal Manager» дозволяє генерувати також випадкові тестові стимули. У цьому разі на екрані спочатку з'являється стартова точка з координатами  $K_1(x,y)$ , потім вона зникає і послідовно відображаються (з'являються та зникають) точки-стимули  $K_2, K_3, \dots$  з координатами, які генеруються програмою випадковим чином (рис. 11).

Відповідні відгуки ОМС фіксуються айтрекером і далі використовуються як вихідні дані для ідентифікації ОМС.

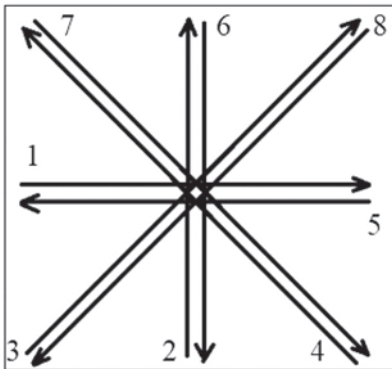


Рис. 8. Напрямки та послідовність генерації тестових сигналів від границь екрану

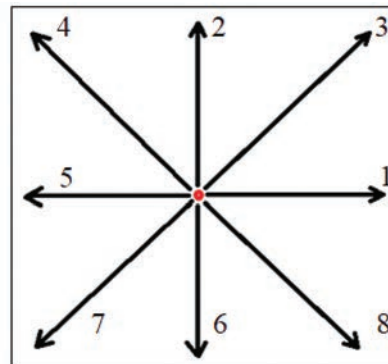


Рис. 9. Напрямки та послідовність генерації тестових сигналів від центру екрану

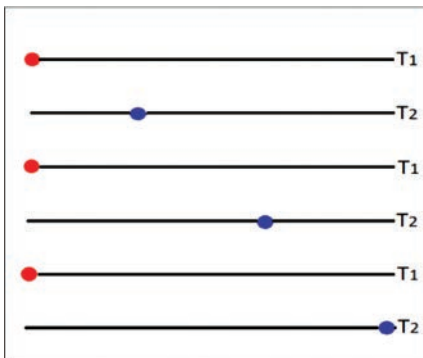


Рис. 10. Розташування точок на екрані в циклах експериментів ( $L=3$ )

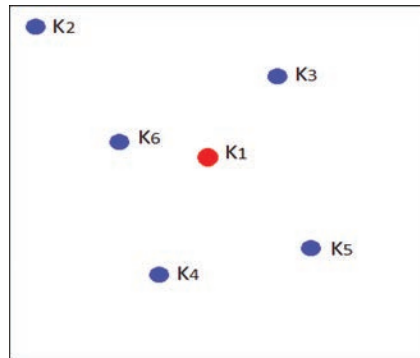


Рис. 11. Випадкові тестові візуальні стимули

Для підвищення достовірності експериментальних досліджень ОМС під час використання технології айтрекінгу і виключити можливість передбачення респондентом таких координат точки-стимулу реалізовані спеціальні алгоритми випадкового генерування стимулів:

Алгоритм 1 – з подвійною випадковістю: спочатку випадково задається напрямок зі списку (1,2, ..., 8), потім випадковим чином генеруються всі точки-стимули в цьому напрямку зі списку (1,2,...,L).

Алгоритм 2 – із синхронною подвійною випадковістю: випадкова точка-стимул генерується у випадковому напрямку. Таким чином, усі точки генеруються в різних напрямках.

Під час реалізації цих алгоритмів виключається повторне відображення стимулів у координатах, які були згенеровані раніше. Під час виконання програми формується файл протоколу експерименту, в якому зберігається інформація про напрямки, амплітуди стимулів (їх координати), таймінг процесу експериментальних досліджень ОМС. Після отримання набору даних-відгуків ОМС на тестові стимули для подальшої їх обробки відповідно до алгоритму ідентифікації необхідно упорядкувати дані за координатами в кожному напрямку.

На рис. 12 наведено стартове вікно програми «Signal Manager», на рис. 13 – вікно налаштування програми (Settings), сторінки List generation.

*Програма eSmart.* Розроблено програмні засоби для Android-смартфонів, які здійснюють автоматичне розпізнавання зображень об'єктів (обличчя, ока, зіниці) на послідовності кадрів відеореєстрації та обчислення координат зіниці в динаміці процесу руху ока. Важливою особливістю цієї інтелектуальної інформаційної технології є невимогливість до апаратного забезпечення.

Технологія розробки цього застосунку полягає у використанні бібліотеки OpenCV (Open Source Computer Vision Library), за допомогою якої реалізовано алгоритм розпізнавання зіниці ока та здійснюється навчання каскаду Хаара. Для збереження результатів експериментів використовується кросплатформна мобільна база даних Realm IO Firebase Google. Бібліотека FFmpeg використана для роботи з відеофайлами. Для збереження координат зіниці ока у форматі csv та побудови графіків «Координата-Час» застосована графічна бібліотека Android з відкритим вихідним кодом – MPAndroidChart. Реалізована функція згладжування масивів координат за допомогою алгоритму ковзаючого середнього з вибором потрібного рівня згладжування для подальшої обробки масиву даних.

Для пошуку об'єкта на зображенні застосовується метод Віоли-Джонса, в основу якого покладено інтегральне представлення зображення за ознаками Хаара, побудова класифікатора на основі алгоритму адаптивного бустінгу і спосіб комбінування класифікаторів в каскадну структуру. Це дозволяє здійснювати пошук об'єкта на зображенні в режимі реального часу. Програмне забезпечення технології айтрекінгу реалізовано засобами мови Java.

За допомогою програми Signal Manager проводяться експерименти та фіксуються відгуки ОМС на відео, яке піддається обробці за допомогою програми eSmart. Під час обробки відео розбивається на кадри і здійснюється запис координат зіниці ока в окремий файл Excel. На рис. 14 наведені графіки, які побудовано на смартфоні за даними масивів координат  $x$  і  $y$  зіниці ока респондента, що отримано під час відстеження руху ока в динаміці. Використовуючи редагування, отримуюмо графік, представлений на рис. 15.

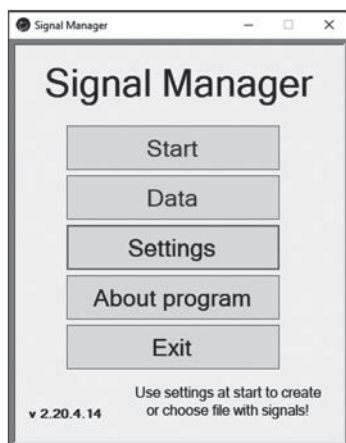


Рис. 12. Стартове вікно програми «Signal Manager»

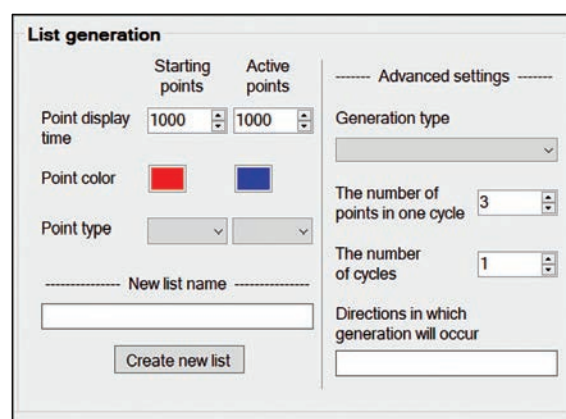


Рис. 13. Налаштування програми «Signal Manager» (Settings), сторінка List generation

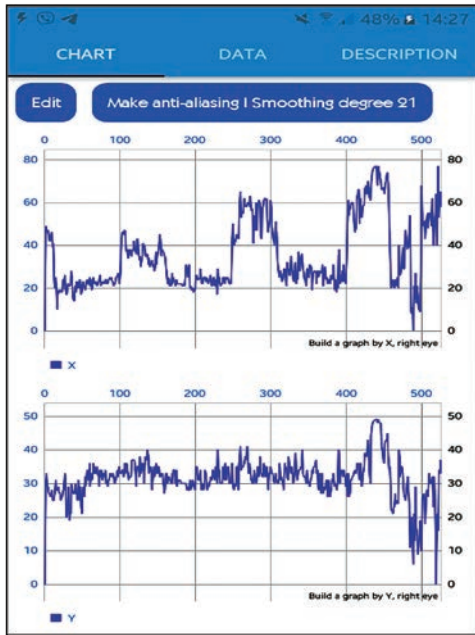


Рис. 14. Графіки координат x (зверху) та у (знизу)

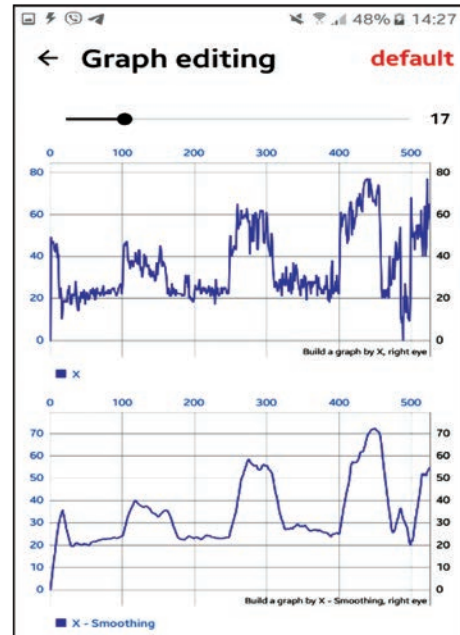


Рис. 15. Редагування даних відстеження

За допомогою програми Photoshop визначався центр зіниці ока. Дані, отримані у Photoshop, порівнюються з даними, одержаними за допомогою програми eSmart. Помилка у визначенні центру ока зіниці за допомогою eSmart становить у середньому 1%.

Програма *VolterraApp*. Розроблено інструментальні алгоритмічні та програмні засоби побудови непараметричних динамічних моделей ОМС на основі поліномів Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій. Програма використовує для побудови моделі дані спостережень «вхід-вихід» ОМС, що отримані в процесі айтрекінгу із застосуванням тестових візуальних стимулів.

GUI-інтерфейс програми *VolterraApp* розроблено за допомогою додатка App Designer, який входить до складу ППП Matlab. Інтерфейс містить три вкладки, які включають функції:

- завантаження даних від айтрекера після предобробки;
- налаштування та побудова моделі;
- порівняння відгуків ОМС та моделі (оцінка адекватності моделі).

На рис. 16 наведено GUI програми *VolterraApp* – вікно візуалізації відгуків ОМС та моделі при  $N=1$  і  $L=3$  у вигляді перехідної функції  $\hat{h}_1[m]$  для різних значень амплітуд вхідних сигналів  $a_1, a_2, a_3$ .

**Результати ідентифікації ОМС.** За допомогою розробленого програмного забезпечення здійснено дослідження психофізіологічних станів людини. Експерименти організовано з метою кла-

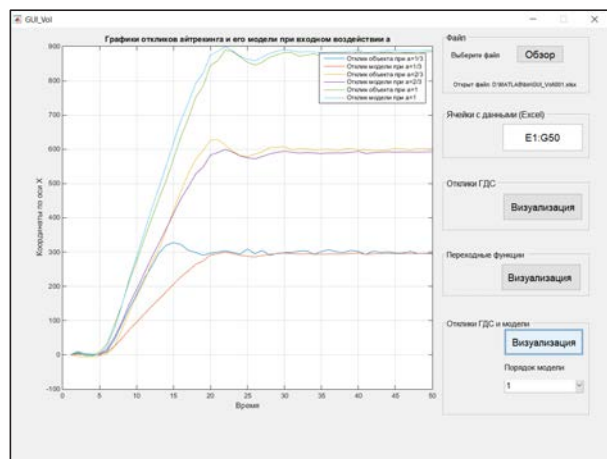


Рис. 16. GUI програми *VolterraApp* – вікно візуалізації відгуків ОМС та моделі при  $N=1$  і  $L=3$  для різних значень амплітуд вхідних сигналів  $a_1, a_2, a_3$

сифікації респондентів (інформантів) за станом втоми. Збір даних полягає у вимірюваннях відгуків ОМС на однакові тестові сигнали, які здійснюються в різний час дня: «Вранці» (до роботи) і «Ввечері» (після роботи). Отримані експериментальні дані від айтрекера за різних амплітуд тестових сигналів «Вранці» і «Ввечері» представлені на рис. 17, а, б. Усереднені значення відгуків ОМС «Вранці» і «Ввечері» за різних амплітуд тестових сигналів наведено на рис. 17.

За усередненими даними відгуків ОМС на візуальні стимули з різною відстанню від

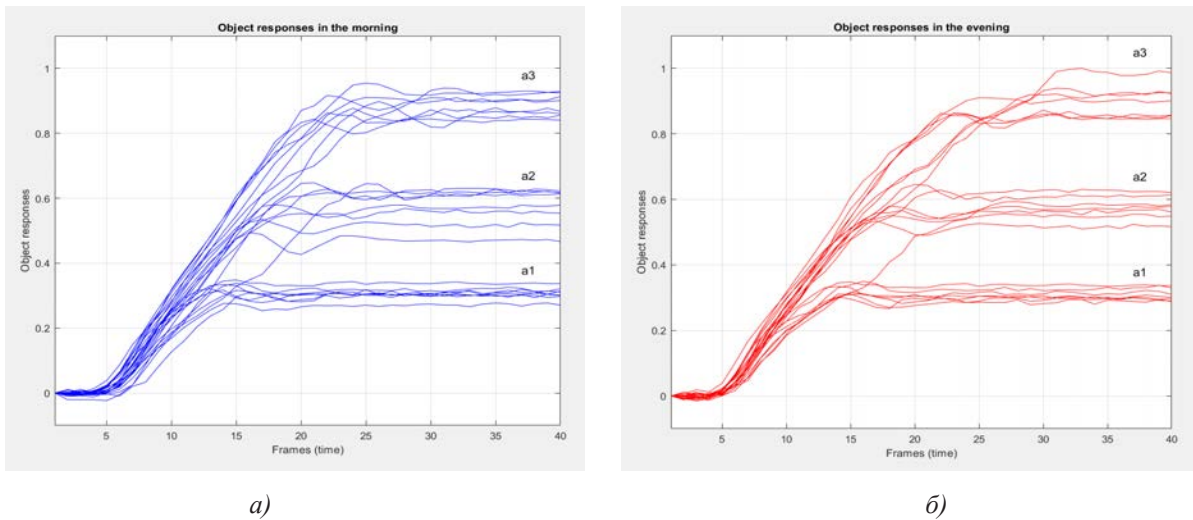


Рис. 17. Відгуки ОМС за різних амплітуд тестових сигналів: а) – «Вранці»; б) – «Ввечері»

стартової позиції на основі обчислень за формулою (7) визначено перехідні функції ОМС під час використання апроксимаційних моделей різного ступеня  $N$  ( $N=1, 2, 3$ ):  $\hat{h}_1^{(2)}[m]$  – при  $N=1$ ;  $\hat{h}_1^{(2)}[m]$  і  $\hat{h}_2^{(2)}[m, m]$  – при  $N=2$ ;  $\hat{h}_1^{(3)}[m]$ ,  $\hat{h}_2^{(3)}[m, m]$  і  $\hat{h}_3^{(3)}[m, m, m]$  – при  $N=3$ . Графіки перехідних функцій для станів респондента «Вранці» та «Ввечері» на основі моделі (1) при  $N=1$  представлені на рис. 19, при  $N=2$  – на рис. 20 та при  $N=3$  – на рис. 21. Визначено відгуки за допомогою розрахунків на моделях за різних амплітуд вхідних сигналів для аналогічних станів при  $N=1, 2, 3$ , графіки яких наводяться у порівнянні з подібними відгуками ОМС на рис. 22–24, відповідно. На рис. 25 приведені графіки розрахованих на моделі відгуків для  $N=3$  за різних амплітуд вхідних сигналів «Вранці» і «Ввечері».

**Аналіз варіативності перехідних функцій.** Мінливість (відхилення) перехідних функцій різних порядків  $n$  апроксимаційної моделі ОМС для станів респондента «Вранці»  $\hat{h}_{mn}^{(N)}[m]$  та «Ввечері»  $\hat{h}_{en}^{(N)}[m]$  кількісно визначається за допомогою показників:

$\sigma_{nN}$  – максимальне відхилення

$$\sigma_{nN} = \max_{m \in [0, M]} \left| \hat{h}_{mn}^{(N)}[m] - \hat{h}_{en}^{(N)}[m] \right|, \quad (8)$$

$\epsilon_{nN}$  – нормоване середньоквадратичне відхилення

$$\epsilon_{nN} = \left( \frac{\sum_{m=0}^M \left( \hat{h}_{mn}^{(N)}[m] - \hat{h}_{en}^{(N)}[m] \right)^2}{\sum_{m=0}^M \left( \hat{h}_{mn}^{(N)}[m] \right)^2} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

$n = 1, 2, \dots, N$ .

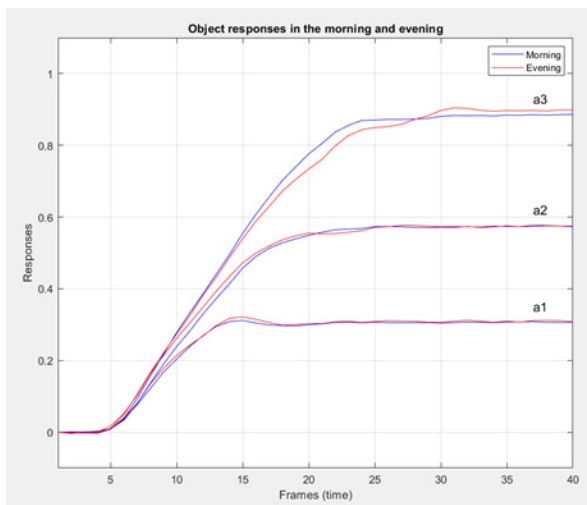


Рис. 18. Усереднені відгуки ОМС при різних амплітудах тестових сигналів «Вранці» і «Ввечері»

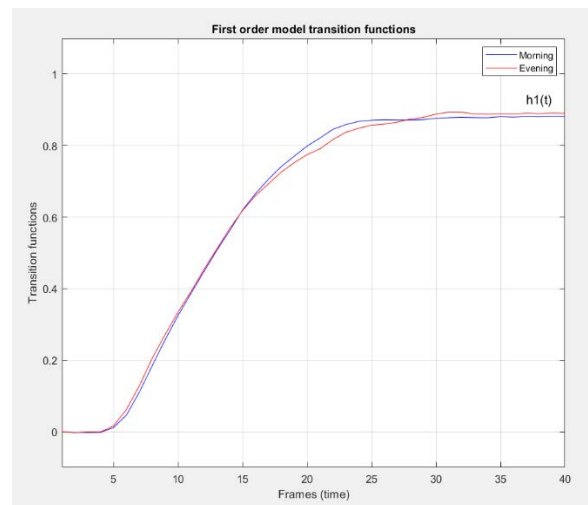


Рис. 19. Оцінки перехідних функцій ОМС «Вранці» і «Ввечері» за  $N=1$

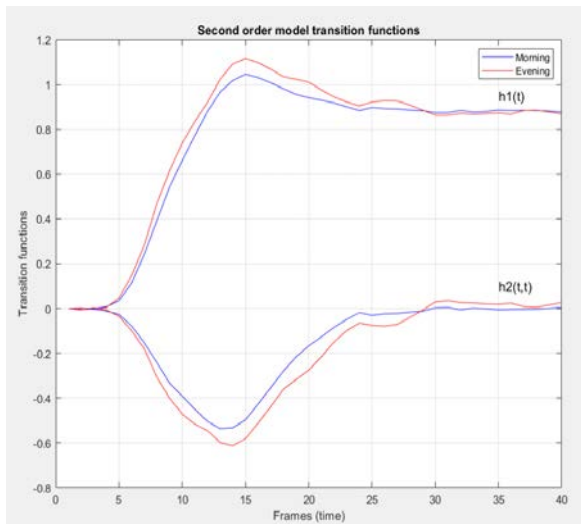


Рис. 20. Оцінки перехідних функцій ОМС «Вранці» і «Ввечері» за  $N=2$

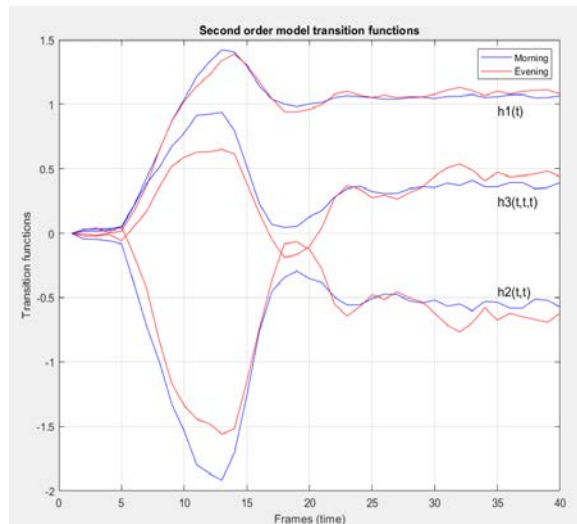


Рис. 21. Оцінки перехідних функцій ОМС «Вранці» і «Ввечері» за  $N=3$

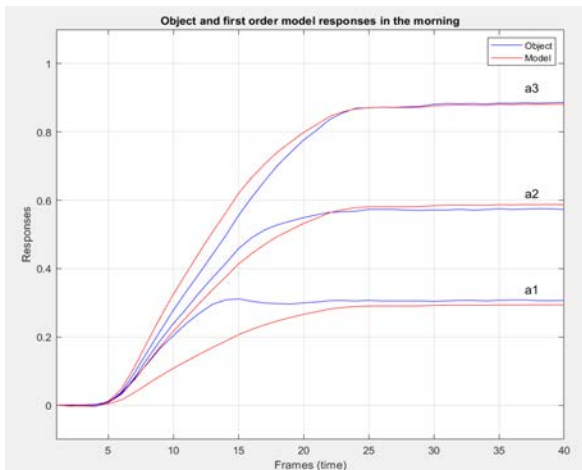


Рис. 22. Відгуки ОМС та моделі для  $N=1$  за різних амплітуд вхідних сигналів «Вранці»

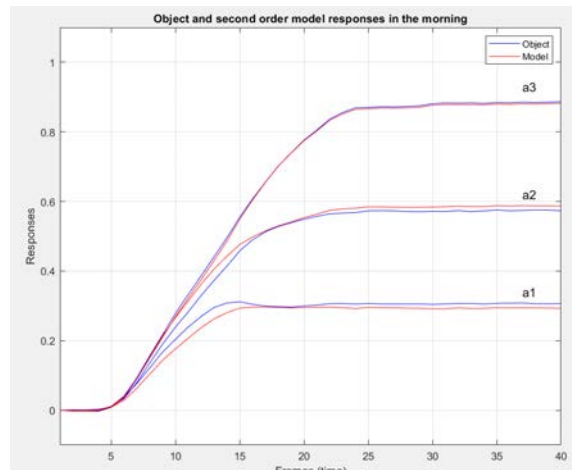


Рис. 23. Відгуки ОМС та моделі для  $N=2$  за різних амплітуд вхідних сигналів «Вранці»

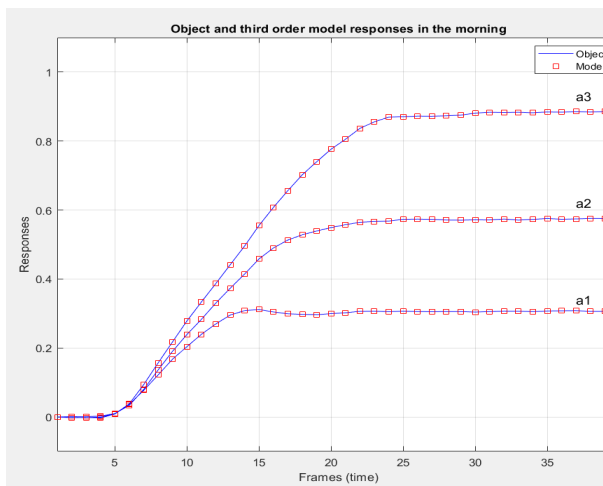


Рис. 24. Відгуки ОМС та моделі для  $N=3$  за різних амплітуд тестових сигналів «Вранці»

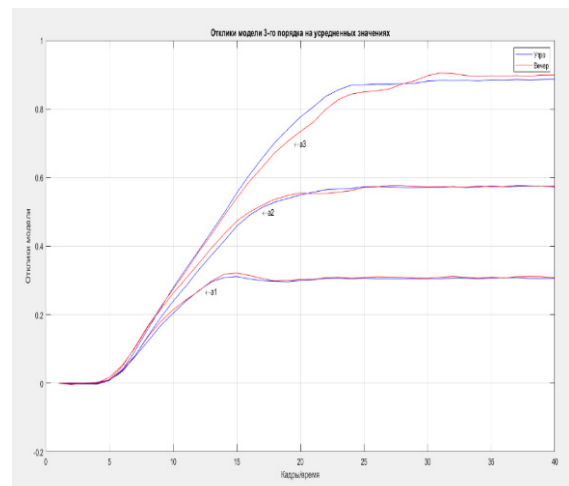


Рис. 25. Відгуки моделі для  $N=3$  за різних амплітуд тестових сигналів «Вранці» і «Ввечері»

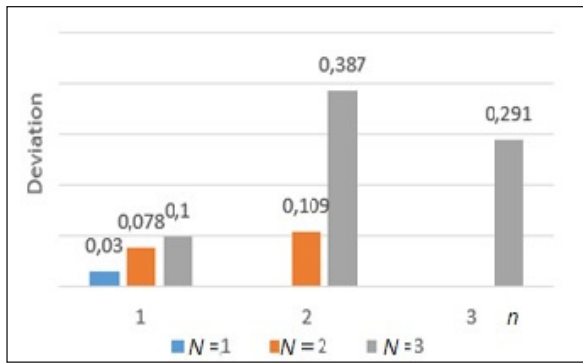


Рис. 26. Діаграма показників відхилень  $\sigma_{nN}$

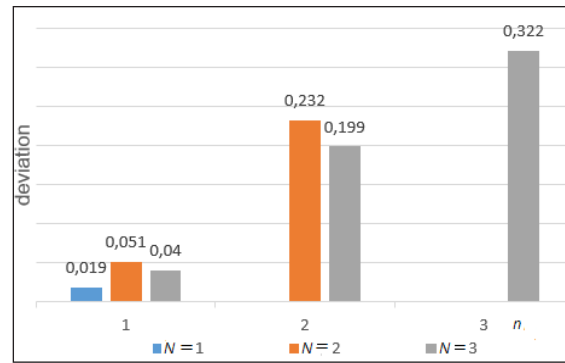


Рис. 27. Діаграма показників відхилень  $\epsilon_{nN}$

Показники відхилень перехідних функцій різних порядків  $n$  моделей ОМС респондентів «Вранці» та «Ввечері» для  $N = 1, 2, 3$  наведені в Таблиці 1 і представлені діаграмами на рис. 26 і рис. 27.

Таблиця 1

**Показники відхилень багатовимірних перехідних функцій**

| $N$ | $\epsilon_{1N}$ | $\sigma_{1N}$ | $\epsilon_{2N}$ | $\sigma_{2N}$ | $\epsilon_{3N}$ | $\sigma_{3N}$ |
|-----|-----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|---------------|
| 1   | 0.019           | 0.03          | —               | —             | —               | —             |
| 2   | 0.051           | 0.078         | 0.232           | 0.109         | —               | —             |
| 3   | 0.04            | 0.1           | 0.199           | 0.387         | 0.322           | 0.291         |

Як можна бачити на рис. 26 та 27, отримані перехідні функції першого порядку для станів «Вранці» та «Ввечері» майже не залежать від стану індивіда. Однак діагональні перетини перехідних функцій другого і третього порядку істотно змінюється за величиною. Отже, вони можуть ефективно використовуватися як основне джерело початкових даних під час побудови класифікаторів психофізіологічних станів людини за допомогою машинного навчання.

**Висновки.** Розроблено інструментальні алгоритмічні та програмні засоби побудови непараметричної динамічної моделі окуломоторної системи людини з урахуванням її інерційних і нелінійних властивостей на основі даних експериментальних досліджень «вхід-вихід» із використанням технології айтрекінгу. При цьому застосовується модель Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій.

Розв’язано такі завдання:

1. Обґрунтовано застосування методу ідентифікації ОМС на основі моделі Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій із використанням тестових візуальних стимулів із різними відстанями від стартової позиції – ступінчастих функцій різної амплітуди.
2. Розроблено інформаційну технологію отримання експериментальних даних для ідентифікації ОМС за допомогою тестових візуальних стимулів та застосування айтрекінгу для відстеження при цьому відповідних рухів ока.
3. Розроблено в системі Matlab програмні засоби ідентифікації ОМС на основі поліномів Вольтерри у вигляді багатовимірних перехідних функцій за даними айтрекінгу.
4. Виконано експериментальні дослідження ОМС за допомогою технології айтрекінгу та визначено на основі даних окулографічних досліджень перехідні функції першого, другого та третього порядків. Дослідження ОМС за допомогою отриманих перехідних функцій засобами комп’ютерного моделювання підтверджують адекватність побудованої апроксимаційної моделі реальній системі.
5. Здійснено аналіз варіативності перехідних функцій, що відповідають різним психофізіологічним станам індивіда (станам втоми). Установлено, що діагональні перетини перехідних функцій другого і третього порядку щодо перехідних функцій першого порядку для станів втоми істотно змінюється за величиною. Таким чином, їх можна використовувати як джерела даних під час формування просторів діагностичних ознак для побудови класифікаторів психофізіологічних станів людини.

**Список літератури:**

1. Kepler J. Biomechanical Modelling of the Human Eye. Netzwerk für Forschung, Lehre und Praxis, Linz, 2004. 231 p.
2. Айтрекинг в психологической науке и практике / Отв. ред. В.А. Барабанщиков. Москва : Когито-Центр, 2015. 410 с.
3. Барабанщиков В.А., Жегалло А.В. Регистрация и анализ направленности взора человека. Москва : ИП РАН, 2013.



4. Барабанщиков В. А., Жегалло А. В. Методы регистрации движений глаз в психологии: основы учебно-методического комплекса. *Экспериментальная психология*. 2014. № 1. С. 132–137.
5. Jansson D., Medvedev A., Axelson H., Nyholm D. Stochastic anomaly detection in eye-tracking data for quantification of motor symptoms in Parkinson's disease. *Advances in Experimental Medicine and Biology*. 2015. 823 P. 63–82. DOI: 10.1007/978-3-319-10984-8\_4
6. Jansson D., Rosén O., Medvedev A. Parametric and nonparametric analysis of eye-tracking data by anomaly detection, *IEEE Transaction control system technology*, 23, 2015, pp. 1578–1586.
7. Bro V., Medvedev A. Nonlinear dynamics of the human smooth pursuit system in health and disease: model structure and parameter estimation, *IEEE 56th Annual Conference on Decision and Control*, (Melbourne) 4692–4697, 2017.
8. Rigas I., Komogortsev O., Shadmehr R. Biometric recognition via the complex eye movement behavior and the incorporation of saccadic vigor and acceleration cues, *ACM Trans. on Applied Perception*, 2016, 13 (2), pp.1-21.
9. Doyle F.J., Pearson R.K., Ogunnaike B.A. Identification and control using Volterra models, Germany: Springer Publ., 2002, 314 p.
10. Pavlenko V., Milosz M., Dzienkowski M. Identification of the oculo-motor system based on the Volterra model using eye tracking technology // 4th Int. Conf. on Applied Physics, Simulation and Computing (APSAC 2020) 23–25 May 2020, Rome, Italy // *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 1603, 2020. IOP Publishing, 2020. P. 1–8. doi:10.1088/1742-6596/1603/1/012011
11. Pavlenko V., Salata D., Dombrovskiy M., Maksymenko Yu. Estimation of the Multidimensional Transient Functions Oculo-Motor System of Human // *Mathematical Methods and Computational Techniques in Science and Engineering: AIP Conf. Proc. MMCTSE 2017*, Cambridge, UK, 24–26 February 2017. Vol. 1872. Melville, New York, 2017. 020014-1–020014-8; doi: 10.1063/1.4996671. Published by AIP Publishing. 978-0-7354-1552-2. P. 110-117.
12. Pavlenko V.D. Identification of a Oculo-Motor System Human Based on Volterra Kernels / *International Journal of Biology and Biomedical Engineering*. 2017. Vol. 11. 121–126.
13. El Haj M., Coello Y., Kapogiannis D., Gallouj K., Antoine P. Negative prospective memory in Alzheimer's Disease: do not perform that action. *Journal of Alzheimer's Disease*. 2018. 61(2), pp. 663–672. doi: 10.3233/JAD-170807.
14. Corveleyn X., Blampain J., Ott L., Lavenu I., Delayen C., Di Pastena A., Coello Y. Body-centred and object-centred motor imagery in Alzheimer disease *Current Alzheimer Research*. 2018. 15 (3). doi: 10.2174/156720504666171030105720.
15. Wamain Y., Corveleyn X., Ott L., Coello Y. Does the motor system contribute to the perception of changes in objects visual attributes? The neural dynamics of sensory binding by action. *Neuropsychologia*. 2019. 132. 107121, doi: org/10.1016/j.neuropsychologia.2019.107121
16. Daoudi M., Coello M., Desrosiers P., Ott L. A New Computational Approach to Identify Human Social Intention in Action. In the 13th IEEE International Conference on Automatic Face & Gesture Recognition. FG 2018. Xi'an, China on May 15–19. 2018.
17. Qesque F., Mignon A., Coello Y. Cooperative and competitive contexts do not modify the effect of social intention on motor action. *Consciousness and Cognition*, 2017, 56, pp. 91–99. doi: 10.1016/j.concog.2017.06.011.
18. Lanata L., Sebastian, Di Gruttola F., Di Modica S., Scilingo E.P., Greco A. Nonlinear Analysis of Eye-Tracking Information for Motor Imagery Assessments. *Frontiers in Neuroscience*. 2020. 13:1431 doi: 10.3389/fnins.2019.01431.
19. Gueugneau N., Crognier L., Papaxanthis C. The influence of eye movements on the temporal features of executed and imagined arm movements. *Brain Research*. 1187. 2008. pp. 95–102.
20. Guillot A., Collet C. Duration of mentally simulated movement: A review. *Journal of Motor Behaviour*. 2005. 37. pp. 10–20.
21. Guillot A., Collet C. Construction of the motor imagery integrative model in sport: A review and theoretical investigation of motor imagery use, " *International Review of Sport and Exercise Psychology*. 1. 2008. pp. 32–44.
22. Guillot A., Collet C., Nguyen V. A., Malouin F., Richards C., Doyon J. Functional neuroanatomical networks associated with expertise in motor imagery ability. *Neuroimage*. 41. 2008. pp. 1471–1483.
23. Guillot A., Louis M., Collet C. Neurophysiological substrates of motor imagery ability. In A. Guillot and C. Collet (Eds). *The neurophysiological foundations of mental and motor imagery*. 2010. pp. 109–124. Oxford University Press.
24. Павленко В.Д., Шаманіна Т.В. Побудова моделі Вольтерри око-рухової системи людини на основі даних айтрекінгу. *Вісник НТУ «ХПИ»*. Тем. вип.: *Інформатика і моделювання*. 2020. № 1 (3). С. 15–29.
25. Pavlenko V., Pavlenko S. Deterministic identification methods for nonlinear dynamical systems based on the Volterra model. *Applied Aspects of Information Technology*. 2018. 01(01). pp. 9–29.

26. Pavlenko V. Identification of Systems using Volterra Model in Time and Frequency Domain. In book: «Advanced Data Acquisition and Intelligent Data Processing». Chapter 10. V. Haasz and K. Madani (Eds.). River Publishers. 2014. pp. 233–270. ISBN 978-87-93102-73-6.

**Shamanina T.V., Pavlenko V.D. TOOLS OF IDENTIFICATION OF THE HUMAN OCULO-MOTOR SYSTEM BASED ON THE VOLTERRA MODEL USING EYE-TRACKING TECHNOLOGY**

*Instrumental algorithmic and software tools for constructing a non-parametric dynamic model of the human oculomotor system (OMS) based on its inertial and nonlinear properties based on the data of experimental studies «input-output» using innovative eye-tracking technology have been developed. The polynomial Volterra model in the form of multidimensional transient functions is used. The information technology of obtaining experimental data for the identification of OMS with the help of test visual stimuli and the use of eye-tracking technology to track the corresponding eye movements has been developed. The Signal Manager program has been developed to generate test visual stimuli (bright spots) that are displayed on the computer monitor screen in the specified coordinates. Software eSmart has been developed to determine the coordinates of the pupil of the eye in the video frames obtained during the eye-tracking process on an Android smartphone. The implementation of the computational algorithm for the identification of OMS in the form of transient functions was carried out using the Matlab program.*

*Experimental studies of OMS were performed using eye-tracking technology and the transition functions of the first, second and third orders were determined on the basis of oculographic studies. Studies of local self-government with the help of the obtained transient functions by means of computer modeling confirm the adequacy of the constructed approximation model to the real system.*

*The analysis of variability of transitional functions corresponding to different psychophysiological states of the individual (states of fatigue) is carried out. It is established that the diagonal intersections of the transition functions of the second and third order with respect to the transition functions of the first order for states of fatigue vary significantly in magnitude. They can be used as a source of initial data in the formation of the space of diagnostic features for the construction of classifiers of psychophysiological states of man with the help of machine learning. The developed software tools should be used in diagnostic research in the field of neuroscience and psychology.*

**Key words:** *oculomotor system, the identification, the Volterra model, multidimensional transient functions, test visual stimuli, eye-tracking technology, eye-tracker on Android-smartphone, the classifier of psychophysiological states of man, neuroscience, psychology.*

**Яворський О.В.**

Державний університет «Одеська політехніка»

## ДОСЛІДЖЕННЯ СИНТЕЗУ АВТОМАТИЧНОЇ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ НАГРІВАЧА ІЗ СОНЯЧНИМ КОЛЕКТОРОМ

У наш час люди приділяють велику увагу питанням безпеки, надійності, якості та економічності роботи основного устаткування. Одним зі способів підвищення якості цих питань є автоматизація технологічних процесів. У цій статті проведено дослідження синтезу автоматичної системи регулювання рівня та температури нагрівача із сонячним колектором.

Найважливішим показником сучасного науково-технічного прогресу є значна інтенсифікація технологічних процесів, зростання одиничної потужності і продуктивності агрегатів. Наслідком цього є вимоги до надійності і якості управління технологічними процесами. Забезпечити вирішення цих завдань дозволяють технічні засоби автоматизації, впровадження яких дозволяє досягти поліпшення умов праці і зниження собівартості продукції, що випускається.

Нагрівач складається з таких двох основних частин, як сонячний колектор та бак-акумулятор.

Будь-який технологічний об'єкт обов'язково треба контролювати. У контролі основних параметрів важливу роль відіграє правильність вибору засобів вимірювальної техніки, методів виміру технологічних змінних.

Як правило, сонячний колектор використовують для того, щоб додатково опалювати приміщення навесні і влітку, а також акумулювати сонячну енергію для нагрівання води. Використовуючи колектор, гарячу воду і тепло споживач отримує абсолютно безкоштовно, якщо не брати до уваги його купівлю [5].

Виокремлюють такі два види сонячних колекторів, як вакуумні і плоскі. Принцип роботи обох видів колекторів аналогічний і відрізняється лише складом. Так, до складу вакуумних колекторів входять скляні трубки, які за допомогою спеціального пристрою всередині і поглинають світло. Плоскі ж колектори складаються з внутрішньої пластини і заклопані панелі. Слід зазначити, що вакуумні колектори бувають прямокутними і з непрямою тепловою передачею [5].

Переоцінити переваги сонячних колекторів не можна, оскільки такі пристосування дуже вигідні і мають низку очевидних переваг (скорочення витрат, зниження навантаження тощо). Із їх появою підігрівати басейн, опалювати будинок, забезпечувати енергією теплиці, отримувати гарячу воду тощо стало набагато простіше і, що важливо, дешевше [5].

**Ключові слова:** сонячний колектор, автоматизація, регулятор.

**Постановка проблеми.** Нині сонячний колектор дуже корисний і часто використовуваний технічний винахід, сфера застосування якого з кожним роком тільки збільшується. Особливо це стосується тих районів, де немає централізованої подачі електроенергії. Тому в таких випадках перетворювачі сонячної енергії є особливо рентабельними і надійними джерелами енергопостачання. Крім того, геліосистеми використовують підприємства малого і середнього бізнесу, а також власники приватних будинків. Що ж стосується промисловості, то там сонячні колектори використовуються як резервні джерела енергії [5]. Є багато наукових праць, у яких досліджено сонячні колектори. Так, наприклад, метою роботи [1] є перевірка енергоефективності використання установки гарячого водопостачання на основі сонячного колектора. У роботі [3] вирішувалися завдання

синтезу методики розробки системи автоматичного управління температурним режимом, управління структурою об'єкта і вибору критерію оцінки ефективності системи, моделювання системи, вибору й обґрунтування її структур. У роботі [2] розглядається оцінка ролі альтернативних джерел енергії у вирішенні енергетичних проблем світової економіки. У статті [4] розглянуто питання застосування теплових насосів для вирішення питань енергозбереження.

**Постановка завдання.** У статті необхідно вирішити такі завдання, як:

- дослідження наукової літератури з експлуатації сонячних колекторів;
- розробка функціональної схеми автоматизації та схеми комплексу технічних засобів автоматизації;
- розробка математичної моделі;
- синтез автоматичної системи регулювання;

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

**Опис об'єкта автоматизації.** Сонячний колектор (геліоустановка) – пристрій для збору теплової енергії Сонця, яку переносять видимим світлом і ближнім інфрачервоним випромінюванням. На відміну від сонячних батарей, які виробляють електрику, сонячний колектор виконує нагрів матеріалу-теплоносія. Сонячний водонагрівач складається із зовнішньої (сонячний колектор) і внутрішньої (так званого резервуару-теплообмінника) частин. Наприклад, для будинку працюють за таким принципом: резервуар-теплообмінник за допомогою зовнішнього колектора нагріває воду, яка надходить у систему опалення. Воду в резервуарі можна використовувати і як гарячу воду для інших потреб. Але тут потрібно вживати додаткових заходів, щоб резервуар-теплообмінник (разом із сонячною енергією) також зміг працювати від інших джерел домашнього опалення, коли сонячної енергії буде не зовсім достатньо [6].

Сонячна установка складається з колектора, теплообмінного контуру і акумулятора тепла. Рідина циркулює в колекторі. Теплоносій нагрівається від сонця і віддає енергію воді через теплообмінник, що міститься в баку. Там вода залиша-

ється до її використання, тому в нього має бути хороша теплоізоляція. У баку також установлений нагрівач-дублер, щоб обігрівач підігрів воду до потрібної температури, коли температура води опуститься нижче за встановлену.

**Розробка функціональної схеми автоматизації та схеми комплексу технічних засобів автоматизації.** Функціональна схема автоматизації представлена на рисунку 1. Схема комплексу технічних засобів автоматизації представлена на рисунку 2.

**Розробка математичної моделі.** Технологічна схема установки зображена на рисунку 3. Була розрахована математична модель, а отримані передатні функції зображені в таблиці 1.

Для моделювання об'єкта в програмному забезпеченні Simulink були задані такі технологічні параметри:

$$R1=1/3600, \quad \rho = 1000 \text{ кг/м}^3, F_3 = 1 \text{ м}^3 / \text{с}, \\ R2=1/1800, T1=350\text{с}, T2=180\text{с}, T3=300\text{с}, \tau = 200\text{с}$$

За передатними функціями в таблиці (1) була побудована модель об'єкта в програмі Simulink, зображена на рисунку 4.

**Синтез автоматичної системи регулювання.** Розраховану математичну модель у пункті 4

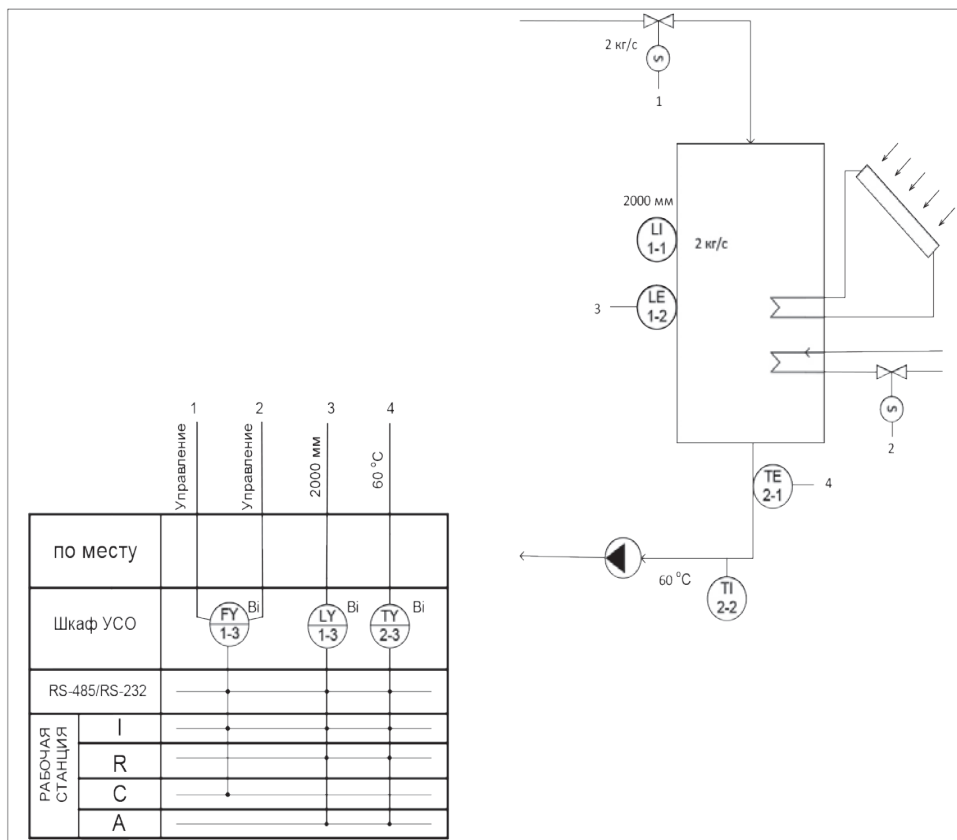


Рис. 1. Функціональна схема автоматизації

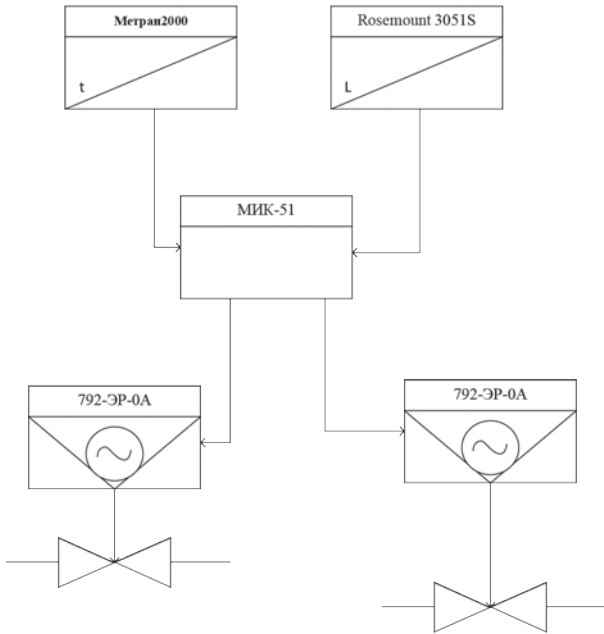


Рис. 2. Схема комплексу технічних засобів автоматизації

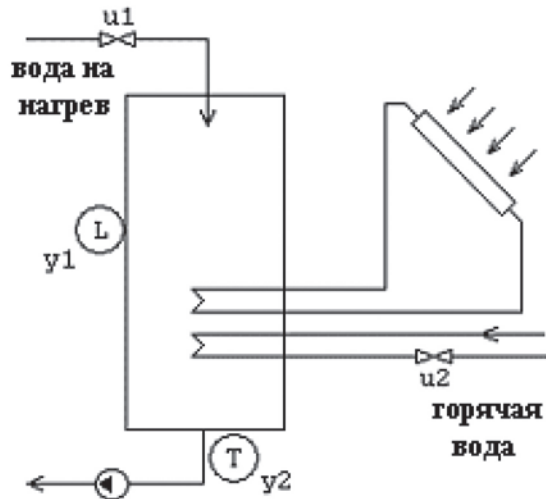


Рис. 3. Технологічна схема установки

Таблиця 1

Матриця передавальних функцій об'єкта управління

|           | y1 2+/-0.2м                        | y2, 60+/-2 C                              |
|-----------|------------------------------------|---|
| U1, 2кг/с | $\frac{1}{F_3 \cdot \rho \cdot p}$ | $\frac{R_1 \cdot e^{-\tau p}}{T_3 p + 1}$ |
| U2, 1кг/с |                                    | $\frac{R_2}{(T_2 p + 1)(T_1 p + 1)}$      |

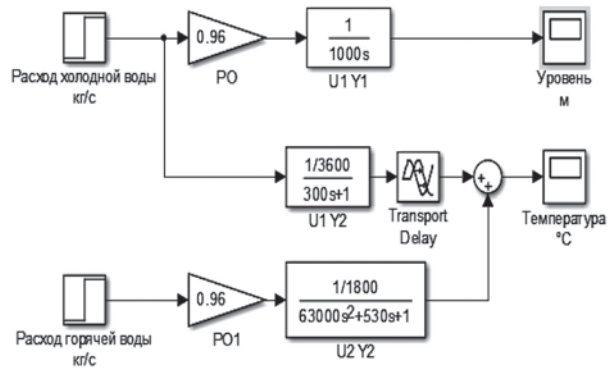


Рис. 4. Математична модель нагрівача із сонячним колектором у середовищі Simulink

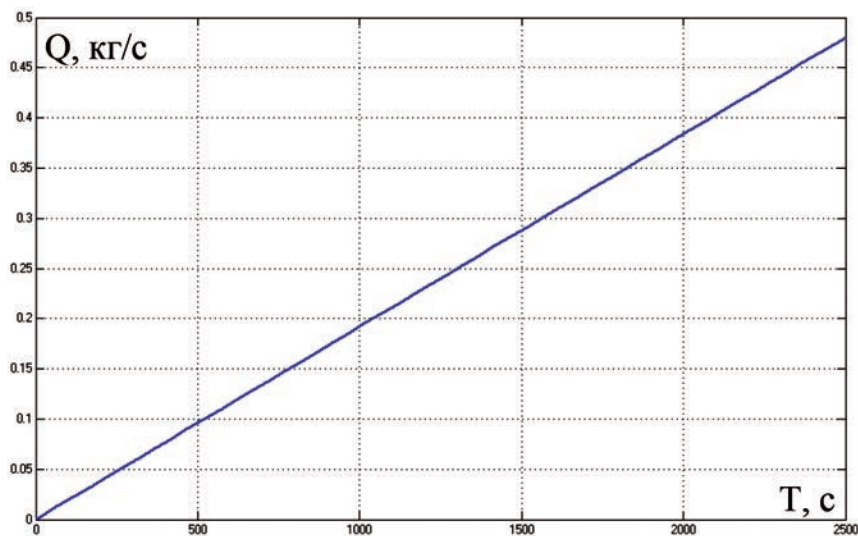


Рис. 5. Крива розгону за регулювальним каналом «Витрата холодної води – Рівень» за умов збурення +10% від номінального значення

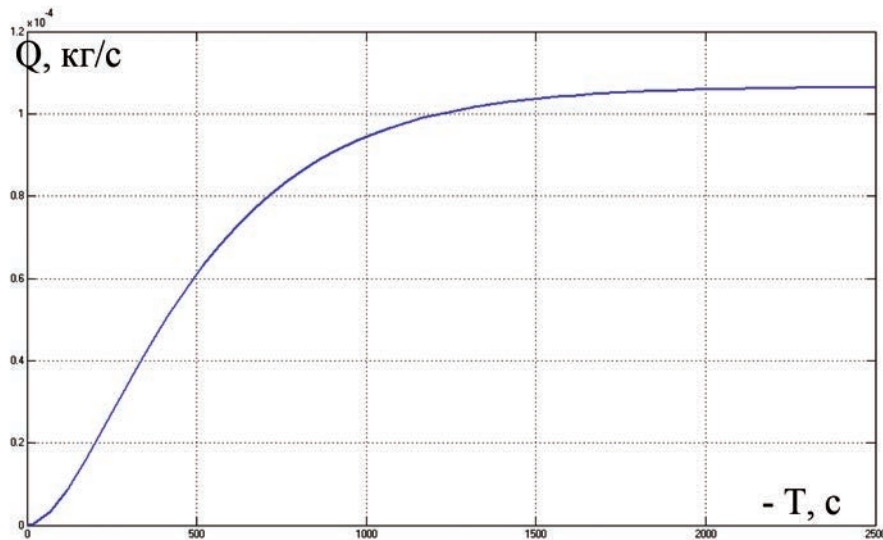


Рис. 6. Крива розгону за регулювальним каналом «Витрата гарячої води – Температура» за умов збурення +10% від номінального значення

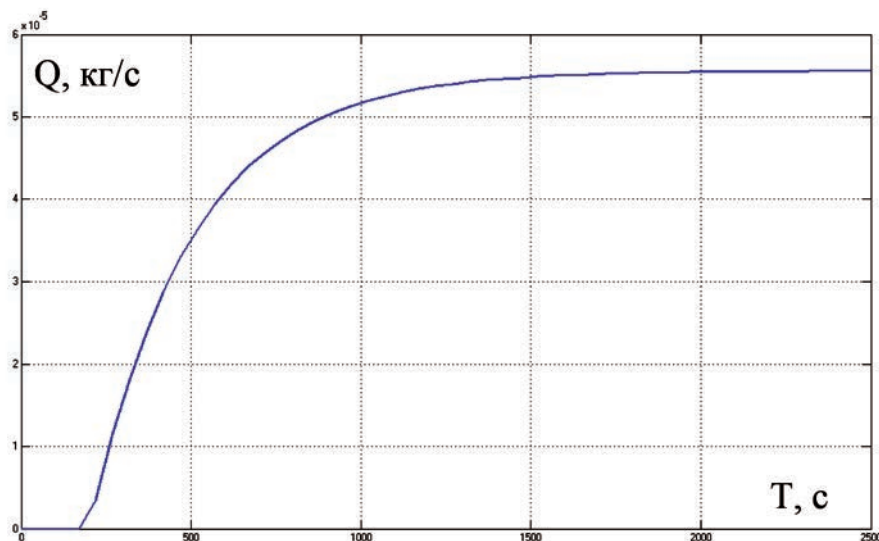


Рис. 7. Крива розгону за обурювальним каналом «Витрата холодної води – Температура» за умов збурення +10% від номінального значення

реалізовано в середовищі Simulink, що дозволить наочно простежити зміну перехідного процесу з урахуванням додавання регулятора і без нього. Структурна схема регулювання рівня та температури в нагрівачі з сонячним колектором представлена на рисунку 8.

Для розрахунку параметрів необхідно зняти значення з розгінної характеристики. Розгінна характеристика представлена на рисунку 9.

Був опрацьований графік.

$$\tau_{\text{обц}} = 1 \text{ сек} ; \tau_{\text{тр}} = 0.99 \text{ сек}; \tau_e = \tau_{\text{обц}} - \tau_{\text{тр}} = 0.01 \text{ сек} ;$$

$$K_m = \frac{\Delta I}{\Delta t \cdot \Delta h} = 0.00032 \frac{\text{мА}}{\text{с} \cdot \% \text{хода}}; \frac{\tau_e}{\tau} = 0.01$$

Виходячи з цього співвідношення за таблицею Кона, знаходимо значення  $k, c$ :

$$k = 0,87; c = 1.7$$

Виконуємо розрахунок параметрів регулювання регулятора та висловлюємо коефіцієнт П-регулятора  $K_p$

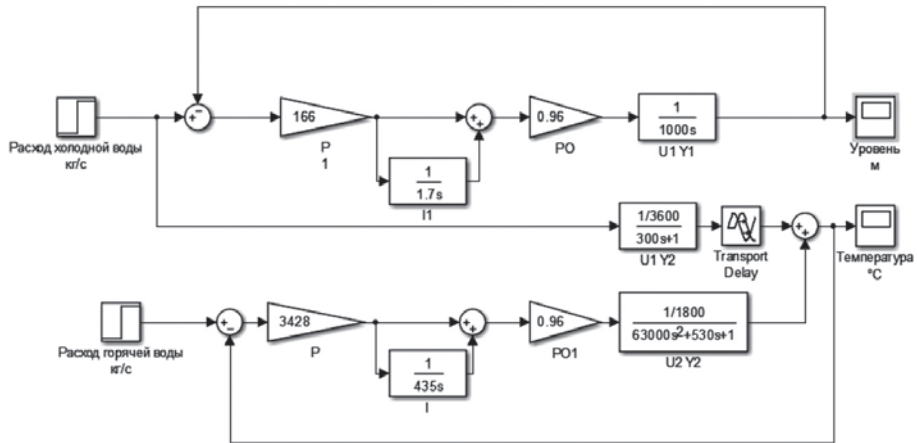


Рис. 8. Структурна схема АСР рівня та температури в нагрівачі з сонячним колектором у середовищі Simulink

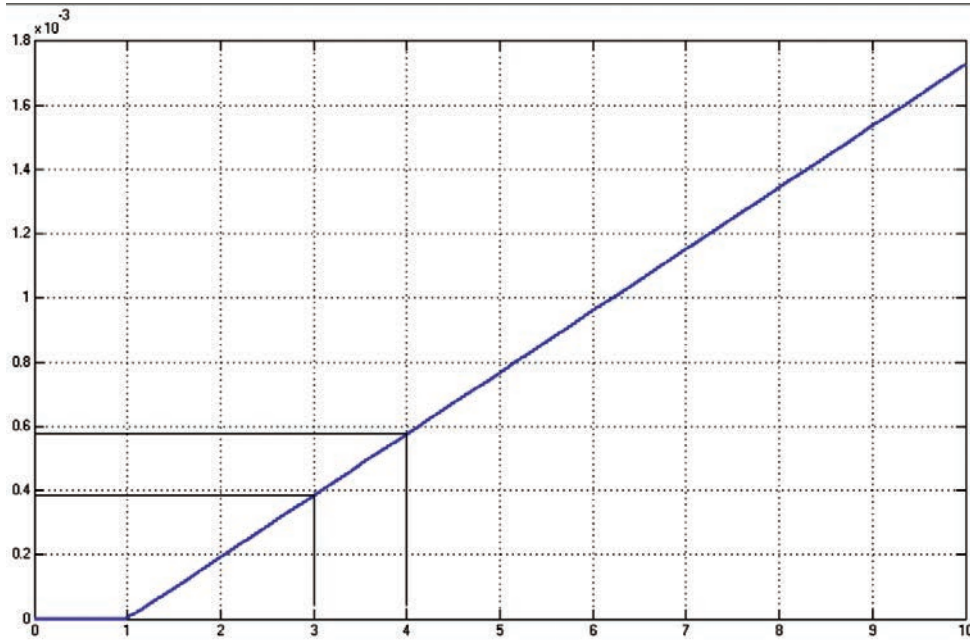


Рис. 9. Розгінна характеристика

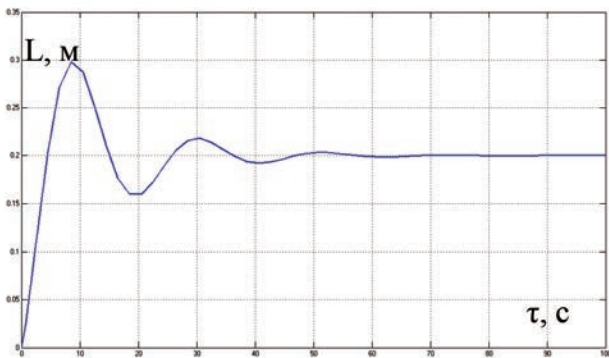


Рис. 10. Перехідний процес регулювання рівня води

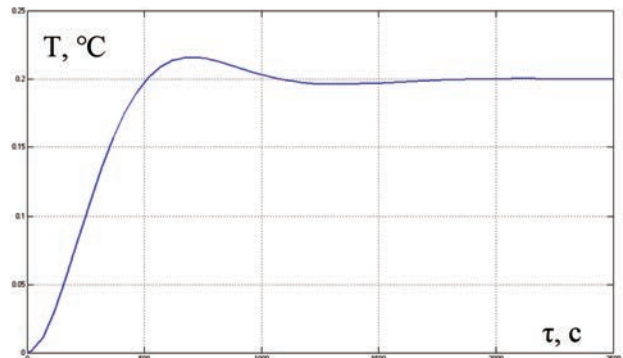


Рис. 11. Перехідний процес регулювання температури води

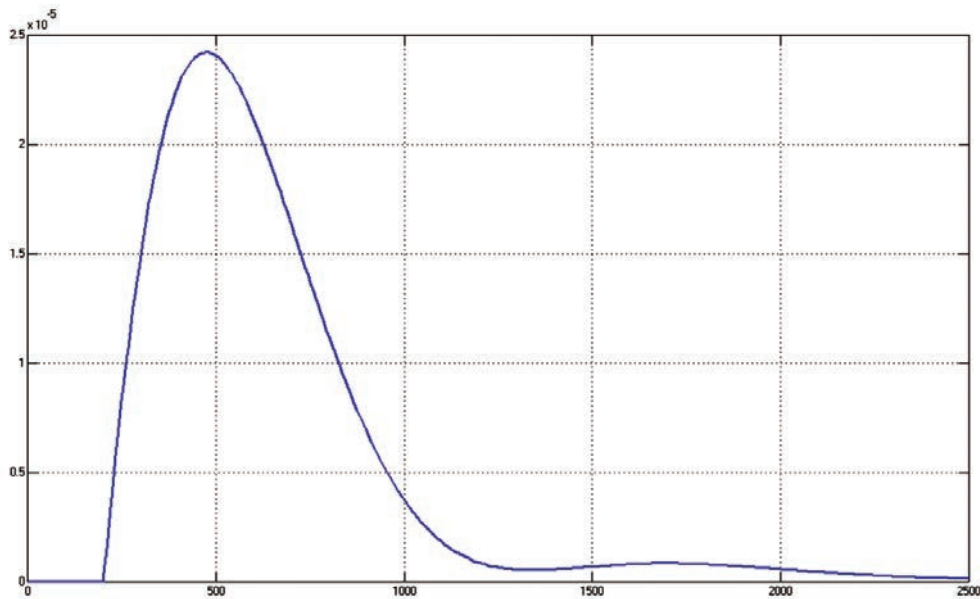


Рис. 12. Перехідний процес регулювання температури води

$$k = K_M \cdot K_P \cdot \tau; K_P = \frac{k}{K_M \cdot \tau} = 166$$

Постійна часу ПІ-регулятора

$$T_u = c \cdot \tau = 1 \cdot 1.7 = 1.7 \text{ c}$$

Перехідний процес регулювання рівня води під час подання збурення із завдання представлений на рисунку 10.

Перехідний процес регулювання температури води під час подання збурення із завдання представлений на рисунку 11.

Перехідний процес регулювання температури води під час подання збурення за каналом «Витрата холодної води – Температура» представлений на рисунку 12.

За перехідним процесам регулювання видно, що регулятор впорюється зі своїм завданням і виконує регулювання рівня і температури.

**Висновки.** У цій статті була розроблена автоматизована система управління технологічними процесами в нагрівачі із сонячним колектором. У програмному пакеті Simulink побудована структурна

схема АСР-рівня та температури води в нагрівачі із сонячним колектором. Отримано перехідні процеси регулювання рівня та температури залежно від зміни витрати холодної і гарячої води в допустимих межах. Відповідно до поставлених завдань визначено параметри автоматичного регулювання і розроблено функціональну схему автоматизації технологічного процесу. Таким чином, як висновок необхідно зазначити, що автоматизація управління неминуче спричиняє здійснення системного підходу, оскільки вона передбачає наявність саморегульованої системи, яка має вхід, вихід і механізм управління. Системний підхід дозволяє розглядати аналіз і синтез різних за своєю природою і складністю об'єктів із єдиної точки зору, виявляючи при цьому найважливіші характерні риси функціонування системи і враховуючи найбільш істотні для всієї системи фактори. Значення системного підходу особливо велике під час проектування й експлуатації таких систем, як комп'ютерно-інтегровані системи управління, які є людино-машинними системами, де людина виконує роль суб'єкта управління.

#### Список літератури:

1. Муколянец А.А., Музафаров А.Р. Энергоэффективность использования установки горячего водоснабжения на основе солнечного коллектора. CETERIS PARIBUS. 2015. № 2. С. 8–12.
2. Рац Г.И., Мординова М.А. Развитие альтернативных источников энергии в решении глобальных энергетических проблем. Известия Байкальского государственного университета. 2012. № 2. С. 132–136.
3. Тодорцев Ю.К., Максименко И.Н. Объектно-ориентированная модель системы теплоснабжения. Информационные модели. Труды Одесского политехнического университета. 2005. Вып. 2(24). С. 160–164.
4. Лунева С.К. Эффективность применения тепловых насосов. Техничко-технологические проблемы сервиса. 2015. № 3(33). С. 59–62.



5. Интернет журнал о промышленности в Украине, 2021. URL: <http://td-bm.com.ua/blogs/naviso/uk/batarea-naviso-potribni-sonacni-kolektori/>
6. Сайт компанії з проектування інженерних систем розумного дому «Караван». URL: [hifidom.com.ua/povyny/147-solarwater](http://hifidom.com.ua/povyny/147-solarwater)

### **Yavorskyi O.V. STUDY OF THE SYNTHESIS OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE HEATER WITH A SOLAR COLLECTOR**

*Nowadays, people pay great attention to safety, reliability, quality and cost-effectiveness of basic equipment. One way to improve the quality of these issues is to automate technological processes. In this article, a study of the synthesis of an automatic control system for the level and temperature of the heater with a solar collector.*

*The most important indicator of modern scientific and technological progress is the significant intensification of technological processes, the growth of unit capacity and productivity of units. The consequence of this is the growing demands on the reliability and quality of process control. To provide the decision of these problems technical means of automation which introduction allows to achieve improvement of working conditions and reduction of prime cost of let out production allow.*

*The heater consists of two main parts: a solar collector and a battery tank.*

*Any technological object must be controlled. To control the basic parameters, the correctness of the choice of measuring equipment, methods of measuring technological variables plays an important role.*

*As a rule, the solar collector is used to additionally heat the room in spring and summer, as well as to accumulate solar energy to heat water. Using the collector, hot water and heat the consumer gets absolutely free, if you do not take into account its purchase.*

*There are two types of solar collectors: vacuum and flat. The principle of operation of both types of collectors is similar, but distinguishes them primarily in composition. Thus, the composition of vacuum collectors includes glass tubes, which with the help of a special device inside actually absorb light. Flat collectors consist of an inner plate and a glazed panel. It should be noted that vacuum collectors are direct-flow and with indirect heat transfer.*

*It is impossible to overestimate the advantages of solar collectors, as these devices are really very profitable and have a number of obvious advantages (reduced costs, reduced load, and so on). With their appearance, heating the pool, heating the house, providing energy to the greenhouse, getting hot water and more became much easier, and most importantly cheaper.*

**Key words:** solar collector, automation, regulator.

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 621. 311

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/30>

*Ленчевський Є.А.*

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

*Тесленко О.І.*

Інститут загальної енергетики Національної академії наук України

### ПЕРСПЕКТИВНІ МОЖЛИВОСТІ ЗБІЛЬШЕННЯ ЗАГАЛЬНОГО ПОТЕНЦІАЛУ МАНЕВРЕНИХ ПОТУЖНОСТЕЙ ОБ'ЄДНАНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ СИСТЕМИ УКРАЇНИ

Сьогодні підвищення гнучкості та надійності систем генерації електроенергії є вкрай актуальною проблемою для Об'єднаної енергетичної системи України. У статті розглянуто перспективний напрям вирішення проблеми створення бездефіцитних резервів маневрених потужностей для виконання процесів первинного, вторинного і третинного регулювання частоти та потужності. Пропонується у засобах автоматизованої системи диспетчерського управління діючих ТЕЦ використати автоматично кероване навантаження (споживання електричної потужності) комплексів електричних теплогенераторів (ЕТГ). Ці комплекси ЕТГ стануть складовою частиною ТЕЦ та потужних котелень централізованих систем теплопостачання. Наведені результати нашого дослідження демонструють високу енергетичну й економічну ефективність використання автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ у засобах ущільнення добового графіку електричного навантаження Об'єднаної енергетичної системи України. Упровадження першого комплексу ЕТГ загальною електричною потужністю 500 МВт дасть змогу перевести 10 маневрових енергоблоків загальною потужністю 1 500 МВт у базовий режим експлуатації. Додаткове впровадження другого комплексу ЕТГ загальною електричною потужністю 1 000 МВт дасть змогу перевести ще 30 маневрових енергоблоків (оберткового резерву) загальною потужністю 7 500 МВт у базовий режим експлуатації. Реалізація цього інноваційного рішення може забезпечити щорічну економію палива щонайменше 4,268 млн т у. п. (2,987 млн т н. е.). Результати проведених розрахунків економічної ефективності використання комплексів ЕТГ у складі діючих засобів управління Об'єднаної енергетичної системи України показали можливість отримати щорічний прибуток до 3,2 млрд дол. США. Застосування комплексів ЕТГ здатне суттєво збільшити загальний потенціал маневрених потужностей Об'єднаної енергетичної системи України.

**Ключові слова:** Об'єднана енергетична система України, автоматизованої системи диспетчерського управління, добовий графік електричного навантаження, маневреність, електричні теплогенератори, система централізованого теплопостачання.

**Постановка проблеми.** Подальший розвиток Об'єднаної енергетичної системи України (ОЕСУ) у найближчі роки буде зумовлений загальним зростанням добового графіку електричного навантаження (ДГЕН). Необхідною передумовою для такого зростання повинен стати економічно доцільний та науково обґрунтований напрям розвитку генеруючих потужностей ОЕСУ. Однак для цього потрібно попередньо вирішити актуальну для ОЕСУ проблему щодо усунення існуючого дефіциту маневрених генеруючих потужностей. Саме за наявності в ОЕСУ бездефіцитного (заданого у відповідності до чинних нормативних документів) резерву маневре-

них потужностей для здійснення процесів первинного, вторинного і третинного регулювання частоти стане цілком можливим збільшити оперативні можливості систем диспетчерського управління режимом надійної експлуатації енергосистеми, а також суттєво поліпшити енергетичні, економічні й екологічні показники ефективності її роботи. Слід зазначити, що вирішити проблему усунення дефіциту маневрених потужностей в ОЕСУ намагалися вже протягом кількох останніх десятиліть, використовуючи для цього усі доступні на той час технічне обладнання та технологічні рішення, однак досягнути бажаних результатів так і не вдалося.

У планах подальшого розвитку ОЕСУ на 2017–2026 рр. передбачено, що після реконструкції енергоблоків теплових електростанцій за заявами генеруючих компаній (ГК) до первинного (НПРЧ) і вторинного (САРЧП) регулювання частоти потенційно будуть залучені ще 28 енергоблоків [1, с. 36]. Однак очікувана величина доступного нормованого первинного резерву на цих енергоблоках становитиме лише  $\pm 160$  МВт. Наявний резерв потужності вторинного регулювання в ОЕСУ також недостатній і становить 432 МВт, який розміщено на шістьох гідроагрегатах Дніпровської гідроелектростанції (ДГЕС-1), приєднаних до центрального регулятора системи САРЧП ДП «НЕК «Укренерго». Необхідно також збільшити і третинний резерв маневрених потужностей щонайменше на 1000–1500 МВт, щоб забезпечити процеси регулювання режиму ОЕСУ без тимчасових відключень частини енергоблоків ТЕС у період нічного зменшення навантаження-споживання ДГЕН [1, с. 37].

У «Планах розвитку системи передачі на 2020–2029 роки» за базовий сценарій розвитку ОЕСУ прийнято напрям подальшого нарощування потужностей відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) [2, с. 19]. В умовах інтеграції в ОЕСУ значної частки змінної електрогенерації з негарантованим виробництвом електроенергії від ВДЕ (сонячних та вітрових електростанцій) вирішення проблеми підвищення гнучкості та надійності електричних систем стає більш актуальним та вагомим. Однак для реалізації цього напрямку традиційними засобами необхідні чималі додаткові капіталовкладення, а наслідком може стати суттєве погіршення екологічних показників роботи ОЕСУ [3, с. 59].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проведені в Інституті загальної енергетики НАН України дослідження показали перспективну можливість реалізації інноваційних технологічних рішень, спрямованих на усунення наявного дефіциту маневрених потужностей за суттєво кращих показників економічної ефективності та за умови поліпшення екологічних показників роботи ОЕСУ. Так, у роботі [4, с. 26] було економічно обґрунтовано можливість створення принципово нової системи автоматичного регулювання частоти і потужності з використанням сучасних споживачів-регуляторів (СР), яка здатна забезпечити річний прибуток обсягом 2,92 млрд дол. США, а термін окупності капіталовкладень становить 0,6 року. Окрім того, у роботах [5; 6] було розглянуто можливість використання автоматично керо-

ваного навантаження комплексів електричних теплогенераторів (ЕТГ), як діючих засобів автоматизованої системи диспетчерського управління (АСДУ) в процесах регулювання режиму ОЕСУ. При цьому передбачалося, що до складу комплексів ЕТГ увійдуть, головним чином, потужні електричні котли, технологічно задіяні на діючих ТЕЦ і потужних котельнях систем централізованого теплопостачання (СЦТ) низки міст, які працюватимуть лише у заданому режимі роботи АСДУ ОЕСУ. Саме за умови використання у засобах АСДУ автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ передбачається можливим сформувати в ОЕСУ резерви маневрених потужностей у відповідності чинному нормативному документу СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.1546:2009 «Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України» [7, п. 5.4.3.3].

**Постановка завдання.** Метою статі є розгляд нового перспективного напрямку застосування комплексів ЕТГ у створенні необхідної для ОЕСУ величини резервів маневрених потужностей (заданої у відповідності чинним нормативним документам) та обґрунтування показників енергетичної та економічної ефективності реалізації такого напрямку вирішення завдання збільшення загального потенціалу маневрених потужностей ОЕСУ.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Як приклад, на рис. 1 приведено добовий графік виробництва/споживання електроенергії ОЕСУ за 14.02.2017, де умовно зображено процеси ущільнення цього ДГЕН автоматично керованим навантаженням комплексів ЕТГ. За статистичними даними, у 2017 р. щодня у покритті навантаження ДГЕН використовувалося до 36 енергоблоків ТЕС. При цьому в період нічного провалу навантаження ДГЕН диспетчери ТЕС тимчасово зупиняли від 7 до 10 енергоблоків. Під час проходження максимальних навантажень 14.02.2017 (о 18<sup>00</sup> дорівнювали 2 2807 МВт із середньодобовою температурою по Україні  $-5,1^{\circ}\text{C}$ ) покриття споживання електроенергії в ОЕСУ забезпечували АЕС, ТЕС, ТЕЦ, ГЕС, ГАЕС та ВДЕ. При цьому у роботі знаходилося 29 пилувугільних енергоблоків одиничною електричною потужністю від 175 МВт до 300 МВт кожний та два корпуси дубль-енергоблоків 300 МВт ТЕС.

Відомо, що сьогодні величина мінімального рівня навантаження ДГЕН ОЕСУ встановлюється за допомогою потужностей навантаження електроприводів ГАЕС на позначці  $P_{\text{МН.1}}^*$  (рис. 1). Однак величина мінімального рівня навантаження ДГЕН  $P_{\text{МН.1}}^*$  у цьому разі досить низька для того, щоб

система диспетчерського управління ОЕСУ мала можливість забезпечити повноцінний процес регулювання режиму протягом усього нічного спаду ДГЕН, зумовленого зменшенням споживання електроенергії існуючими споживачами у нічні години доби, у зв'язку з чим протягом кількох останніх десятиліть диспетчери ТЕС вимушені кожної доби тимчасово зупиняти частину (до 10 одиниць) маневрених енергоблоків ТЕС.

Саме для того, щоб підняти мінімальний рівень навантаження ДГЕН на новий, більш високий рівень, пропонується застосувати автоматично кероване навантаження комплексів ЕТГ, додатково введене до засобів АСДУ ОЕСУ. Передбачається, що саме завдяки процесам управління АСДУ автоматично керованим навантаженням комплексів ЕТГ стане можливим збільшити мінімальний рівень ДГЕН  $P_{\text{мін.1}}^*$  на новий, більш високий рівень  $P_{\text{мін.2}}$  (або  $P_{\text{мін.3}}$ ) й утримувати його протягом усього нічного спаду навантаження ДГЕН (рис. 1).

Якщо мінімальний рівень навантаження ДГЕН буде збільшений до позначки  $P_{\text{мін.2}}^*$  (рис. 1), це означатиме, що базова частина навантаження ДГЕН збільшиться на 1 000 МВт, а маневрена його частина, відповідно, зменшиться, що дасть змогу усунути потребу у тимчасових зупинках 10 енергоблоків ТЕС, які до того мали місце у нічні години доби, і забезпечити роботу цих енерго-

блоків уже у базовому режимі з кращими техніко-економічними та екологічними показниками.

Підняття мінімального рівня навантаження ДГЕН до позначки  $P_{\text{мін.3}}^*$  може забезпечити збільшення базової частини навантаження ДГЕН уже до 2 000 МВт. Це дасть змогу перевести у базовий режим експлуатації до 30 маневрених енергоблоків ТЕС. Потрібно врахувати, що на зазначених 30 енергоблоках ТЕС утримується резерв маневрених генеруючих потужностей до 1 000 МВт, який у цьому разі стане можливим застосувати вже за іншим призначенням, наприклад для створення нормованого первинного резерву.

Однак для ОЕСУ більш доцільним буде використовувати саме вторинний резерв потужностей, розрахунковий діапазон регулювання потужностей якого повинен передбачати можливість компенсації найбільш вірогідної аварійної втрати генерації або споживання (АВРЧП) і має становити 1 500 МВт (на завантаження дорівнює 1000 МВт і на розвантаження – 500 МВт) [1, с. 37; 7, п. 5.4.3.3]. Найбільш перспективним напрямом у вирішенні проблеми створення нового резерву потужностей системи АВРЧП може стати введення до 500 (або 1 000) МВт потужностей автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ-1 у постійний режим навантаження ОЕСУ, як це умовно показано на рис. 2а. При цьому передбачається, що в системі АВРЧП у режимі розвантаження ОЕСУ будуть використані потужності комплексів ЕТГ-2, а у режимі її завантаження – інші 1 000 МВт потужностей, які забезпечуються комплексам ЕТГ-1.

Використання у комплексах ЕТГ потужних електричних котлів, наприклад шведської фірми Zeta, швидкість набору потужності від мінімального до номінального значення яких становитиме не більше 2 хвилин [8], надасть можливості системі АВРЧП виконувати процеси усунення аварійної ситуації в ОЕСУ набагато швидше й ефективніше, ніж у разі застосування енергоблоків ТЕС для цього резервування. Окрім того, у процесі регулювання режиму стане можливим (частково) усунути й пікові навантаження ДГЕН, як це умовно зображено на рис. 2б.

Нині в ОЕСУ використовується САРЧП SCADA/AGC (Supervisory Control And Data Acquisition/Automatic

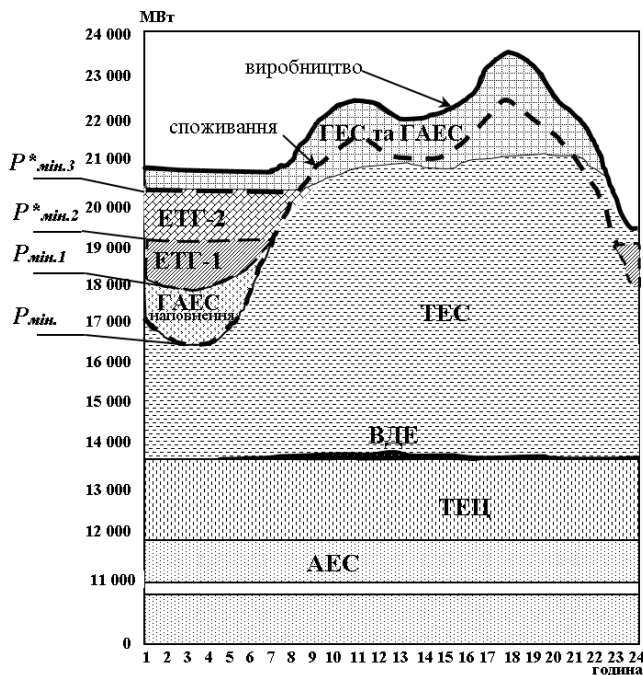


Рис. 1. Добовий графік виробництва/споживання електроенергії ОЕС України за 14.02.2017 та запропоноване використання комплексів ЕТГ для збільшення мінімального рівня  $P_{\text{мін}}$  навантаження ДГЕН

generation control), яка призначена для регулювання сальдо перетоків активної потужності на міждержавних лінях електропередачі за паралельної роботи ОЕСУ з енергосистемами сусідніх держав, а також для регулювання частоти в умовах її ізольованої роботи шляхом автоматичної зміни генерації регулювальних станцій, які беруть участь у вторинному регулюванні частоти. Система має центральний регулятор (SCADA/AGC), установлений у Державному підприємстві «Національна енергетична компанія «Укренерго» ОЕСУ (без Бурштинського енергетичного «острова»). Керуючі дії від центрального регулятора передаються до диспетчерської системи регулювання ГЕС, де приймаються і обробляються системами станційного керування Centralog і на станційному рівні розподіляються між гідроагрегатами (ГА) ГЕС [9, с. 81].

За умови використання автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ у вторинному резерві потужностей САРЧП останній матиме вже два складники:

$$P_{\Sigma \text{РЕЗ.АРЧП}} = \sum_{j=1}^n \Delta P_{j \text{ГА(ГЕС)}} + \sum_{i=1}^m \Delta P_{i \text{ЕТГ(ТЕЦ)}} \quad (1)$$

де  $j, n$  та  $i, m$  – порядковий номер та кількість задіяних у вторинному резерві агрегатів ГА (ГЕС) і комплексів ЕТГ (ТЕЦ) відповідно.

Структурну систему модернізованої САРЧП ОЕСУ із залученням до її резерву потужностей

автоматично керованого навантаження  $P_{\text{ЕТГ(ТЕЦ)}}$  комплексів ЕТГ наведено на рис. 3.

Згідно з приведеною структурою, системний регулятор САРЧП здійснює регулювання за змінами частоти та активної потужності [9, с. 82]:

$$R = \varepsilon_1 \Delta P_{\text{СД.ПЕР}} + \varepsilon_2 K_{\text{ч}} \Delta f, \quad (2)$$

де  $R$  – системний параметр;  $K_{\text{ч}}$  – коефіцієнт коригування перетоку за частотою;  $\Delta f$  – відхилення частоти;  $\Delta P_{\text{СД.ПЕР}}$  – сальдо перетоків активної потужності. Коефіцієнти  $\varepsilon_1$  та  $\varepsilon_2$  визначають режими регулювання:  $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 1$  – режим автоматичного регулювання перетоку з коригуванням за частотою (АРПЧ);  $\varepsilon_1 = 1; \varepsilon_2 = 0$  – режим автоматичного регулювання перетоку (АРП);  $\varepsilon_1 = 0; \varepsilon_2 = 1$  – режим автоматичного регулювання частоти (АРЧ).

Системний параметр  $R^*$  корегується з урахуванням похибки регулювання (ПРО) тієї чи іншої області. Значення  $R^*$  подається на вхід системного пропорційно-інтегрального (ПІ) регулятора (рис. 3). Застосування ПІ – регулятора забезпечує задану швидкість регулювання, а блок розподілу позапланових завдань (БРПЗ) здійснюватиме розподіл позапланового завдання між ГА регулюючих ГЕС ( $P_{\text{ПЗПЛ1}}, P_{\text{ПЗПЛ2}} \dots P_{\text{ПЗПЛ}i}$ ) і комплексами ЕТГ ( $P^*_{\text{ПЗПЛ1}}, P^*_{\text{ПЗПЛ2}} \dots P^*_{\text{ПЗПЛ}i}$ ), технологічно задіяними на ТЕЦ та потужних котельнях СЦТ (рис. 3), з урахуванням вагового коефіцієнту їхнього впливу.

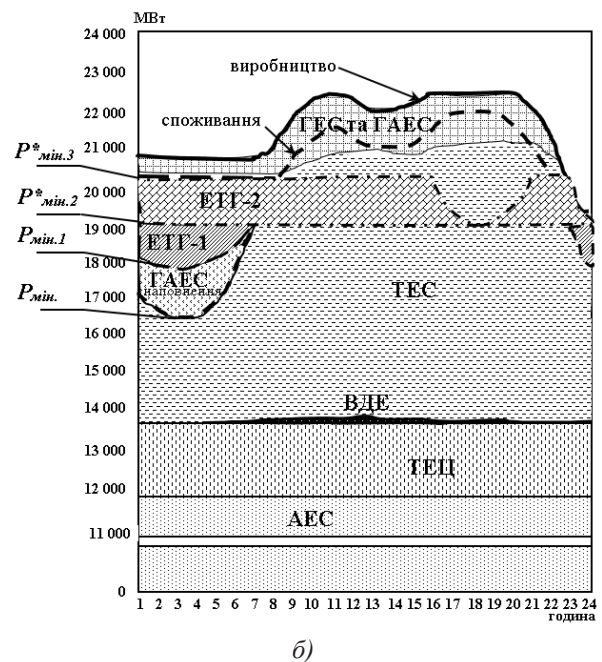
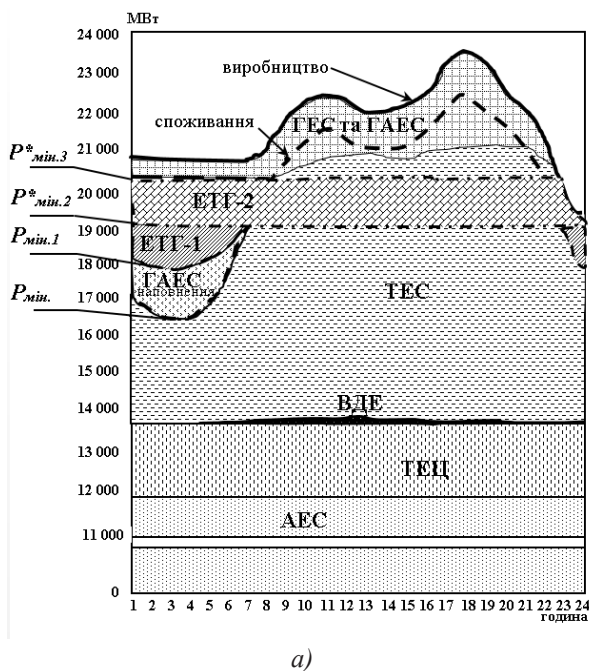


Рис. 2. Добовий графік виробництва/споживання електроенергії ОЕС України за 14.02.2017, на якому умовно показано, як автоматично кероване навантаження комплексів ЕТГ ( ЕТГ-1 та ЕТГ-2): а) забезпечує постійне навантаження у ДГЕН протягом усієї доби; б) сприяє усуненню пікових навантажень ДГЕН

Якщо у подальшому кожний добовий графік виробництва/споживання електроенергії ОЕСУ буде ущільнений автоматично керованими навантаженнями комплексів ЕТГ-1 і ЕТГ-2 (рис. 2а), тоді резерву потужностей, утвореного на цих комплексах, буде достатньо для забезпечення нормативного (бездефіцитного) виконання процесів первинного і вторинного регулювання у системах АРЧП і АВРЧП, як це показано на рис. 4.

Структурну схему нової системи виконання завдань первинного, вторинного і третинного регулювання в ОЕСУ із застосуванням автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ наведено на рис. 4.

Згідно з рис. 4, команди АСДУ ОЕСУ ( $\pm \Delta P$ ) надходитимуть у диспетчерські центри стан-

цій ТЕЦ для виконання автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ:

- команд первинного регулювання частоти (за рахунок використання системи АВРЧП);
- процесів вторинного регулювання системи АРЧП;
- процесів третинного регулювання (за ущільнення ДГЕН).

Економічну ефективність роботи модернізованої АСДУ за рахунок введення до процесів управління режимом роботи ОЕСУ автоматично керованого навантаження визначимо виходячи з того, що після ущільнення ДГЕН більшість маневрених енергоблоків ТЕС буде переведено у базовий режим навантаження. Найбільш важливим аргументом у визначенні економічної доцільності

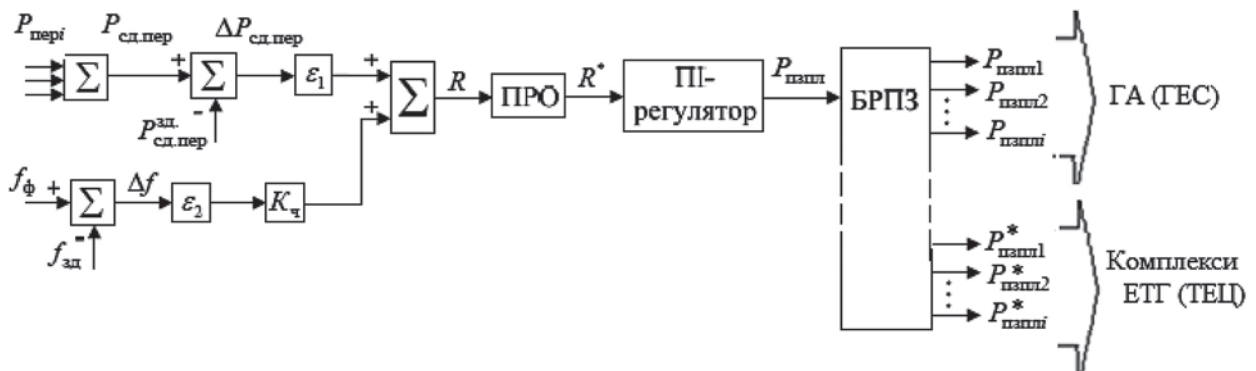


Рис. 3. Модернізована структура САРЧП ОЕС України за умов використання у вторинному резерві потужностей автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ

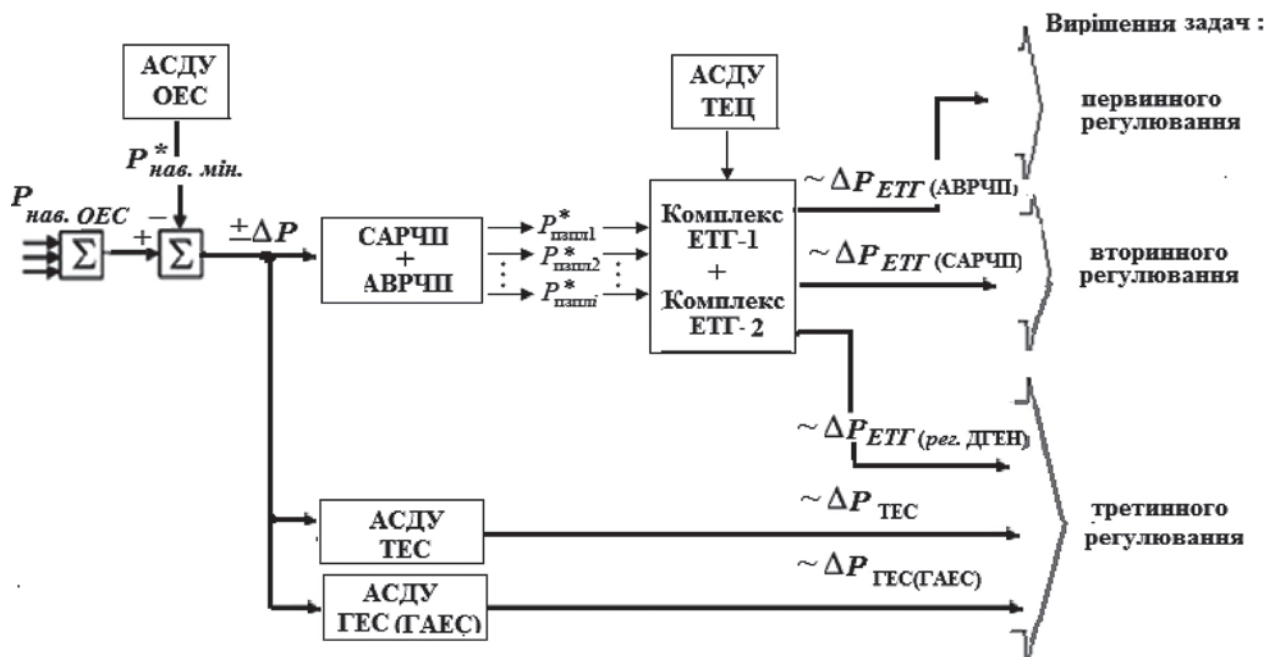


Рис. 4. Структурна схема реалізації процесів первинного, вторинного і третинного регулювання за використання систем АВРЧП і АРЧП і в ОЕС України із застосуванням комплексів ЕТГ

проведення ущільнення ДГЕН є те, що, згідно зі статистичними даними, енергоблоки ТЕС, які працюють у маневреному режимі навантаження, майже у два рази частіше аварійно виходять із ладу і потребують проведення додаткових капітальних ремонтів та ліквідації аварійних ситуацій. У табл. 1 приведено питомі показники витрат на відповідні види ремонтів енергоблоків одиначною електричною потужністю 200 МВт та 300 МВт [10, с. 27].

Таблиця 1

**Витрати на ремонт енергоблоків ТЕС  
потужністю 200 МВт та 300 МВт**

| № п/п | Статі витрат  | Витрати, дол. США/кВт |
|-------|---|-----------------------|
| 1     | Питомі витрати на поточний ремонт                       | 3,4                   |
| 2     | Питомі витрати на капітальний ремонт                    | 130 – 303             |
| 3     | Середні питомі витрати на ліквідацію аварійних ситуацій | 420 – 390             |

Для забезпечення проходження осінньо-зимового максимуму 2019–2020 рр. станом на 31.12.2019 відповідно до затвердженого графіка на теплових електростанціях (ТЕС) енергогенеруючих компаній відремонтовано 49 енергоблоків загальною електричною потужністю 11 800 МВт, а саме [11, с. 11]:

- поточним ремонтом – 37 енергоблоків (8800 МВт);
- середнім ремонтом – 6 енергоблоків (1515 МВт);
- капітальним ремонтом – 6 енергоблоків (1485 МВт).

Наведена статистика проведення ремонтних кампаній є ідентичною і до найближчих попередніх років. При цьому більша частина капітальних ремонтів припадає саме на маневрені енергоблоки ТЕС, які диспетчери теплових станцій вимушено тимчасово зупиняли через провал навантаження ДГЕН у нічні години доби.

За вартості капітального ремонту енергоблоку 300 дол. США/кВт (табл. 1) загальна сума витрат ТЕС на проведення капітального ремонту шести маневрених енергоблоків одиначною потужністю 250 МВт становитиме  $C_{\text{кап. ремонту}} \approx 450$  млн дол. США. Якщо мінімальний рівень навантаження ДГЕН підняти до позначки  $P_{\text{мін.2}}^*$  (рис. 1), стане цілком можливим перевести шість маневрених енергоблоків ТЕС у базовий режим навантаження. У цьому разі

річні витрати на утримання цих енергоблоків у робочому стані визначимо за показниками поточного (планового) ремонтів, тобто усього  $C_{\text{ремонт}} \approx 51,6$  млн дол. США.

Для розрахунку річних витрат палива 10 енергоблоків ТЕС одиначною електричною потужністю 150 МВт кожний, що працювали у маневреному режимі, а після ущільнення ДГЕН повинні були переведені у базовий режим навантаження, приведемо дані щодо питомих витрат умовного палива цих енергоблоків. Так, у 2019 р. за базового режиму роботи енергоблоків ТЕС потужністю 150 (250) МВт середні питомі витрати їх умовного палива становили: 404,43 г у.п./кВт·год), а у маневреному режимі: 424,43 г у.п./кВт·год [12, с. 1].

За приведених даних річні витрати умовного палива  $V_{\text{пал}}$  для 10 енергоблоків ТЕС одиначною електричною потужністю 150 МВт за рік роботи у базовому режимі навантаження (8 760 повних операційних годин на рік) становитимуть:

$$V_{\text{пал.}} = 0,404 \times (8760 \times 150 \times 10) = 5308,5 \text{ т у.п./рік,}$$

а у маневреному режимі (7 300 повних операційних годин на рік):

$$V_{\text{пал.}} = 0,424 \times (7300 \times 150 \times 10) = 4642,8 \text{ т у.п./рік,}$$

Процеси включення (пуску зі стану резервування) таких 10 енергоблоків ТЕС у роботу потребуватимуть додаткових витрат палива, котрі можна оцінити з урахуванням збільшення приросту питомих витрат палива протягом до чотирьох годин пускових операцій щоденно на 21 г у.п./кВт·год [12, с.1], тобто:

$$V_{\text{пал.}} = 0,445 \times (365 \times 4 \times 150 \times 10) = 974,5 \text{ т у.п./рік.}$$

У табл. 2 наведено порівняльні показники середніх річних витрат на експлуатацію 10 енергоблоків ТЕС за умов роботи у маневреному і базовому режимах навантаження.

Під час переведення розрахункових показників умовного палива на енергетичне вугілля, спожите енергоблоками ТЕС, застосовано вартісний коефіцієнт:  $K_{\text{ц}} = 2535$  грн./т вугілля [13].

Таким чином, за встановлення мінімального рівня навантаження ДГЕН на новому, більш високому значенні  $P_{\text{мін.2}}^*$  (рис. 1) річні витрати ТЕС на експлуатацію 10 енергоблоків буде зменшено практично вдвічі.

У разі якщо внаслідок використання комплексів ЕТГ збільшити мінімальний рівень навантаження ДГЕН до позначки  $P_{\text{мін.3}}^*$  (рис. 1), стане можливим додатково перевести у базовий режим

навантаження вже до 30 маневрених енергоблоків ТЕС одиничною електричною потужністю 200 МВт та 300 МВт (під час розрахунків прийнято середню одиничну потужність 250 МВт). Річні витрати умовного палива цих 30 енергоблоків за роботи у маневреному режимі навантаження становитимуть:

$$B_{нал.} = 0,424 \times (8760 \times 250 \times 30) = 27856,8 \text{ тис. т у.п./рік,}$$

а за їх роботи у базовому режимі навантаження:

$$B_{нал.} = 0,404 \times (8760 \times 250 \times 30) = 26542,8 \text{ тис. т у.п./рік.}$$

Тільки різниця у витраті палива між маневреним і базовим режимами навантаження цих 30 енергоблоків ТЕС протягом одного року становитиме: 1314 тис т у.п./рік, тобто 3,33 млрд грн/рік.

За встановлення мінімального рівня навантаження ДГЕН на позначці  $P^*_{МН.3}$  стане можливим використати маневрені генеруючі потужності

вже 30 енергоблоків ТЕС за іншим призначенням, наприклад для формування нормованого первинного резерву.

Створений, таким чином, бездефіцитний вторинний резерв матиме суттєві технічні переваги, передусім у швидкості реалізації процесів управління АВРЧП, а також економічні переваги внаслідок усунення потреби у використанні 30 енергоблоків ТЕС одиничною потужністю 200 МВт та 300 МВт. За наведеними вище розрахунками за виведення з експлуатації цих 30 енергоблоків ТЕС унаслідок зменшення витрат вугілля стане можливою річна економія палива:  $B_{нал.} = 27856,8$  тис т у.п./рік, що надасть можливість отримати позитивний економічний ефект до 70,61 млрд грн (або 2,52 млрд дол. США).

Результати проведених розрахунків показників економічної ефективності використання комплексів ЕТГ у складі діючих засобів управління АСДУ ОЕСУ наведено у підсумковій табл. 3.

Таблиця 2

**Порівняльні щорічні показники поточних витрат палива 10 блоків ТЕС в умовах їхньої роботи у маневреному, а після ущільнення ДГЕН – у базовому режимі навантаження**

| Параметр   | Щорічні витрати палива 10 блоків ТЕС у маневреному режимі навантаження |                         | Щорічні витрати палива 10 блоків ТЕС після ущільнення ДГЕН та їх роботи у базовому режимі навантаження |                         |
|--|--|-------------------------|--|-------------------------|
|  | Значення   | Сума платежів, млрд грн | Значення   | Сума платежів, млрд грн |
| Середні питомі витрати палива, г у.п./кВтгод             | 424,43   | ---                     | 404,43   | ---                     |
| Споживання вугілля: в режимі навантаження                | 4642,8   | 11,77                   | 5308,5   | 13,457                  |
| пускові витрати блоків тис. т.                           | 974,5  | 2,47                    | ---  | ---                     |
| Вартість капітальних та ін. ремонтів, ( $C_{ремонту}$ ). | ---  | 12,6                    | ---  | 1,444                   |
| Сумарні витрати  | ---  | 26,84                   | ---  | 14,9                    |

Таблиця 3

**Результати розрахунків економічної ефективності використання комплексів ЕТГ у складі діючих засобів управління АСДУ ОЕС України**

| № п/п                               | Використання автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ у діючих засобах АСДУ і АВРЧП             | Показники енергетичної ефективності проєкту                                       | Показники економічної ефективності проєкту, |               |
|-------------------------------------|---|---|---|---------------|
|                                     |   |   | млрд грн                                    | млрд дол. США |
| 1                                   | Проєкт реалізації та встановлення мінімального рівня навантаження ДГЕН на позначці $P^*_{МН.2}$ (рис. 1). | Переведення 10 маневрених енергоблоків ТЕС у базовий режим навантаження (табл.2). | 15,02                                       | 0,54          |
| 2                                   | Проєкт реалізації та встановлення мінімального рівня навантаження ДГЕН на позначці $P^*_{МН.3}$ (рис. 1). | Переведення 30 маневрених енергоблоків ТЕС у базовий режим навантаження.          | 3,33  | 0,14          |
| 3                                   | Проєкт створення заданих нормативних величин резерву потужностей системи АВРЧП                            | Створення в ОЕСУ вторинного резерву за нормативами системи АВРЧП                  | 70,61                                       | 2,52          |
| Щорічний прибуток (економія витрат) |   |   | 88,96                                       | 3,2           |



Результати попередньо проведених розрахунків необхідних капіталовкладень для впровадження комплексу ЕТГ загальною потужністю 500 МВт сьогодні становитимуть 3,16 млрд грн [5]. При цьому враховувалося, що питомі капітальні витрати на впровадження потужних електричних котлів комплексу ЕТГ становитимуть від 320 до 340 дол. США/кВт встановленої електричної потужності, що споживається електричними котлами для виробництва теплової енергії.

Слід зауважити, що технологічне використання електричних котлів комплексів ЕТГ у СЦТ для обігріву помешкань будівель та гарячого водопостачання цілком може покрити витрати на виробництво теплової енергії.

**Висновки.** У статті розглянуто принципово новий підхід до вирішення актуального питання щодо усунення в Об'єднаній енергосистемі України існуючого дефіциту маневрених потужностей. За цим підходом пропонується залучити у засоби автоматизованої системи диспетчерського управління (АСДУ) ТЕЦ потужні комплекси електричних теплогенераторів (ЕТГ). Саме завдяки тому,

що навантаження комплексів ЕТГ буде автоматично кероване системою АСДУ, стане можливим:

- здійснити ущільнення добового графіку навантаження;
- сформувати за встановленими нормативами резерви маневрених потужностей;
- створити інноваційну технологічну інфраструктуру виконання процесів первинного, вторинного і третинного регулювання.

Важливо, що на відміну від резерву потужностей ГЕС, термін дії яких обмежений у часі і залежить від наявності гідроресурсів, які додатково подають на гідроагрегати у разі потреби, резерв автоматично керованого навантаження комплексів ЕТГ не матиме таких обмежень.

Унаслідок реалізації цього інноваційного рішення може бути досягнута щорічна економія палива щонайменше 4,268 млн т у.п. (або 2,987 млн т н.е.).

Результати проведених розрахунків економічної ефективності використання комплексів ЕТГ у складі діючих засобів управління АСДУ ОЕС України показали можливість отримати щорічний прибуток до 3,2 млрд дол. США.

#### Список літератури:

1. План розвитку об'єднаної енергосистеми України на 2017–2026 pp. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2016/12/Projekt-Planu-rozvytku-OES-Ukrayiny-na-2017-2026-roky.pdf>.
2. «Укренерго». План розвитку системи передачі на 2020–2029 роки. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2019/11/Plan-rozvytku-systemy-peredachi-na-2020-2029-roky-.pdf>.
3. Кулик М.М., Кириленко О.В. Стан та перспективи гідроенергетики України. *Технічна електродинаміка*. 2019. № 4. С. 56–64. DOI: <https://doi.org/10.15407/techned2019.04.056>.
4. Кулик М.М. Техніко-економічні аспекти використання споживачів-регуляторів у системах автоматичного регулювання частотою і потужністю. *Проблеми загальної енергетики*. 2015. Вип. 1(40). С. 20–28.
5. Ленчевський Є.А. Автоматизоване керування потужними електродвигунами як дієвий засіб зниження нерівномірності добових графіків електричних навантажень Об'єднаної енергосистеми. *Проблеми загальної енергетики*. 2016. Вип. 4(47). С. 50–57.
6. Ленчевський Є.А. Особливості використання електричних теплогенераторів у процесах ущільнення добових графіків електричного навантаження енергосистеми. *Проблеми загальної енергетики*. 2019. Вип. 1(56). С. 53–58. DOI: <https://doi.org/10.15407/pge2019.01.053>.
7. СОУ-Н ЕЕ ЯЕК 04.1546:2009 «Основні вимоги щодо регулювання частоти та потужності в ОЕС України (п. 5.4.3.3).
8. Електродвигуни шведської фірми Zeta. URL: <http://zeta.se/boilers/en/projects/sweden/>.
9. Яндутьський О.С., Лукаш М.П., Стелюк А.О. Вибір системного регулятора для автоматичного регулювання частоти та активної потужності. *Енергетика та електротехніка. Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2011. № 6. С. 81–84.
10. Текущий ремонт энергоблока 300 МВт ст. № 7. URL: [http://www.b2b-enter.ru/market/view\\_tender.html?id=16695](http://www.b2b-enter.ru/market/view_tender.html?id=16695).
11. Про основні показники роботи паливно-енергетичного комплексу України за 2019 рік. Київ : Енергоінформ, 2020. № 577. 54 с.
12. Разумний Ю.Т., Рухлов А.В. Про проблему використання маневрених джерел енергії. URL: <https://vde.nmu.org.ua/ua/science/ntz/archive/82/2.pdf>.
13. Міністерство енергетики та вугільної промисловості підняло ціну на вугілля. URL: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/2435632-minenergo-pidnyalo-cinu-na-vugilla.html>.

**Lenchevskiy Ye.A., Teslenko O.I. THE PERSPECTIVE POSSIBILITY TO INCREASE THE OVERALL POTENTIAL OF MANEUVERING CAPACITY OF THE INTEGRATED POWER SYSTEM OF UKRAINE**

*Today, increasing the flexibility and reliability of electricity generation systems is an extremely important issue for the Integrated Power System of Ukraine. The perspective direction of the decision of a problem of creation of deficit-free reserves of maneuvering capacities for performance of processes of primary, secondary and tertiary regulation of frequency and power is considered in this article. It is proposed to use automatically controlled load (electric power consumption) of electric heat generator complexes (EHG) in the means of automated control system of CHPs. These EHG complexes will become an integral part of CHPs and powerful boilers of district heating systems. The results of our study demonstrate the high energy and economic efficiency of the use of automatically controlled loading of EHG complexes in the means of compaction of the daily schedule of electrical load of the Integrated Power System of Ukraine. The introduction of the first EHG complex with a total electrical capacity of 500 MW will allow to transform 10 maneuverable power units with a total capacity of 1500 MW into the basic mode of operation. Additional introduction of the second complex of EHG with a total electric capacity of 1000 MW will allow to transform 30 maneuverable power units (rotating reserve) more with a total capacity of 7500 MW into the basic mode of operation.*

*The implementation of this innovative technological solution can provide annual fuel savings of at least 2.987 million tons oil eq. The results of ours calculations of the economic efficiency of the use of EHG complexes as part of the existing operated control systems of the Integrated Power System of Ukraine showed the possibility of obtaining an annual profit of up to \$ 3.2 billion. The use of EHG systems can significantly increase the overall maneuverability of the Integrated Power System of Ukraine.*

**Key words:** *Integrated Power System of Ukraine, automated control system, daily schedule of electric load, maneuverability, electric heat generators, district heating system.*

УДК 536.423.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/31>**Лю Ян**

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

**Швець Н.О.**

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

**Середа В.В.**

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

## РЕЖИМИ ТЕЧІЇ ДВОФАЗНОГО ПОТОКУ В ГОРИЗОНТАЛЬНИХ ТРУБКАХ КОМПАКТНИХ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ

*У роботі проведено огляд наявних карт режимів течії двофазного потоку всередині гладких горизонтальних труб компактних конденсаторів.*

*Зауважено, що сучасні карти режимів із різних наукових праць мають неузгодженість між собою у визначенні меж режимів, що ускладнює ідентифікацію режимів течії, особливо у разі конденсації у трубках малого діаметру ( $d_h = 2-6$  мм).*

*Виконано порівняльне оцінювання сучасних карт режимів для випадків конденсації у горизонтальній трубці з гідравлічним діаметром  $d_h = 5$  мм двох перспективних холодоагентів: вуглекислого газу (температура конденсації  $t_s = 0$  °С, масова швидкість на вході у трубку  $G = 300$  кг/(м<sup>2</sup>·с), тепловий потік  $q = 10$  кВт/м<sup>2</sup>) та фреону R1234yf ( $t_s = 30$  °С,  $G = 200$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q = 10$  кВт/м<sup>2</sup>). Відзначено, що для конденсації вуглекислого газу найбільша похибка (до 88%) виникає під час визначення протяжності ділянки труби з кільцевим режимом. Для конденсації фреону R1234yf найбільша похибка (до 66%) наявна під час визначення меж ділянки зі стратифікованим режимом течії фаз.*

*Розглянуто вплив режимів течії на змінювання значень коефіцієнтів тепловіддачі по довжині трубки. У разі конденсації фреону R1234yf та вуглекислого газу похибка у розрахунку зміни коефіцієнтів тепловіддачі по довжині трубки становить 40%.*

*Запропоновано метод визначення режимів течії двофазного потоку, який ураховує вплив сил притягання і тертя на зміну меж режимів. Показано зміну режимів течії для конденсації холодоагентів R410a, R407c, R134a, R32, R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z) та R744. Зауважено, що на більшій частині горизонтальної трубки присутні проміжний та стратифікований режими течії фаз. Сформульовано рекомендації для розрахунку тепловіддачі під час конденсації у горизонтальних трубках малого діаметру ( $d_h = 2-6$  мм), які дадуть змогу уникнути значних похибок під час проектування компактних конденсаторів.*

**Ключові слова:** двофазний потік, компактний теплообмінник, конденсація, режим течії, тепловіддача.

**Постановка проблеми.** У розвинених країнах та у країнах, що розвиваються, потреба у кондиціонуванні повітря зростає разом із поліпшенням рівня життя, що призводить до збільшення енергетичних потреб цих країн. Підвищений попит на енергію у побутових цілях вимагає інноваційних інженерних рішень під час проектування систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC-систем). Нині науковці та проектувальники спрямовують значну увагу на зменшення споживання електричної енергії кондиціонерами та повітряними тепловими

насосами. Упровадження сучасних енергоощадних рішень дає змогу знизити витрати викопного палива та розв'язати низку екологічних проблем. На зниження споживання електричної енергії HVAC-системами суттєво впливає будь-яке підвищення теплопередачі та зменшення перепадів тиску в теплообмінному обладнанні. Застосування енергоефективних теплообмінників дає змогу підвищити ефективність HVAC-систем та зменшити викиди парникових газів [1].

Одним із методів інтенсифікації теплообміну та зниження втрат тиску в теплообмінних апаратах

є зменшення їхніх геометричних розмірів. Саме компактні теплообмінники все більше використовують у сучасних HVAC-системах. Відповідно до праці [2], компактними називають теплообмінники з гідравлічним діаметром трубок  $d_h = 2-6$  мм. Такі апарати мають низку переваг порівняно зі звичайними, зокрема менші габаритні розміри та вагу, більшу ефективність і міцність, потребують меншої кількості холодоагенту. У разі використання компактних випарників або конденсаторів у складі HVAC-систем або теплових насосів двофазна течія холодоагенту проходить усередині горизонтальних трубок, її структура впливає на теплопередачу, гідродинаміку і режим роботи. З огляду на це, для інтенсифікації теплообміну та моделювання роботи таких апаратів необхідно знати режими течії двофазного потоку.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час конденсації в горизонтальних трубках можуть виникати три різні режими течії конденсату та пари (рис. 1). Розподіл режимів по довжині трубки залежить від фізичних властивостей холодоагенту, діаметра трубки, швидкості пари й теплового потоку.

На вході у трубку відбувається кільцева течія фаз. Плівка конденсату тече ламінарно і має мінімальну товщину. За великої швидкості пари можливе віднесення конденсату в потік пари, і на початку трубки виникає дисперсний режим. За зменшення швидкості пари на стінці трубки утворюється більше рідини, товщина плівки збільшується і відбувається перехід від ламінарної течії конденсату до турбулентної.

На певній відстані від входу в трубку розпочинається асиметрична течія конденсату. Плівка рідини під дією сили притягання стікає вниз під певним кутом до горизонту. У нижній частині трубки виникає турбулентна течія конденсату, тоді як у верхній частині – ламінарна. У такому разі відбувається проміжна, або напівкільцева, течія фаз.

Коли вплив сили притягання на плівку конденсату перевищуватиме вплив сили міжфазного тертя (за низьких значень паровмісту), виникає розшарована (стратифікована) течія фаз. У цьому разі у верхній частині трубки конденсат стікає під кутом близько  $90^\circ$  до горизонту, тоді як у нижній частині рідина тече у вигляді струмка за рахунок градієнта статичного тиску. За низької швидкості пари цей режим спостерігається по всій довжині трубки.

Щоб визначити описані режими течії двофазного потоку в горизонтальних трубах компактних конденсаторів та випарників, використовують спеціальні карти або діаграми, відповідно до яких межі режимів залежать від діаметра трубки, масової витрати й фізичних властивостей холодоагенту. Найбільш поширені карти режимів опубліковано у наукових працях [4-20].

Нині нові діаграми, які з'являються у процесі дослідження двофазних потоків, є модифікаціями наявних карт. Автори нових карт уточнюють межі режимів або об'єднують подібні режими у групи, користуючись власними або наявними у відкритому доступі експериментальними даними. Наприклад, одна з найбільш поширених карт режимів [15] побудована на основі діаграми Тома і Ель Хаяла [14], яка є спрощеною версією карти режимів під час кипіння в горизонтальних трубах малого діаметра [13]. Своєю чергою, карта Каттана та ін. [13] є модифікацією діаграми Стейнера [11]. А вже у праці [20] Суліман та ін. намагаються поліпшити діаграму [14]. Аналогічно у карті режимів Кавалліні та ін. [16] взято за основу діаграму Сардеса та ін. [8], яка є модифікованою версією карти Тайтеля і Даклера [5].

Під час ідентифікації режимів течії з використанням згаданих діаграм з'являється проблема узгодження назв режимів. Це пов'язано з тим, що науковці використовують різні назви режимів течії та різні параметри, щоб визначити їхні межі. І якщо на одній карті певні режими об'єднано

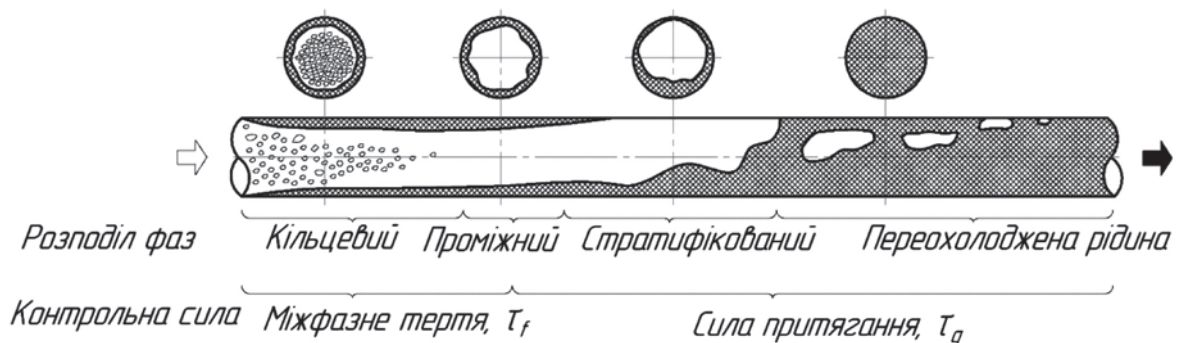


Рис. 1. Режими течії плівки конденсату та розподіл фаз по довжині трубки [3]

у групи, то на другій ці ж режими визначають окремо.

У праці [15] автори порівняли власну карту режимів із діаграмами [7-9; 10; 12; 16]. Показано досить точне узгодження нової карти з експериментальними дослідженнями конденсації різних холодоагентів.

У праці [18] описано карти режимів [5; 7-9; 12; 15-17] і проведено їх порівняння. Автори [18] звертають увагу на можливість варіанта, коли на одній ділянці труби виникають різні режими за одних і тих самих параметрів двофазного потоку (масової швидкості, тиску насичення). Це призводить до суб'єктивного оцінювання меж режимів, та один автор може класифікувати режим інакше, ніж другий. Отже, незважаючи на наявність значної кількості карт, неможливо вибрати найкращу для конкретного застосування. У праці [18] рекомендовано використовувати карту Ель Хаяла та ін. [14] як найбільш точну. Як альтернативу запропоновано просту карту Кавалліні [17], на якій виокремлено лише два режими: залежний і незалежний від  $\Delta t$  (різниці між температурами насичення пари холодоагенту та внутрішньої поверхні стінки труби). Використання такої діаграми не вимагає складних розрахунків для ідентифікації режимів течії.

**Постановка завдання.** Метою роботи є підвищення точності визначення режимів течії та розрахунку тепловіддачі під час конденсації у горизонтальних трубках компактних теплообмінників. Для досягнення мети розв'язуються такі наукові завдання:

– дослідження впливу режимів течії двофазного потоку на тепловіддачу;

– аналіз зміни режимів течії по довжині трубки під час конденсації різних перспективних холодоагентів;

– визначення методів розрахунку тепловіддачі, які найбільш точно описують конденсаційні процеси для різних режимів течії.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Порівняємо найбільш поширені карти режимів для конденсації екологічно чистого холодоагенту R1234yf у горизонтальній трубці компактного теплообмінника. За швидкості пари на вході у трубку  $w_v = 3,6$  м/с (рис. 2) похибка визначення кільцевого режиму досягає 46% (карти Кавалліні [17] і Тандона та ін. [10]), для інших режимів – до 66%.

Останнім часом як холодоагент у повітряних теплових насосах широко використовують вуглекислий газ. Розглянемо розподіл режимів течії під час конденсації вуглекислого газу в горизонтально-трубному повітряному конденсаторі (рис. 3). Похибка визначення кільцевого режиму досягає 88% (карти Бребера та ін. [7] і Сардесая та ін. [8]), для інших режимів – до 32%. Слід зауважити, що дисперсний режим наявний тільки на карті Тандона [10].

Проведений огляд дає змогу зробити висновок, що ідентифікувати режими течії за окремою діаграмою можна тільки для умов, на підставі яких була побудована діаграма. За інших параметрів (різних масових швидкостей, діаметрів трубок, холодоагентів і тисків насичення), використання різних діаграм даватиме суттєві розбіжності у визначенні меж режимів течії, що показано на рис. 2 та 3.

Вплив режимів течії на теплообмін показано на рис. 4 та 5. Наведено порівняльний розрахунок

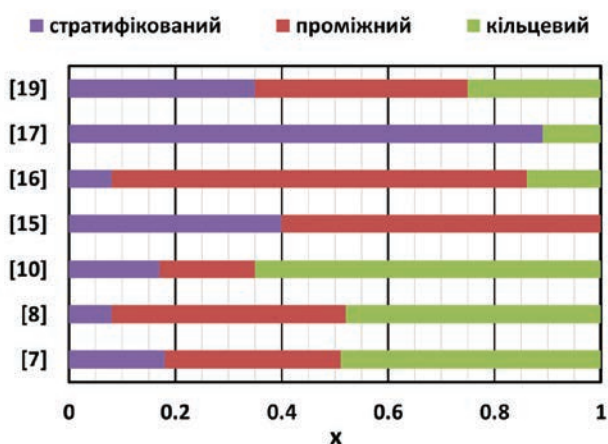


Рис. 2. Порівняння карт режимів для конденсації холодоагенту R1234yf із  $t_s = 30^\circ\text{C}$  у трубці  $d_h = 5$  мм за масової витрати  $G = 200$  кг/(м<sup>2</sup>·с)

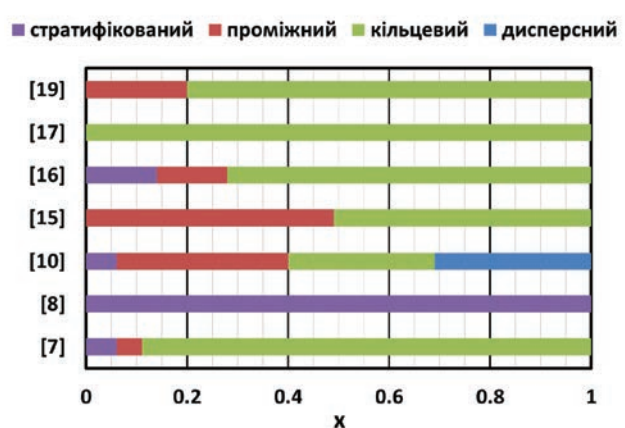


Рис. 3. Порівняння карт режимів для конденсації вуглекислого газу з  $t_s = 0^\circ\text{C}$  у трубці  $d_h = 5$  мм за масової витрати  $G = 300$  кг/(м<sup>2</sup>·с)

тепловіддачі за відомими залежностями із праць [21-24] для конденсації холодоагенту R1234yf (рис. 4) та вуглекислого газу (рис. 5) за тих самих параметрів, які використовували для побудови карт режимів на рис. 2 та 3.

У разі конденсації R1234yf перехід від проміжного до стратифікованого режиму відбувається за  $x = 0,2$  (рис. 4), а у разі конденсації вуглекислого газу – за  $x = 0,43$  (рис. 5). За змінювання цих режимів різниця у розрахункових значеннях коефіцієнтів тепловіддачі становить 40% (залежності [24] на рис. 4 та [22] на рис. 5). Якщо розраховувати за формулами [21] та [22], то тепловіддача не змінюється.

Аналогічно проаналізуємо змінювання кільцевого режиму на проміжний. У разі конденсації R1234yf (рис. 4) такий перехід відбувається за  $x = 0,7$  (розрахунок із праці [22]) або за  $x = 0,78$ , якщо використовувати методику [21], при цьому різниця у значеннях коефіцієнтів тепловіддачі становить 40%. Під час конденсації вуглекислого газу режими змінюються за  $x = 0,89$  (для формул із праці [21]). У такому разі різниця значень коефіцієнтів тепловіддачі для проміжного і кільцевого режимів досягає 40%. Якщо розраховувати за формулами [23] та [24], то тепловіддача не змінюється.

Отже, використання різних залежностей та неточне визначення протяжності ділянок із кільцевим, проміжним та стратифікованим режимами течії фаз призводитимуть до похибок у розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі більше ніж у два рази (рис. 4 та 5).

Експериментальні дослідження, проведені у праці [25], показали, що сьогодні неможливо точно визначити межі переходу як кільцевого режиму течії фаз у проміжний, так і проміжного у

стратифікований, незважаючи на наявність великої кількості карт режимів. Навіть незначна асиметричність течії конденсату у верхній частині труби приводитиме до змінювання хвильових і турбулентних характеристик плівки по периметру труби і впливатиме на розподіл локальних коефіцієнтів тепловіддачі й на змінювання дотичних напружень по висоті труби.

У цій роботі пропонуємо для визначення режимів течії під час конденсації у горизонтальних трубках компактних апаратів використовувати метод Ріферта та ін. [25]. Відповідно до цього методу, наявність чіткого кільцевого режиму течії визначають за залежністю (1) і можлива тільки за великих значень швидкості пари лише на незначній початковій ділянці труби:

$$\tau_f / \tau_g > 10. \quad (1)$$

Наявність стратифікованого режиму визначають за формулою

$$\tau_f / \tau_g < 1. \quad (2)$$

Відповідно, проміжний режим течії спостерігатиметься за

$$1 < \tau_f / \tau_g < 10. \quad (3)$$

У співвідношеннях (1)–(2) значення сил міжфазного тертя  $\tau_f$  і притягання  $\tau_g$  розраховують за формулами

$$\tau_f = C_f \rho_v w_v^2 / 2; \quad (4)$$

$$\tau_g = \rho_l g \delta, \quad (5)$$

де  $\rho_v$  та  $\rho_l$  – густина пари та рідини відповідно,  $\text{кг}/\text{м}^3$ ;  $w_v$  – швидкість пари,  $\text{м}/\text{с}$ ;  $g$  – прискорення вільного падіння,  $\text{м}/\text{с}^2$ .

Значення товщини плівки  $\delta$  визначають із рівняння

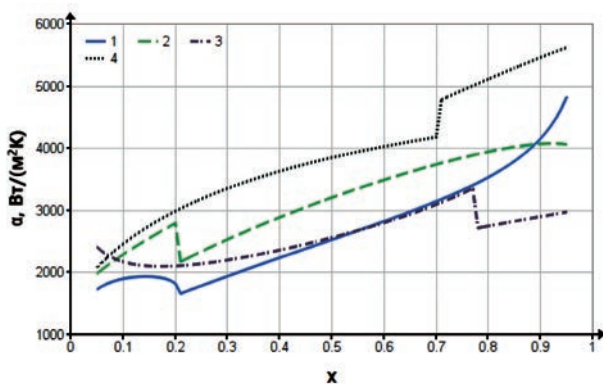


Рис. 4. Змінювання тепловіддачі по довжині трубки для конденсації холодоагенту R1234yf із  $t_s = 30^\circ\text{C}$  у трубці  $d_h = 5$  мм за масової витрати  $\dot{G} = 200$   $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  і теплового потоку  $q = 10$   $\text{кВт}/\text{м}^2$ : 1 – розрахунок за формулою з праці [23]; 2 – [24]; 3 – [21]; 4 – [22]

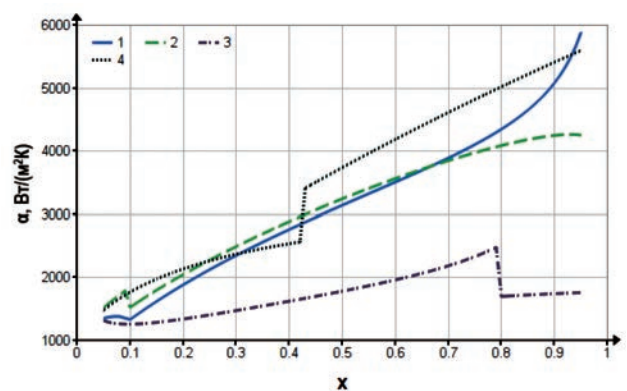


Рис. 5. Змінювання тепловіддачі по довжині трубки для конденсації вуглекислого газу з  $t_s = 0^\circ\text{C}$  у трубці  $d_h = 5$  мм за масової витрати  $\dot{G} = 300$   $\text{кг}/(\text{м}^2\cdot\text{с})$  і теплового потоку  $q = 10$   $\text{кВт}/\text{м}^2$ : 1 – розрахунок за формулою з праці [23]; 2 – [24]; 3 – [21]; 4 – [22]

$$\delta^+ = \delta/v_l (\tau_f/\rho_l)^{0.5}, \quad (6)$$

у якому безрозмірну товщину плівки  $\delta^+$  розраховують залежно від числа  $Re_l$  за формулами:

$$Re_l < 50, \quad \delta^+ = 0.7071 Re_l^{0.5}; \quad (7)$$

$$50 < Re_l \leq 1125, \quad \delta^+ = 0.4818 Re_l^{0.585}; \quad (8)$$

$$Re_l > 1125, \quad \delta^+ = 0.095 Re_l^{0.812}, \quad (9)$$

де  $Re_l$  – число Рейнольдса для рідини,  $Re_l = G(1-x)d_h/\mu_l$ ;  $G$  – масова швидкість пари на вході у трубку, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $v_l$  – коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини, м<sup>2</sup>/с;  $\mu_l$  – коефіцієнт динамічної в'язкості рідини, Па·с.

Коефіцієнт тертя двофазного потоку  $C_f$  у формулі (4) автори [25] пропонують визначати за співвідношенням (10), яке дає змогу врахувати вплив як двофазності течії (параметр  $\Phi_v^2$ ), так і теплового потоку (параметр  $\Phi_q$ ) на коефіцієнт тертя  $C_f$  і, відповідно, на силу міжфазного тертя  $\tau_f$ :

$$C_f = C_{fo} \Phi_v^2 \Phi_q, \quad (10)$$

де  $C_{fo}$  – коефіцієнт тертя для однофазного потоку,  $C_{fo} = 0.079/Re_v^{0.25}$  за  $Re_v < 10^5$  або  $C_{fo} = 0.046/Re_v^{0.2}$  за  $Re_v > 10^5$ ,  $Re_v$  – число Рейнольдса для пари,  $Re_v = Gx d_h/\mu_v$ ;  $\mu_v$  – коефіцієнт динамічної в'язкості пари, Па·с.

Параметри  $\Phi_v^2$  та  $\Phi_q$  визначають за такими рівняннями:

$$\Phi_v^2 = 1 + CX_n^n + X_n^2; \quad (11)$$

$$\Phi_q = 1 + 17.5 Re_v^{0.25} \frac{q}{h_{vl} G x}, \quad (12)$$

де  $X_n = (\mu_l/\mu_v)^{0.1} (\rho_v/\rho_l)^{0.5} [(1-x)/x]^{0.9}$ ;

$$C = 21 \left[ 1 - e^{(1-0.28Bo^{0.5})} \right] \left[ 1 - 0.9e^{-0.02Fr^{1.5}} \right],$$

$$n = 1 - 0.7e^{-0.08Fr}, \quad Fr = \frac{Gx}{\sqrt{gd_h \rho_v (\rho_l - \rho_v)}},$$

$$Bo = \frac{gd_h^2 (\rho_l - \rho_v)}{\sigma}, \quad \sigma - \text{коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; } h_{vl} - \text{питома теплота пароутворення, Дж/кг.}$$

На рис. 6 побудовано карту режимів для експериментальних даних, отриманих під час конденсації холодоагентів, які в останні роки набувають поширення в енергетиці (R410a, R407c, R134a, R32, R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z) та R744) із наукових праць [26-29]. У цих працях конденсацію досліджували за таких параметрів:  $d_h = 2-6$  мм,  $G = 50-1000$  кг/(м<sup>2</sup>·с),  $q = 0.5-30$  кВт/м<sup>2</sup>. На рис. 6 бачимо, що для компактних теплообмінників на більшій частині горизонтальної трубки спостерігається проміжний та розшарований режими течії фаз.

Щоб уникнути похибок та підвищити точність розрахунку, пропонуємо обчислювати тепловіддачу під час конденсації у горизонтальних трубках компактних теплообмінників за такою послідовністю. Спочатку потрібно визначити режими течії конденсаційного потоку за формулами (1)–(12). За кільцевого та проміжного режимів тепловіддачу доцільно розраховувати за формулами з наукових праць [17; 23-25]. Ці формули найкраще узгоджуються з великою кількістю експериментальних даних різних науковців, що продемонстровано у праці [30]. За наявності стратифікованого режиму рекомендуємо застосовувати формули з праць [12; 31; 32], ефективне використання яких доведено у праці [32].

**Висновки.** Проведений аналіз показав, що між сучасними картами режимів течії двофазного потоку в горизонтальних трубках є неузгодженість у визначенні меж режимів. Ця неузгодженість істотно впливає на значення коефіцієнтів

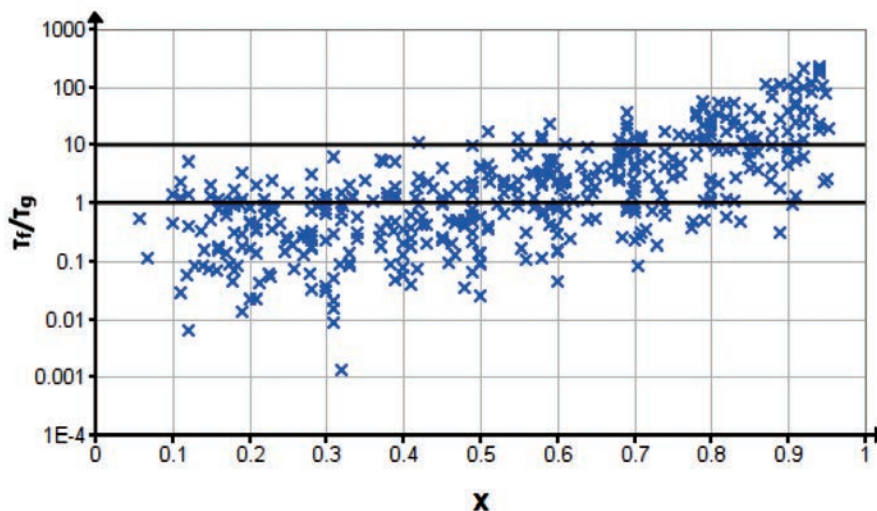


Рис. 6. Карта режимів для експериментальних даних із праць [26-29]

тепловіддачі, що призводить до значних похибок у разі порівняння наявних розрахункових залежностей із дослідними даними, отриманими під час конденсації різних холодоагентів.

Для визначення режимів течії двофазного потоку під час конденсації у горизонтальних трубках малих діаметрів ( $d_h = 2\text{--}6$  мм) запропоновано використовувати метод, який урахує вплив сил тяжіння і міжфазного тертя на змінювання меж режимів.

Для кільцевого та проміжного режимів течії фаз найкращу точність у розрахунку тепловіддачі забезпечують формули Кавалліні [17], Тома та ін. [23], Шаха [24] та Ріферта та ін. [25]. У разі стратифікованого режиму течії фаз тепловіддачу доцільно розраховувати за формулами Добсона та Чато [12], Кавалліні та ін. [31], Ріферта та ін. [32]. Саме ці залежності рекомендовано до використання під час проектування компактних конденсаторів.

#### Список літератури:

1. He S., Zhou X., Li F. et al. Heat and mass transfer performance of wet air flowing around circular and elliptic tube in plate fin heat exchangers for air cooling. *Heat Mass Transfer*. 2019. Vol. 55. P. 3661–3673. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02683-1>.
2. Mehendafe S.S., Jacobi A.M., Shah R.K. Fluid flow and heat transfer at micro- and meso-scales with application to heat exchanger design. *Applied Mechanics Reviews*. 2000. Vol. 53. № 7. P. 175–193. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3097347>.
3. Fukano T. Tubes, condensation in. *Thermopedia*. URL: <http://www.thermopedia.com/content/1214> (дата звернення: 12.04.2021).
4. Ackers W.W., Rosson H.F. Condensation inside a horizontal tube. *Chemical engineering progress symposium series*. 1960. Vol. 56. P. 145–149.
5. Taitel Y., Dukler A.E. A Model for predicting flow regime transition in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*. 1976. Vol. 22. P. 47–55.
6. Shah M.M. A general correlation for heat transfer during film condensation inside pipes. *International journal heat mass transfer*. 1979. Vol. 22. P. 547–556. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310\(79\)90058-9](http://dx.doi.org/10.1016/0017-9310(79)90058-9).
7. Бребер Г., Пейлен Д.В., Таборек Д. Расчет конденсации чистых компонентов на стенке горизонтальной трубы с помощью критериев режимов течения. *Теплопередача*. 1980. № 3. С. 93–100.
8. Sardesai R.G., Owen R.G., Pulling D.J. Flow regimes for condensation of a vapour inside a horizontal tube. *Chemical engineering science journal*. 1981. Vol. 36. P. 1173–1180. DOI: [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(81\)85065-8](https://doi.org/10.1016/0009-2509(81)85065-8).
9. Soliman H.M. On the annular-to-wavy flow pattern transition during condensation inside horizontal tubes. *The Canadian journal of chemical engineering*. 1982. Vol. 60. P. 475–481. DOI: <https://doi.org/10.1002/cjce.5450600405>.
10. Tandon T.N., Varma H.K., Gupta C.P. A new flow regimes map for condensation inside horizontal tubes. *Journal Heat Transfer*. 1982. Vol. 104. P. 763–768. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.3245197>.
11. Steiner D., Kind M. Flow patterns in evaporator tubes. *VDI Heat Atlas / Springer-Verlag Berlin Heidelberg*, 2010. P. 796–800.
12. Dobson M.K., Chato J.C. Condensation in smooth horizontal tubes. *Journal Heat Transfer*. 1998. Vol. 120. № 1. P. 193–213. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2830043>.
13. Kattan N., Thome J.R., Favrat D. Flow boiling in horizontal tubes: part 1 – development of diabatic two-phase flow pattern map. *Journal Heat Transfer*. 1998. Vol. 120. № 1. P. 140–147. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.2830037>.
14. Thome J.R., El Hajal J. Two-phase flow pattern map for evaporation in horizontal tubes: latest version. *Heat Transfer Engineering*. 2003. Vol. 24. № 6. P. 3–10. DOI: <https://doi.org/10.1080/714044410>.
15. El Hajal J., Thome J.R., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes. Part 1: two-phase flow pattern map. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. № 18. P. 3349–3363. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0017-9310\(03\)00139-X](https://doi.org/10.1016/S0017-9310(03)00139-X).
16. Cavallini A., Censi G., Del Col D. et al. Condensation inside and outside smooth and enhanced tubes – a review of recent research. *International Journal of Refrigeration*. 2003. Vol. 26. № 4. P. 373–392. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(02\)00150-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(02)00150-0).
17. Cavallini A., Del Col D., Doretti L. et al. Condensation of refrigerants in horizontal smooth tubes: a new heat transfer model for heat exchanger design. *Heat Transfer Engineering*. 2006. Vol. 27. № 8. P. 31–38. DOI: <https://doi.org/10.1080/01457630600793970>.
18. Van Rooyen E. Time-fractional analysis of flow patterns during refrigerant condensation. Department of Mechanical and Aeronautical Engineering University of Pretoria, 2007. 172 p. URL: <http://hdl.handle.net/2263/23246> (дата звернення: 13.04.2021).
19. Jassim E.W., Newell T.A., Chato J.C. Prediction of two-phase condensation in horizontal tubes using probabilistic flow regime maps. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2008. Vol. 51. № 3–4. P. 485–496. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2007.05.021>.
20. Suliman R., Liebenberg L., Meyer J.P. Improved flow pattern map for accurate prediction of heat transfer coefficients during condensation of R-134a in smooth horizontal tubes and within the low-mass



flux range. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2009. Vol. 52. № 25–26. P. 5701–5711. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2009.08.017>.

21. Singh A., Ohadi M., Dessiatoun S. Empirical modeling of stratified-wavy flow condensation heat transfer in smooth horizontal tubes. *ASHRAE transactions*. 1996. Vol. 102. P. 596–603.

22. Dobson M., Chato J. Condensation in smooth horizontal tubes. *Journal of Heat Transfer*. 1998. Vol. 120. № 1. P. 193–213. DOI: <https://10.1115/1.2830043>.

23. Thome J., El Hajal J., Cavallini A. Condensation in horizontal tubes, part 2: new heat transfer model based on flow regimes. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2003. Vol. 46. № 18. P. 3365–3387. DOI: [https://10.1016/S0017-9310\(03\)00140-6](https://10.1016/S0017-9310(03)00140-6).

24. Shah M. A new flow pattern based general correlation for heat transfer during condensation in horizontal tubes. *Proceedings of the 15th International Heat Transfer Conference*. 2014. Vol. 3. P. 671–685. DOI: <https://10.1615/IHTC15.cds.008645>.

25. Rifert V., Sereda V., Gorin V. et al. Restoration of correctness and improvement of a model for film condensation inside tubes. *Bulgarian Chemical Communications*. 2018. Vol. 50. P. 58–69.

26. Hirose M., Ichinose J., Inoue N. Development of the general correlation for condensation heat transfer and pressure drop inside horizontal 4 mm small-diameter smooth and microfin tubes. *International journal of refrigeration*. 2018. Vol. 90. P. 238–248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2018.04.014>.

27. Bashar M.K., Nakamura K., Kariya K. et al. Development of a correlation for pressure drop of two-phase flow inside horizontal small diameter smooth and microfin tubes. *International journal of refrigeration*. 2020. Vol. 119. P. 80–91. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2020.08.013>.

28. Cho J.M., Kim Y.J., Kim M.S. Experimental studies on the evaporative heat transfer and pressure drop of CO<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub>/propane mixtures flowing upward in smooth and micro-fin tubes with outer diameter of 5 mm for an inclination angle of 45°. *International Journal of Refrigeration*. 2010. Vol. 33. № 5. P. 922–931. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2010.02.002>.

29. Olivier J.A., Liebenberg L., Thome J.R. et al. Heat transfer, pressure drop, and flow pattern recognition during condensation inside smooth, helical micro-fin, and herringbone tubes. *International Journal of Refrigeration*. 2007. Vol. 30. № 4. P. 609–623. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2006.11.003>.

30. Rifert V.G., Sereda V.V., Gorin V.V. et al. Heat transfer during film condensation inside plain tubes. Review of experimental research. *Heat and mass transfer*. 2020. Vol. 56. № 3. P. 691–713. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-019-02636-8>.

31. Cavallini A., Censi G., Del Col D. et al. Experimental investigation on condensation heat transfer and pressure drop of new HFC refrigerants (R134a, R125, R32, R410A, R236ea) in a horizontal smooth tube. *International Journal of Refrigeration*. 2001. Vol. 24. № 1. P. 73–87. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0140-7007\(00\)00070-0](https://doi.org/10.1016/S0140-7007(00)00070-0).

32. Sereda V.V., Rifert V.G., Gorin V.V. et al. Heat transfer during film condensation inside horizontal tubes in stratified phase flow. *Heat and mass transfer*. 2021. Vol. 57. № 11. P. 251–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00231-020-02946-2>.

## Liu Yang, Shvets N.O., Sereda V.V. TWO-PHASE FLOW REGIMES IN HORIZONTAL TUBES OF COMPACT HEAT EXCHANGERS

*The paper reviews the available patterns of two-phase flow regimes in smooth horizontal tubes of compact condensers.*

*It is noted that modern regimes patterns from different scientific works have inconsistencies in defining the boundaries of regimes. This fact complicates the identification of two-phase flow regimes, especially in the case of condensation in tubes of small diameters ( $d_h = 2\text{--}6\text{ mm}$ ).*

*A comparative evaluation of modern regimes patterns was made for condensation in a horizontal tube with a hydraulic diameter  $d_h = 5\text{ mm}$  of two promising refrigerants: carbon dioxide (condensation temperature  $t_s = 0\text{ °C}$ , mass velocity at the inlet of the tube  $G = 300\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ , heat flux  $q = 10\text{ kW}/\text{m}^2$ ) and freon R1234yf ( $t_s = 30\text{ °C}$ ,  $G = 200\text{ kg}/(\text{m}^2\cdot\text{s})$ ,  $q = 10\text{ kW}/\text{m}^2$ ). It is noted that for the condensation of carbon dioxide, the maximum error (up to 88%) occurs when determining the length of the tube with an annular regime. For condensation of freon R1234yf, the maximum error (up to 66%) is available when determining the boundaries of the area with stratified phase flow.*

*The influence of two-phase flow regimes on the values of heat transfer coefficients along the tube length is considered. In the case of R1234yf and carbon dioxide condensation, the error in heat transfer coefficients calculating is 40%.*

*A method for determining the two-phase flow regimes is proposed. This method takes into account the influence of the gravitational and friction forces on the change of the regime boundaries. The changes of flow regimes is shown for condensation of refrigerants R410a, R407c, R134a, R32, R1234yf, R1234ze(E), R1234ze(Z) and R744. It is noted that intermediate and stratified regimes take place on the most part of the tube. It is given a recommendations for heat transfer prediction during condensation in horizontal tubes of small diameter ( $d_h = 2\text{--}6\text{ mm}$ ), which will avoid significant errors during design of compact condensers.*

**Key words:** two-phase flow, compact heat exchanger, condensation, flow regime, heat transfer.

**Огородник С.С.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Новаківський Є.В.**

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

**Швець М.Ю.**

ТЕЦ-6 СП «Київські ТЕЦ» КП «Київтеплоенерго»

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Мінаєва Ю.Ю.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНОГО КОЛЕКТОРА В ЗИМОВИЙ ПЕРІОД РОКУ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ**

*Стаття присвячена аналізу ефективності роботи сонячних колекторів в осінньо-зимовий період разом із додатковим баком накопичувачем та тепловим насосом.*

*У статті розглянуті основні фактори, що впливають на ефективність роботи сонячних колекторів. Запропонована схема роботи сонячних колекторів в зимовий період із підвищенням потенціалу теплоносія за рахунок теплового насосу для забезпечення потреб опалення або гарячого водопостачання.*

*Проведено аналіз ефективності та тепло сприйняття сонячних колекторів в осінньо-зимовий період від максимальної температури теплоносія та об'єму бака накопичувача, температури теплоносія після теплового насосу.*

*Визначено оптимальні питомі характеристики баку-накопичувача, температурний режим сонячних колекторів (в зимовий період), визначено оптимальний об'єм баку-накопичувача та витрата теплоносія на тепловий насос для зимового режиму роботи сонячних колекторів.*

*Проаналізовано COP теплового насосу для умов отримання гарячої води для фреонів, що представлені на ринку для подібного обладнання.*

*Отримано графічні залежності теплосприйняття системи сонячних колекторів та коефіцієнта корисної дії всієї системи залежно від об'єму бака накопичувача, температури живильної води після теплового насосу на вході в бак накопичувач, максимально можливої температури в баці накопичувачі.*

*Запропоновано принципову схему комплексної системи гарячого водопостачання (опалення) на базі плоских сонячних колекторів та теплового насосу з акумулятором тепла в холодну пору року, представлено роботу сонячних колекторів при зниженому температурному режимі сонячних колекторів зі збереженням отриманої теплоти в баку накопичувачі, з подальшим підняттям потенціалу теплоти за допомогою теплового насосу.*

*Визначені питомі характеристики теплового насосу, а саме потужність компресору, випаровувача та конденсатора та відповідні їх площі на 10 м<sup>2</sup> сонячного колектору, для різних регіонів України.*

**Ключові слова:** сонячний колектор, тепловий насос, комплексні системи, енергоефективність, відновлювальна енергетика.

**Постановка проблеми.** Основні проблеми використання відновлювальних джерел енергії – це змінність енергетичних потоків протягом доби, місяця, року та низька густина теплового потоку в порівнянні з традиційними джерелами, що вимагає значні капіталовкладення в обладнання.

Створення комплексних систем з використанням декількох відновлювальних джерел енергії та типів обладнання дозволяють підвищення надійності та економічності всієї системи.

У роботах [1–3] розглядаються комбіновані системи теплопостачання на базі теплових насо-

сів та сонячних колекторів і шляхи підвищення їх ефективності. Авторами продовжена робота в цьому напрямі і запропонована принципова схема комплексної системи гарячого водопостачання (опалення) на базі плоских сонячних колекторів та теплового насосу з акумулятором тепла в холодну пору року. У статті представлена робота сонячних колекторів при зниженому температурному режимі сонячних колекторів зі збереженням отриманої теплоти в баку накопичувачі, з подальшим підняттям потенціалу теплоти за допомогою теплового насосу. Проведено аналіз питомої теплової потужності її окремих складових системи та режиму роботи для осінньо-зимового періоду для різних регіонів України. Визначенні площі теплообміну та потужності окремих складових частин теплового насосу.

Ефективність роботи сонячних колекторів прямо залежить від інтенсивності сонячного

випромінювання, температури навколишнього середовища та швидкості вітру [1]. Сукупний вплив цих факторів зменшує ефективність роботи сонячних колекторів в осінньо-зимовий період в більше ніж в п'ять разів в порівнянні з весняно-літнім періодом. Дані сонячної радіації, швидкості вітру та густини сонячної радіації в холодну пору року для різних регіонів України представлені на рис. 1–3. Для аналізу роботи сонячних колекторів в умовах клімату України в діапазоні широт від  $44^{\circ}$  N до  $52^{\circ}$  N були взяті дані метеостанцій Криму, Одеської, Дніпропетровської, Запорізької, Львівської, Чернігівської та Київської областей, що відповідає південним, центральним та північним регіонам України [7]. Зібрані кліматичні дані, які впливають на роботу геліоустановки, а саме: середньомісячні показники температури повітря (рис. 1.), швидкості вітру (рис. 2.), середньодобова щільність сонячної радіації на горизонтальну поверхню (рис. 3).

Для зменшення впливу факторів вітру та температури навколишнього середовища на ефективність роботи сонячного колектору авторами пропонується зниження температури теплоносія на вході в останній, з накопиченням отриманої енергії в баку акумулятора. Подальше збільшення потенціалу накопиченого тепла здійснюється за допомогою теплового насосу.

**Постановка завдання.** Мета статті – проаналізувати сумісну роботу системи сонячних колекторів з тепловим насосом у зимовий період, з використанням акумулятора теплоти. Визначити основні питомі характеристики обладнання, такі як площа сонячного колектору, об'єм акумулятора та відповідні характеристики складових частин теплового насосу для умов України.

**Виклад основного матеріалу.** Авторами розглядається комбінована система гарячого водопостачання (опалення) на базі сонячних колекторів в зимовий період. Схема установки представлена на рис. 1, яка складається з сонячного колектору (1), баку накопичувача (2),

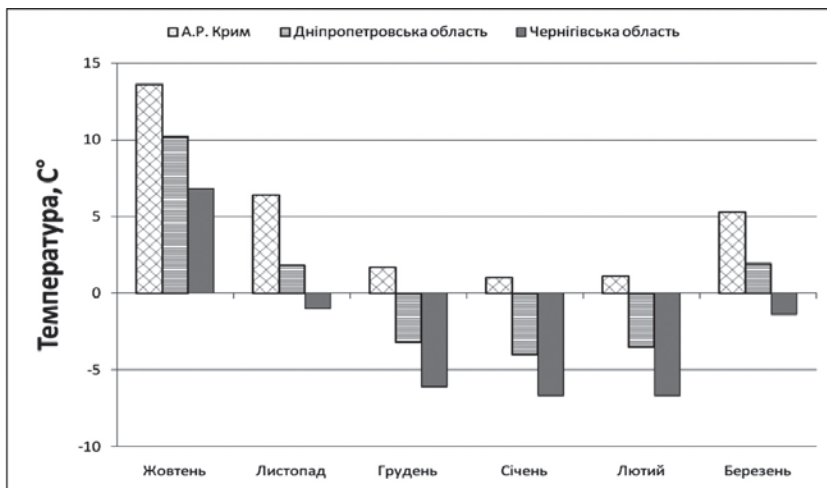


Рис. 1. Діаграма середньомісячної температури для трьох регіонів України в осінньо-весняний період

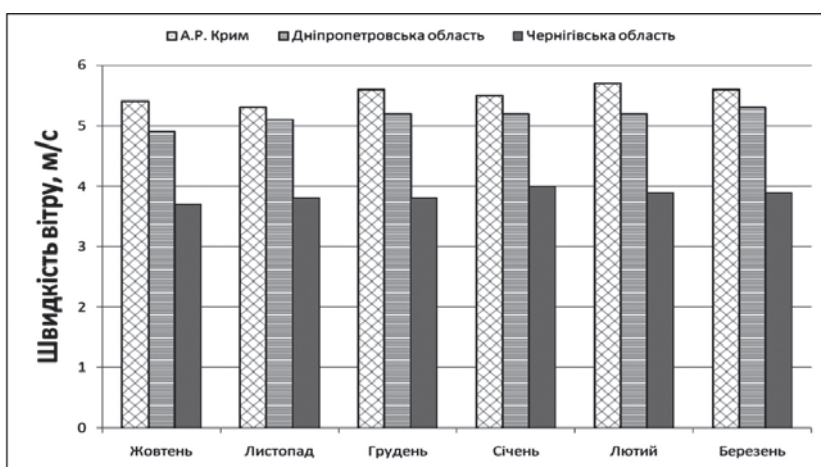
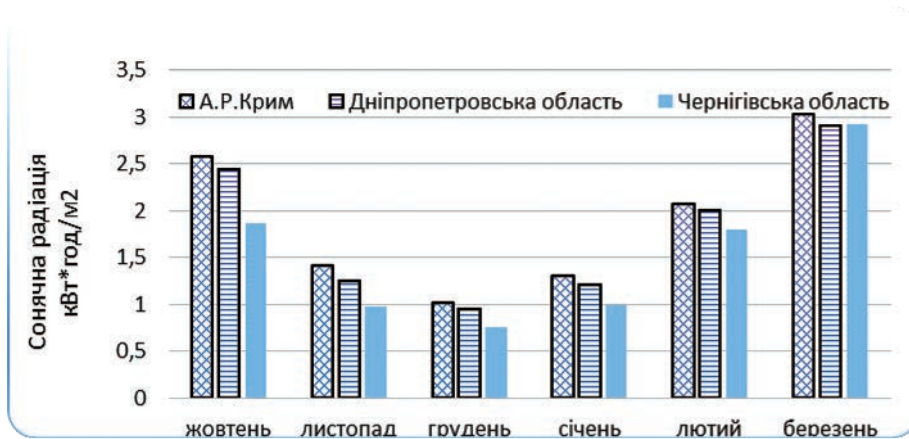
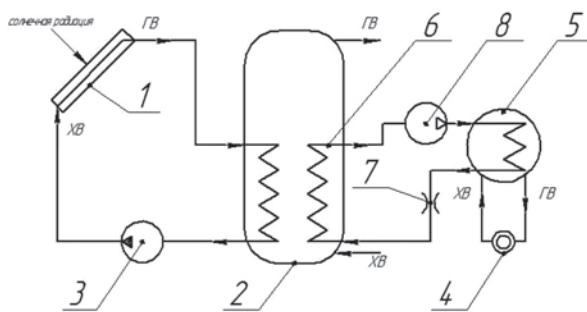


Рис. 2. Діаграма середньомісячної швидкості вітру для трьох регіонів України в осінньо-весняний період



**Рис. 3. Середньодобова щільність сонячної радіації на горизонтальну поверхню для трьох регіонів України**

циркуляційного насосу(3) та теплового насосу (5, 6, 7, 8). Для розрахунку прийнята система плоских сонячних колекторів загальною площею 10 м<sup>2</sup>, яка працює на бак акумулятор, який виступає у ролі джерела низькопотенційного тепла для теплового насосу. Кут нахилу сонячних колекторів відповідає літньому встановленню і становить  $s = \varphi - 15^\circ$ , де  $\varphi$  - широта місцевості. Для підвищення ККД сонячного колектору в зимовий період автотрами пропонується знижувати температуру теплоносія на вході до сонячного колектору. Тепловий насос та збільшений низькотемпературний бак накопичувач розглядаються як додаток до наявної літньої системи гарячого водопостачання.



**Рис. 4. Спрощена схема представленої установки: 1 – сонячний колектор; 2 – бак акумулятор; 3 – насос; 4 – споживач; 5 – конденсатор; 6 – випарник теплового насосу; 7 – дросель; 8 – компресор**

Тепло, що поглинається сонячними колекторами, передається до баку накопичувача. Цій бак є джерелом тепла для випаровувача теплового насосу. Для зменшення теплових втрат в навколишнє середовище в осінньо-зимовий період з поверхні сонячних колекторів та в бак накопичувачі температура теплоносія в бак повинна бути в якомога менших межах [5–7]. Мінімальна

температура обмежується замерзанням води на поверхнях випаровувача. Температурний потенціал отриманої теплоти достатній для роботи теплового насосу з COP >3,5 при температурі гарячого теплоносія на виході не нижче 55°C. Потенціал тепла підвищується за рахунок стиснення парів фреону в компресорі теплового насосу. Упродовж доби з бака накопичувача постійно відводиться теплота для роботи

теплового насосу, яка у вигляді гарячої води відводиться з конденсатора (див рис. 1) та може використовуватися для потреб гарячого водопостачання або системи опалення. Відведення теплоти з баку накопичувача дозволяє підтримувати відносно постійну температуру в бак накопичувачі.

Робота сонячних колекторів на бак акумулятор з постійним відведення тепла з баку акумулятору на тепловий насос змодельована за допомогою програмного забезпечення Retscreen [5]. При чисельному моделюванні роботи системи сонячних колекторів за основними вхідними факторами розглянуті: густина сонячної радіації залежно від регіону (метеостанції) України, об'єм бака накопичувача, температура теплоносія, що повертався в бак акумулятор, після теплового насосу, об'єм води, що відбирався на тепловий насос впродовж доби, та максимальна можлива температура теплоносія в баці накопичувачі.

Під час побудови графіків розглядалися кліматичні умови осінньо-зимового періоду для широти місцевості 48 ° (Дніпропетровська область), що відповідає середньому значенню для України.

На рис. 5 та рис. 6 представлені графіки теплосприйняття системи сонячних колекторів та ККД всієї системи залежно від об'єму бака накопичувача від 500 до 5000 літрів, температури живильної води після теплового насосу на вході в бак накопичувач від 5 до 15 °С, максимально можливої температури в баці-накопичувачі від 10 до 40°C, відбор теплоти (теплоносія) впродовж доби з баку накопичувача – 2000 та 3000 літрів за добу.

Аналіз графіків (рис. 5 та 6) показує, що максимальний вплив на ефективність системи сонячних колекторів (ККД) та отримання тепла від сонячних колекторів є температура живильної води на

вході в бак накопичувач, об'єм бака накопичувача та максимальна температура в баку накопичувачі.

Збільшення температури живильної води на вході в бак накопичувач на 5°C призводить до зниження ККД та теплосприйняття сонячних колекторів від 30 до 5% за інших рівних умов. Так, при підвищенні максимальної температури в баці-накопичувачі до 15°C ККД та теплосприйняття знижуються від 30% до 20% при зміні об'єму бака-накопичувача від 500 до 5000 літрів. При збіль-

шенні максимальної температури в баці-накопичувачі з 10 до 40°C зменшення ККД та теплосприйняття сповільнюється з 17 до 5% на кожні 5°C підвищення температури живильної води. Збільшення об'єму бака накопичувача зменшує вплив підвищення температури живильної води на ефективність сонячних колекторів.

Оптимальне підвищення температури теплоносія становить на 10-15°C від температури живильної води, що поступає в бак-накопичувач,

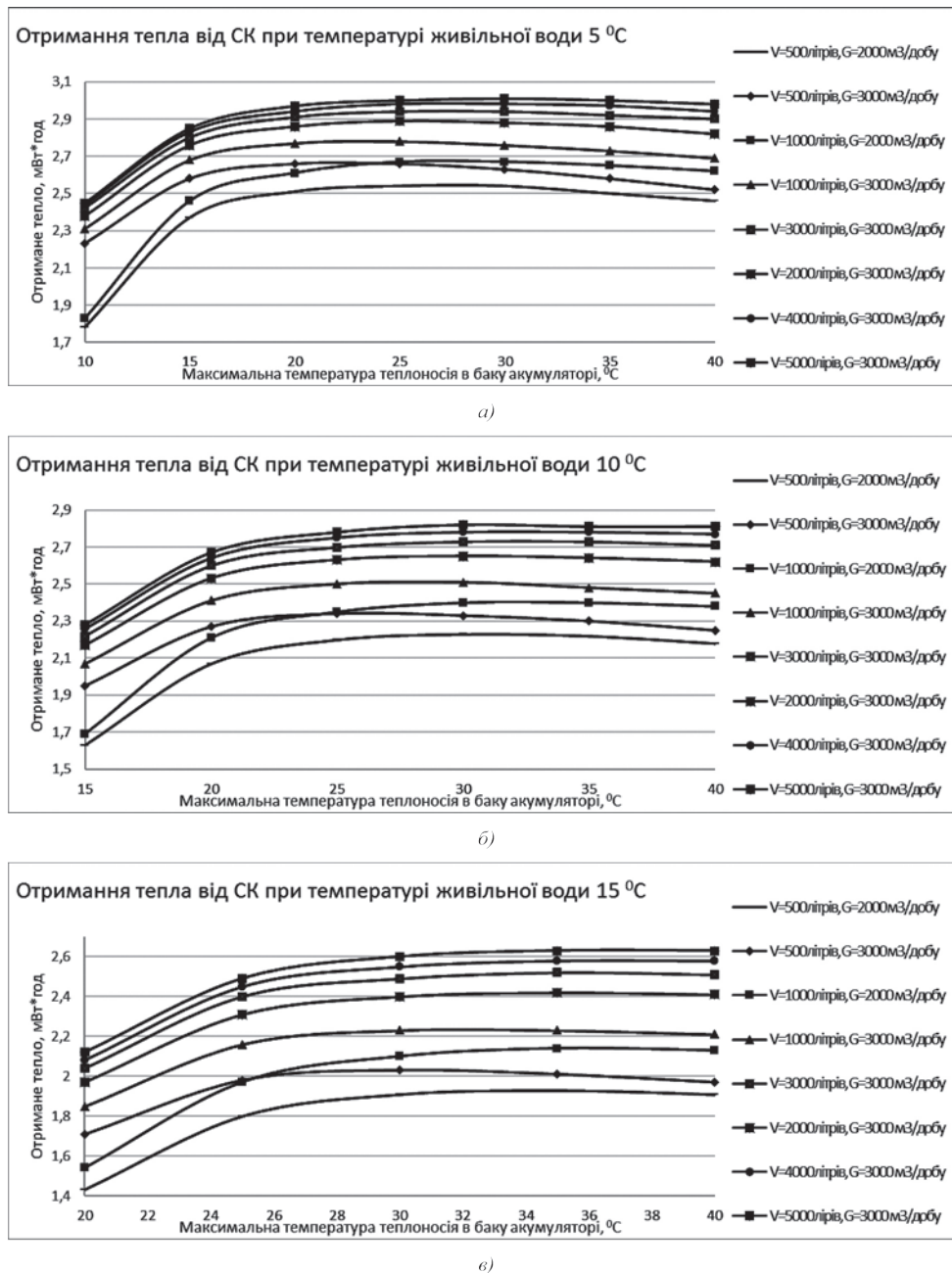
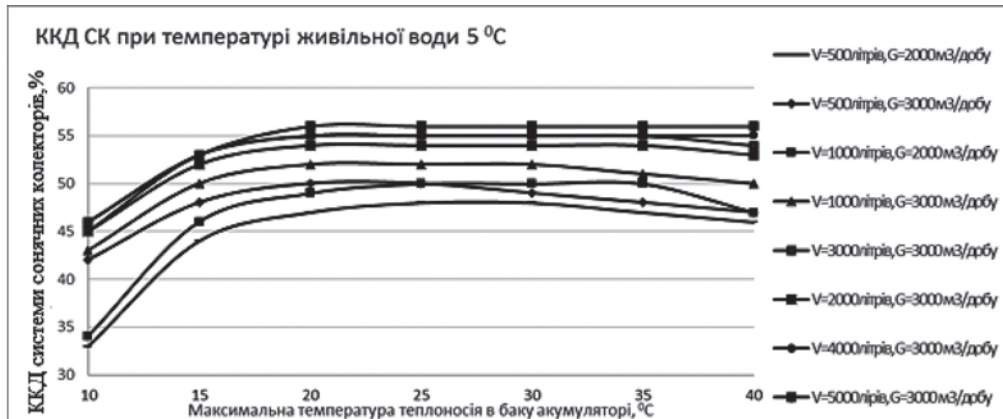


Рис. 5. Отримання тепла від сонячних колекторів залежно від об'єму бака накопичувача, максимальної температури теплоносія та відбору тепла (теплоносія) впродовж доби: а) – температура живильної води +5°C; б) – температура живильної води +10; в)- температура живильної води +15°C

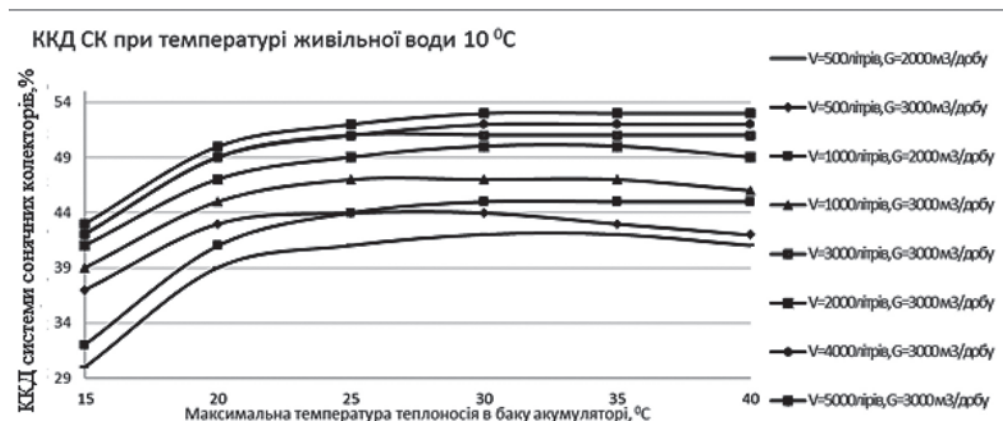
незалежно від об'єму останнього. Подальше збільшення температури теплоносія призводить до зниження ефективності сонячних колекторів за рахунок збільшення втрат у навколишнє середовище.

Відбір тепла з баку-накопичувача з поверненням охолодженого теплоносія впливає на ефективність роботи сонячних колекторів. На рис. 5

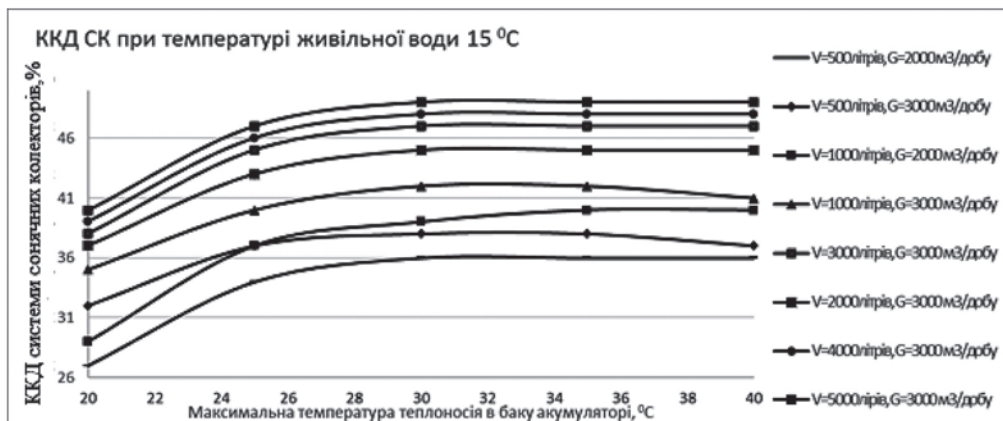
та рис. 6 представлено графік теплосприйняття та ККД системи сонячних колекторів при об'ємі баку накопичувача від 500 до 5000 літрів (50-500 літрів/м<sup>2</sup>) при витраті теплоносія 2000 та 3000 літрів на добу (200 та 300 літрів /м<sup>2</sup> за добу). Із графіків видно, що при збільшенні відбору теплоносія в 1,5 рази приріст теплосприйняття



а)



б)



в)

Рис. 6. ККД системи сонячних колекторів залежно від об'єму баку накопичувача, максимальної температури теплоносія та відбору тепла (теплоносія) впродовж доби:  
а) температура живильної води +5°C; б) температура живильної води +10;  
в) температура живильної води +15°C

сонячних колекторів та їх ККД збільшується від 20 до 3%. Це зумовлено підтримкою більш низької температури на вході в сонячний колектор

Верхня межа відповідає нагріву теплоносія в БН на 5°C, нижня межа при нагріві теплоносія до 40°C відповідно. Це пояснюється тим, що збільшення температури в баці-накопичувачі призводить до збільшення теплових втрат в навколишнє середовище, збільшення тепловідводу зменшує температуру теплоносія в баці-накопичувачі.

На рис. 7 представлено графік зміни теплосприйняття теплоти системою сонячних колекторів залежно від зростання об'єму бака накопичувача. Приріст об'єму бака накопичувача від 500 літрів до 5000 літрів призводить до зростання теплосприйняття від 1-1,5% до 0,25-0,5% на кожні 500 літрів додаткового об'єму бака накопичувача. Найбільший приріст теплосприйняття та ККД відповідає для об'єму бака накопичувача 2000-3000 літрів, особливо для режимів роботи з найбільшою кінцевою температурою в баку накопичувачі. З аналізу графіку видно, що після досягнення об'єму бака-накопичувача 3000 літрів, збільшення зростання ефективності сонячних колекторів значно уповільнюється до 0,25 % на 500 літрів при об'ємі бака від 3000 до 5000 літрів для всіх температурних режимів.

Дані отриманої сонячної енергії для різних регіонів України- південного (Сімферополь, Одеса), центрального (Львів, Дніпро, Запоріжжя) та північного регіону (Чернігів, Київ) для зимових місяців для об'єму бака-накопичувача 3000 літрів, температури теплоносія на вході 5°C, максимальною температурою в баці-накопичувачі 20°C відбором теплоносія з бака-накопичувача 3000 літрів за добу представлені в таблиці 1.

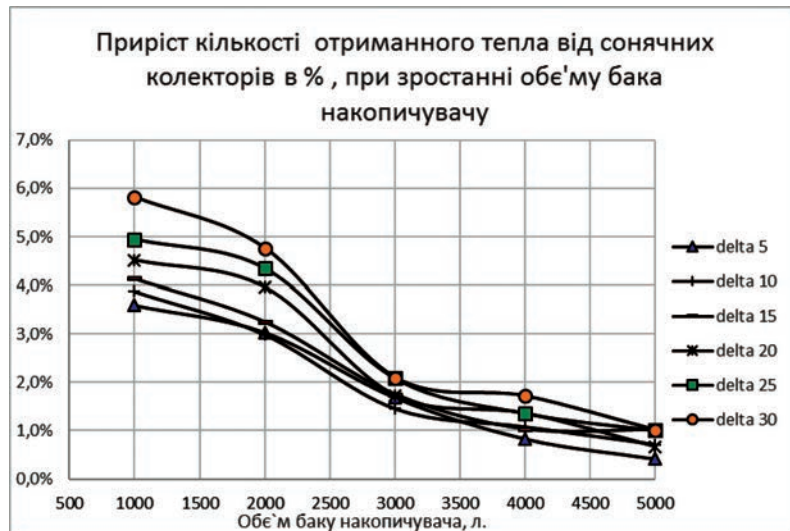


Рис. 7. Графік збільшення теплосприйняття системою сонячних колекторів залежно від збільшення бака-накопичувача при різних максимальних температурах в баці-накопичувачі

Зміна отриманої енергії сонячними колекторами за зимовий період при зменшенні максимальної температури в баку накопичувачі до 15°C коливається в межах  $\pm 2\%$  залежно від регіону.

При визначенні параметрів роботи теплового насосу, що живиться теплом з баку акумулятору, були прийняті такі умови: температура випарування робочого тіла  $t_{\text{вип.}} = 0^\circ\text{C}$ , а температура конденсації  $t_{\text{конд.}} = 55^\circ\text{C}$ , адиабатний ККД циклу  $\eta_{\text{oi}} = 0,75$ . В якості робочого тіла теплового насосу розглянуті фреони: R22, R407C, R410B, які сьогодні можуть застосовуватися. За допомогою програмного забезпечення CoolPack для кожного фреону був розрахований коефіцієнт трансформації тепла циклу теплового насосу, що наведено в таблиці 2.

Для визначення потужності випарника вираз (1) теплового насосу використовувалися такі допущення:

1. Потужність випарника розраховується на середнє значення отриманої теплоти від сонячних колекторів в зимові місяці.

Таблиця 1

**Кількість енергії, яка була прийнята сонячним колектором залежно від регіону та місяця**

| Регіон             |             | $Q_{\text{груд}}$ | $Q_{\text{січень}}$ | $Q_{\text{лютий}}$ | $Q_{\text{сер}}$ |
|--------------------|-------------|-------------------|---------------------|--------------------|------------------|
|                    |             | кВт*год           |                     |                    |                  |
| Північ України     | Чернігів    | 260               | 344                 | 468                | 357              |
|                    | Київ        | 151               | 186                 | 247                | 195              |
| Центральна Україна | Львів       | 261               | 343                 | 441                | 348              |
|                    | Запоріжжя   | 216               | 292                 | 414                | 307              |
|                    | Дніпро      | 270               | 350                 | 480                | 367              |
| Південь України    | Сімферополь | 256               | 337                 | 439                | 344              |
|                    | Одеса       | 187               | 215                 | 326                | 243              |

2. Час роботи теплового насосу 12 годин на добу.

$$Q_{\text{вип}} = \frac{Q_{\text{с.к.}}^{\text{сер}}}{n_{\text{год}} \cdot n_{\text{днів}}}; \quad (1)$$

$$Q_{\text{с.к.}}^{\text{сер}} = \left( \frac{Q_{\text{с.к.}}^{\text{грудень}} + Q_{\text{с.к.}}^{\text{січень}} + Q_{\text{с.к.}}^{\text{лютий}}}{3} \right); \quad (2)$$

$$n_{\text{днів}} = \frac{(n_{\text{днів}}^{\text{грудень}} + n_{\text{днів}}^{\text{січень}} + n_{\text{днів}}^{\text{лютий}})}{3} \quad (3)$$

де  $Q_{\text{вип}}$  – потужність випарника;  $Q_{\text{с.к.}}^{\text{сер}}$  – середня кількість енергії, яка була прийнята сонячним колектором:  $Q_{\text{с.к.}}^{\text{грудень}}$  – у грудні,  $Q_{\text{с.к.}}^{\text{січень}}$  – у січні,  $Q_{\text{с.к.}}^{\text{лютий}}$  – у лютому;  $n_{\text{год}} = 12 \text{ годин}$  – кількість годин на добу протягом яких ми використовуємо тепловий насос;  $n_{\text{днів}}$  – середня кількість днів, протягом яких ми використовуємо тепловий насос:  $n_{\text{днів}}^{\text{грудень}} = 31 \text{ день}$ ,  $n_{\text{днів}}^{\text{січень}} = 31 \text{ день}$ ,  $n_{\text{днів}}^{\text{лютий}} = 28 \text{ днів}$ ;

Потужність компресора розраховується виходячи з потужності випарника та коефіцієнту трансформації тепла:

$$Q_{\text{компр.}} = \frac{Q_{\text{вип.}}}{\text{COP} - 1} \quad (4)$$

де  $Q_{\text{компр.}}$  – потужність компресора;  
COP – коефіцієнт трансформації тепла.

$$Q_{\text{конд.}} = Q_{\text{компр.}} + Q_{\text{вип.}} \quad (5)$$

де  $Q_{\text{конд.}}$  – потужність конденсатора теплового насосу.

Площа теплообмінного обладнання розраховується з такої залежності:

$$F = \frac{Q_{\text{конд.}}}{k \cdot \Delta t}; \quad (6)$$

де  $k = 500 \dots 800 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  – коефіцієнт теплопередачі для умов конденсації ( випаровування) органічної рідини до води, приймаємо  $600 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}$  [10];

$\Delta t$  – середній логарифмічний температурний напір, приймаємо  $\Delta t = 5$ ;

Характеристики теплообмінного обладнання та компресора теплового насосу в заданих умовах розраховані за виразами (1-6), згідно з кількістю отриманої енергії від сонячних колекторів в найбільш холодний місяць року для різних регіонів України, та представлені в таблицях 2, 3.

Потужність компресора залежно від робочого тіла коливається в межах 5%, тому під час визначення потужності конденсатора враховувалась середня потужність компресорів при різних робочих тілах. Розбіжність для одного регіону отриманої кількості теплоти та відповідно потужності теплонасосного обладнання залежить від хмарності для даного регіону і відповідно до надходження сонячної радіації [11].

Таблиця 2

Потужності випарника, компресора (залежно від робочого тіла) і конденсатора теплового насоса

| Регіон             | Q <sub>випар</sub> | Q <sub>компр</sub> |          |          | Q <sub>конд</sub> |       |
|--------------------|--------------------|--------------------|----------|----------|-------------------|-------|
|                    |                    | R410B              | R407C    | R22      |                   |       |
|                    |                    | COP=3,05           | COP=3,18 | COP=3,25 |                   |       |
| кВт                |                    |                    |          |          |                   |       |
| Північ України     | Чернігів           | 0,970              | 0,473    | 0,445    | 0,431             | 1,420 |
|                    | Київ               | 0,547              | 0,267    | 0,251    | 0,243             | 0,801 |
| Центральна Україна | Львів              | 0,947              | 0,462    | 0,435    | 0,421             | 1,386 |
|                    | Запоріжжя          | 0,842              | 0,411    | 0,386    | 0,374             | 1,232 |
|                    | Дніпро             | 1,000              | 0,488    | 0,459    | 0,444             | 1,464 |
| Південь України    | Сімферополь        | 0,939              | 0,458    | 0,431    | 0,417             | 1,374 |
|                    | Одеса              | 0,674              | 0,329    | 0,309    | 0,300             | 0,987 |

Таблиця 3

Площа теплообмінного обладнання

| Регіон             | Q <sub>конд</sub> | F <sub>конд</sub> | Q <sub>вип.</sub> | F <sub>вип.</sub> |                |
|--------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------|
|                    |                   | кВт               | м <sup>2</sup>    | кВт               | м <sup>2</sup> |
| Північ України     | Чернігів          | 1,420             | 0,473             | 0,970             | 0,323          |
|                    | Київ              | 0,801             | 0,267             | 0,547             | 0,182          |
| Центральна Україна | Львів             | 1,386             | 0,462             | 0,947             | 0,316          |
|                    | Запоріжжя         | 1,232             | 0,411             | 0,842             | 0,281          |
|                    | Дніпро            | 1,464             | 0,488             | 1,000             | 0,333          |
| Південь України    | Сімферополь       | 1,374             | 0,458             | 0,939             | 0,313          |
|                    | Одеса             | 0,674             | 0,225             | 0,674             | 0,225          |



**Висновки.** Ефективність наявних сонячних колекторів в осінньо-зимовий період може бути підвищена за рахунок зниження температурного режиму, за умов застосування окремого бака-накопичувача.

Оптимальним об'єм бака-накопичувача для осінньо-зимового період орієнтовно 300 літрів/м<sup>2</sup> сонячного колектора. Оптимальний режим експлуатації – температура живильної води 5°C та за максимальної температури води в БН

15-20°C. Нижча температура не розглядається за умовами замерзання теплоносія. Витрата теплоносія складає 300 літрів на 1м<sup>2</sup> на добу.

Застосування теплового насосу в одній системі із сонячним колектором дозволяє підвищити параметри теплоносія до 55°C при коефіцієнті трансформації тепла вище 3 при різних робочих тілах. Теплова потужність теплового насосу на 10 м<sup>2</sup> сонячного колектора складає 0,8 – 1,4 кВт, потужність компресора: 0,45 – 0,6 кВт.

#### Список літератури:

1. Даффи Дж.А., Бекман У.А. Теплові процеси с использованием солнечной энергии. Москва : Мир, 1977. 413 с.
2. Новаковский Е.В. Анализ результатов экспериментальных исследований традиционных солнечных коллекторов и дельта-систем *Холодильная техника и технология*. 2004. № 1(87). С. 45–48.
3. Дикий Н.А. Комбинированное производство энергии для преодоления кризиса в энергетике. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2000. № 1. С. 13–17.
4. Ткаченко С.Й., Остапенко О.П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах тепlopостачання : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2009. 176 с.
5. Соколов Е.Я., Бродянский В.М. Энергетические основы трансформации тепла и процессов охлаждения : учеб. пособие для вузов. 2-е изд., перераб. Москва : Энергоиздат, 1981. 320 с.
6. Денисова А.Е. Особенности работы теплового насоса в комплексной альтернативной системе теплоснабжения. *Экотехнологии и ресурсосбережение*. 2001. № 1. С. 6–8.
7. Surface meteorology and Solar Energy. URL : <http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/RETScreen/>.
8. Ye.Yerdesh Numerical simulation on solar collector and cascade heat pump combi water heating systems in Kazakhstan climates, Z. Abdulinab, A. Aliulyac, Ye. Belyayevac, M. Mohanrajid, A. Kaltayevac. *Renewable Energy*, Volume 145, January 2020. P. 1222–1234.
9. Maria Pinamonti, Water-to-water heat pump integration in a solar seasonal storage system for space heating and domestic hot water production of a single-family house in a cold climate. Maria Pinamonti, Ian Beausoleil-Morrison, Alessandro Prada, Paolo Baggio. *Solar Energy*, Volume 213, 1 January 2021, P. 300–311.
10. Маньковский О.Н., Толчинский А.Р., Александров М.В. Теплообменная аппаратура химических производств. Инженерные методы расчета / Под ред. Романкова П.Г. и Курочкиной М.И. Ленинград : Химия, 1976. 368 с.
11. Пуховий І.І., Новаківський Є.В. Енергія, отримана від сонячного випромінювання в різних кліматично-географічних зонах України з урахуванням хмарності та її залежність від орієнтації сонячних колекторів. *Відновлювальна енергетика*. 2006. № 4. С. 28–36.

#### **Ohorodnyk S.S., Novakivskyi Ye.V., Shvets M.Yu., Guida O.G., Minaieva Yu.Yu. IMPROVING EFFICIENCY SOLAR COLLECTORS IN THE WINTER SEASON WITH THE USE OF HEAT PUMPS**

*This article is devoted to the analysis of the efficiency of solar collectors in the autumn-winter period together with an additional storage tank and heat pump.*

*The main factors influencing the efficiency of solar collectors are considered in the article. The scheme of operation of solar collectors in the winter with increase of potential of the heat carrier at the expense of the heat pump for maintenance of needs of heating or hot water supply is offered.*

*An analysis of the efficiency and heat perception of solar collectors in the autumn-winter period from the maximum temperature of the coolant and the volume of the storage tank, the temperature of the coolant after the heat pump.*

*The optimal specific characteristics of the storage tank, the temperature regime of solar collectors (in winter), the optimal volume of the storage tank and the consumption of coolant for the heat pump for the winter mode of solar collectors are determined.*

*The coefficient of performance of the heat pump for the conditions for hot water production for freons presented on the market for similar equipment is analyzed.*

*Graphical dependences of heat perception of the solar collector system and efficiency of the whole system depending on the volume of the storage tank, the temperature of the feed water after the heat pump at the inlet to the storage tank, the maximum possible temperature in the storage tank are obtained.*

*The scheme of the complex system of hot water supply (heating) on the basis of flat solar collectors and the heat pump with the heat accumulator in a cold season is offered, work of solar collectors at the lowered temperature of solar collectors with preservation of the received heat in a storage tank by means of the heat pump.*

*The specific characteristics of the heat pump, namely the capacity of the compressor, evaporator and condenser and their respective areas per 10 m<sup>2</sup> of solar collector, for different regions of Ukraine are determined.*

**Key words:** *solar collector, heat pump, complex systems, energy efficiency, renewable energy.*

УДК 614.841.1

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/33>**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

## ЩОДО АВАРІЙНОГО РОЗЛИВУ ГОРЮЧИХ РІДИН

Зазначено фактори, від яких залежить процес розтікання рідин. Проаналізовано підходи щодо визначення площі аварійного розливу горючих рідин, в тому числі розглянуто особливості визначення площі розливу турбінного масла, яке витікає з отвору напірного маслопроводу в разі аварії в машинному залі енергетичного підприємства. Показано, що радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях виражається здобутком ступеневих функцій критерія Галілея та критерія гомохронності. Наведено визначення таких параметрів, як радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях, швидкість витікання рідини із закритої ємкості через отвір, витрата рідини, що витікає з отвору. Особливу увагу приділено розрахунку геометричних розмірів осередку пожежі під час розливу турбінного масла з маслосистеми змазування та ущільнення валу генератора приймається рівною сумі витрат масла крізь два підшипника та два ущільнення генератора та може складати до 25 л/с. Відмічено, що при розтіканні горючої рідини на горизонтальній поверхні тепловий потік від пожежі буде визначатися видом горючої рідини і параметрами розливу. При цьому найбільшу складність для оцінки являє форма і розміри розливу, оскільки вони залежать від рельєфу, характеру поверхні й виду рідини. Встановлено підходи, які доцільно використовувати для розрахунку площі аварійного розливу турбінного масла під час аварійної ситуації на напірному маслопроводі в машинному залі енергетичного підприємства. Встановлено, що під час визначення площі аварійного розливу турбінного масла необхідно дослідити залежність в'язкості масла від його температури та вплив в'язкості масла на площу його розтікання. Визначена необхідність проведення експериментальних досліджень із розливу та горіння масла на бетонній чи металевій поверхні, що найбільш відповідає умовам машинного залу. Акцентовано увагу на необхідності дослідження залежності питомої масової швидкості вигорання турбінного масла від от його початкової температури та температури в процесі горіння.

**Ключові слова:** горюча рідина, площа розливу, поверхня, турбінне масло.

**Постановка проблеми.** Аварії технологічного обладнання та установок нерідко пов'язані з порушенням герметичності апаратів, резервуарів та трубопроводів, розтіканням горючих рідин, що сприяє розвитку пожежі з невеликого осередку горіння у пожежу, яка має характер катастрофи та призводить до значних матеріальних збитків, загибелі людей та порушення роботи цілого промислового об'єкта, зокрема енергетичного підприємства [1].

Турбінне масло є одним з основних елементів пожежної навантаги машинних залів енергетичних підприємств, до яких відносяться теплові та атомні електростанції. Пожежі турбінного масла внаслідок розгерметизації систем змазування та ущільнення турбогенераторів приводять до катастрофічних наслідків, руйнування огорожувальних

конструкцій машинних залів та знищення складного та вартісного технологічного обладнання.

Ураховуючи вищенаведене, визначення показників, що характеризують пожежну небезпеку розливу горючих рідин по твердій поверхні, до яких відносяться площа розливу, радіус зони розливу, коефіцієнт розливу тощо, є актуальною науково-практичною проблемою, що потребує вирішення.

**Аналіз літературних даних.** На Україні проблему забезпечення пожежної безпеки атомних електростанцій досліджували М.М. Семерак, А.В. Субота, В.М. Новак, В.М. Байтала [2] та інші. Так, стаття [2] присвячена математичному моделюванню вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій. Проаналізовано причини виникнення та протікання пожеж у машинних залах електростанцій.

Розглянуто процес горіння водню та воднево-масляних сумішей в машинних залах за умов пожежі. Проаналізовано найбільш вірогідні місця виникнення пожежонебезпечних концентрацій сумішей водень-масло-повітря. Розроблено методику дослідження теплових процесів, які протікають під час пожежі. Визначено температурні потоки, зумовлені випромінюванням газомасляного факела пожежі тощо. Слід зазначити, що стаття [2] не містить даних щодо розрахунку площі аварійних розливів горючих рідин, зокрема турбінного масла.

У [1] вказано, що міжнародна лабораторія Fire Technology Laboratory використовує комп'ютерні програми для моделювання пожеж в приміщеннях з великою пожежною небезпекою. Існує два основних типи цих програм. Програма першого типу призначена для моделювання пожежі в одному якомусь відсіку та раніше мала назву Harvard Fire Code CFC V. Більш пізня її версія була перейменована в First. Наведено результати, розраховані за допомогою програми First для випадку горіння розливу турбінного масла площею  $3\text{ м}^2$  та  $2\text{ м}^2$  у відсіку об'ємом  $70\text{ м}^3$  у нижній його частині. Описано польові моделі горіння розливання турбінного масла та руху газів у великих приміщеннях, таких як машинні зали атомних електростанцій. Програма розраховує температурні поля, турбулентну кінетичну енергію, швидкість розсіювання, хімічну концентрацію, інтенсивність випромінювання в трьох координатах. У [1] описано моделі горіння розливання турбінного масла, але відсутні результати моделювання цього процесу.

У [3] наведено результати оцінки ризику пожеж в машинних залах атомних електростанцій за допомогою комп'ютерного моделювання пожежі для подальшої оцінки вразливості систем безпеки станції при пожежах. Проте в публікації не розглянуто можливі сценарії розвитку пожежі під час витоку турбінного масла з маслонаповненого обладнання у машинному залі енергетичного підприємства.

Стаття [4] присвячена дослідженню виникнення пожежі, як потенційної загрози для безпеки атомних електростанцій. Представлено якісну характеристику механізмів запалювання та факторів, що впливають на розвиток пожежі (механізми виявлення, гасіння пожежі тощо) та оцінку частоти виникнення пожеж на атомних електростанціях. В імовірнісному сенсі проаналізовано динаміку розвитку пожежі на АЕС Броунс Феррі та зроблено порівняння різних моделей.

Загальний підхід досліджень в статті [4] носить параметричний характер і його результати в осно-

вному мають якісний характер. Це пов'язано із відсутністю достовірної інформації, наприклад, про горючість матеріалів, поведінку кабелю під дією полум'я, залежність розвитку пожежі від часу. Випадки пожеж на АЕС було якісно проаналізовано, при цьому було виявлено причини загорань та частоту їх виникнення. В той же час, стаття не містить даних про пожежне навантаження у машинних залах.

У статті [5] досліджено часові характеристики пожеж на АЕС. Інформація, що наведена в цій статті, отримана з бази даних Американської компанії по страхуванню діяльності, пов'язаної з ядерною енергією (American Nuclear Insurers (ANI)). Ця база даних є найбільш вичерпним джерелом статистичних даних про минулі пожежі.

У статті [5] вказано, що виникнення пожежі на атомній електростанції може вимагати або не вимагати її повної зупинки. Наслідки пожежі, як правило, призводять до будь-якого відновлювального ремонту та іноді до деяких змін заходів щодо запобігання пожеж, після чого відновлюється нормальна робота станції. Оскільки пожежі можуть відбуватися з багатьох причин та проявляти часові залежності частоти їх виникнення різних типів, автори статті припускають, що випадки пожеж можуть бути змодельовані як неоднорідна процесу Пуассона з частотою виникнення Вейбула. Ця гіпотеза була перевірена за допомогою декількох статистичних тестів.

У публікації [5] вказано, що оцінка пожежної безпеки на атомній електростанції повинна включати розгляд впливу пожежі на працездатність обладнання та системи безпеки станції. Це питання не є типовим для безпеки життя та захисту матеріальних цінностей, що є основним питанням забезпечення пожежної безпеки. Слід відмітити, що публікація не розглядає питання аварійного витоку турбінного масла та розробки заходів щодо його обмеження.

У статті [6] розглядається питання пожежної безпеки на атомних електростанціях США. До розгляду входить опис (статистика) пожеж, що мали місце на АЕС, питання розробки керівних нормативних документів з питань пожежної безпеки атомної енергетики, несприятливий досвід, пов'язаний з хибним спрацюванням системи пожежогасіння, та перспективні вимоги пожежної безпеки для майбутніх конструкцій реакторів США. Стаття стосується виключно безпеки ядерних реакторів атомних електростанцій та не поширюється на машинні зали.

У публікації [7] вказано, що багаточисельні імовірнісні оцінки ризиків показали, що пожежа

є основним джерелом ризиків на АЕС. Тим не менш, прогнозування імовірності пошкоджень електричних кабелів і схем, викликаних пожежами та їх потенційного впливу на безпеку АЕС, залишається актуальною практичною задачею, зокрема із-за відсутності фізичних моделей за допомогою яких можна здійснювати послідовні та об'єктивні оцінки.

Ця стаття містить обговорення двох моделей – передачі тепла («heat transfer») та К-фактору (IR «K-factor») – для оцінки імовірності пошкоджень кабелів в результаті пожежі.

Таким чином, модель теплопередачі є перспективною, оскільки вона враховує властивості і характеристики кабелів і їх матеріалів та характеристики теплового пошкодження. Ця модель може бути використана для оцінки імовірності пошкодження кабеля за різних температурних умов.

Стаття в основному стосується безпеки електричних кабелів на атомних електростанціях та містить недостатньо інформації стосовно пожежної небезпеки, яка пов'язана з витоком і загоранням турбінного масла.

У публікації [8] йдеться про концепції пожежогасіння для закритих пожежних зон атомних електростанцій, основаних на аналізі практичної діяльності.

Згідно з [8], якщо на АЕС сталася пожежа, пожежна команда повинна виявити місце пожежі, щоб погасити її. Крім того, пожежна команда повинна боротися з вогнем у відповідності з вимогами програми протипожежного захисту на АЕС.

Однак якщо дії з гасіння пожеж проводяться невірно, це може призвести до погіршення ситуації і поширення вогню на сусідні пожежні зони, а також представляти небезпеку для функцій безпечної зупинки реактора.

Результати досліджень показують, що ефективні методи пожежогасіння включають підхід до управління вентиляцією, використання горючих матеріалів в замкнених пожежних зонах, ручне подавання інертного газу пожежною командою та ручне пожежогасіння в кінці.

Недоліком публікації є те, що вона розглядає тільки закриті пожежні зони на атомних електростанціях, таких як гермооболонка ядерного реактора, та не поширюється на машинні зали.

Публікація [9] стосується аналізу впливу зовнішньої пожежі на безпеку експлуатації електростанції. Головною метою цієї роботи є вивчення основних параметрів зовнішніх пожеж та їх впливу на навколишнє середовище.

Робота основана на аналітичному дослідженні осередку пожежі, її розвитку та поширення.

Далі вказано, що комп'ютерна програма Fire dynamic simulation (FDS) використовується для моделювання пожежі. Ця програма використовує «Eddie simulation» (LES) для розрахунку розвитку пожежі та поширення продуктів горіння до навколишнього середовища. Осередок пожежі розташований у безпосередній близькості від небезпечних виробництв, наприклад енергетичного, хімічного тощо.

У статті [9] представлено коротку інформацію про комп'ютерну програму FDS та початкові і граничні умови, які використовуються в математичній моделі.

Проте стаття не розглядає питання розвитку пожеж всередині машинних залів атомних електростанцій.

Публікація [10] стосується інтегрованої методології прогнозування імовірності хибних спрацювань ланцюгів змінного струму із-за пожеж на АЕС.

Науково-дослідні роботи, які проводилися підприємствами атомної енергетики та регулюючим органом – Комісією з питань ядерного регулювання США (U.S. Nuclear Regulatory Commission (USNRC)), забезпечили корисною інформацією про ризики хибного спрацювання електричних ланцюгів змінного струму на АЕС.

Ці результати було враховано в методології прогнозування імовірності хибних спрацювань ланцюгів змінного струму із-за пожеж на АЕС.

Публікація має вузьку спрямованість та не містить аналізу підходів до визначення площі аварійних розливів горючих рідин.

Стаття [11] присвячена чисельному моделюванню контролювання спринклерними системами приміщення дизель-генераторної (UBS (emergency diesel generator)) на АЕС.

У статті [11] зазначено, що приміщення дизель-генераторних АЕС, в яких розташовані баки з дизельним паливом, представляють собою місця з високою частотою виникнення пожеж, які проблематично гасити при їх виникненні. Сильне теплове випромінювання, спричинене пожежею, завдає шкоди обладнанню та бакам з дизельним паливом, що приводить до поширення пожежі.

Стаття містить інформацію стосовно розливу та загорання дизельного пального в приміщеннях дизель-генераторних на АЕС та не стосується питань розливу турбінного масла в машинних залах.

Стаття [12] стосується проектування протипожежного захисту АЕС на основі практичного досвіду. У статті описаний метод протипожежного захисту, заснований на результатах практичного досвіду.

Також описаний метод імовірнісного аналізу пожежної безпеки та протипожежного захисту на АЕС. Описана комбінація протипожежного захисту на основі практичного досвіду та передбаченого проектом. Метод імовірнісного аналізу буде використаний для оцінки придатності та рівня протипожежного захисту на АЕС.

Стаття не поширюється на стадію експлуатації АЕС.

Таким чином, у статтях [1–12] не розглянуто підходи щодо визначення площі розливу турбінного масла у разі розгерметизації технологічного обладнання в результаті аварійної ситуації в машинному залі енергетичного підприємства.

Тому для дослідження особливостей розвитку пожежі під час розливу горючих рідин необхідно мати дані про залежність площі дзеркала рідини, що розлилася в результаті аварії від умов витоку.

**Постановка завдання.** Метою роботи є дослідження аварійного розливу горючих рідин на горизонтальних поверхнях.

Для досягнення поставленої мети потребували вирішення такі завдання: а) дослідити наявні підходи щодо визначення площі аварійних розливів горючих рідин; б) виявити підходи придатні для визначення площі аварійного розливу турбінного масла.

#### Виклад основного матеріалу.

### 1. Дослідження існуючих підходів щодо визначення площі аварійного розливу горючих рідин

Як відомо, розтікання рідини залежить від таких факторів, як витрата, тривалість витоку, в'язкість тощо. Радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях виражається здобутком ступеневих функцій критерія Галілея та критерія гомохронності [13; 14]:

$$\frac{R}{l} = A \cdot G_a^m \cdot H_0^n, \quad (1)$$

де  $R$  – радіус розтікання рідини;

$l$  – визначальний розмір;

$A$  – постійна величина;

$G_a = g \cdot \frac{l^3}{v^3}$  – критерій Галілея ( $g$  – прискорення сили тяжіння,  $v$  – кінематична в'язкість);

$H_0 = g \cdot \frac{\tau^2}{l}$  – перетворений критерій гомохронності ( $\tau$  – тривалість витоку);

$m$  та  $n$  – показники ступеню, які визначаються експериментально.

На підставі формули (1) в [13–14] встановлено залежність радіуса розтікання від тривалості, в'язкості, об'єму та витрати горючої рідини, що витікає під час аварії. Ці залежності описуються рівняннями:

при разовому витоку

$$\frac{R}{\sqrt[3]{V}} = 0,58 \cdot \left(g \cdot \frac{v}{v^2}\right)^{0,08} \left(g \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt[3]{v}}\right)^{0,06} \quad (2)$$

при безперервному витоку

$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q \cdot \tau}} = 0,46 \cdot \left(g \cdot \frac{Q \cdot \tau}{v^2}\right)^{0,08} \left(g \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt[3]{Q \cdot \tau}}\right) \quad (3)$$

де  $R$  – радіус розтікання рідини, м;

$V$  та  $Q$  – швидкість руху та витрата рідини, м<sup>3</sup>/с.

$\tau$  – тривалість витоку, с;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – в'язкість рідини, м<sup>2</sup>/с.

Швидкість витоку рідини з закритої ємкості з тиском  $p$  на поверхні рідини до середовища з тиском  $p_0$  через отвір визначається за формулою (4).

$$V = \varphi \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot [g \cdot H + (p - p_0)]} \quad (4)$$

де  $\varphi$  – коефіцієнт, який враховує втрати напору в отворі;

$\rho$  – густина рідини, що витікає, кг/м<sup>3</sup>;

$H$  – напір в центрі отвору, м;

$\Delta = p - p_0$  – надлишковий тиск в центрі отвору, Па.

Витрата рідини, що витікає з отвору визначається за формулою (5):

$$Q = \mu \cdot S_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{\rho} \cdot [g \cdot H + (p - p_0)]} \quad (5)$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати отвору;

$S_0$  – площа перерізу отвору, м<sup>2</sup>.

Використовуючи формули (2) та (3), можна визначити фактичну площу дзеркала горючої рідини, що розтікається під час аварії.

У [15–19] для оцінки площі розливу під час аварії трубопроводу або розгерметизації резервуару приймалось, що товщина шару нафтопродукту на ґрунті складає  $h_{\min} = (0,1-0,12)$  м. Для моделювання динаміки розтікання використовувалась модель гравітаційного розтікання рідини, яка не враховує в'язкого тертя:

$$\frac{dR}{dt} = \sqrt{(2 \cdot g \cdot [h(t) - h_{\min}])} \quad (6),$$

де  $h(t)$  – товщина шару нафтопродукту в момент часу  $t$ .

Роботи [20–22] присвячені визначенню розливу рідин (води та бензину) на твердих та пористих поверхнях при аваріях технологічних трубопроводів. У статтях містяться результати експериментальних досліджень із вивчення геометричних параметрів розливу легкозаймистих рідин.

У [20–22] для визначення площі розливу легкозаймистих рідин використовувалась експериментальна установка для визначення геометричних параметрів розливу рідини на різних поверхнях.

Площа розлитої рідини визначається за допомогою дзеркального ефекту, використовуючи міліметровий папір.

## 2. Виявлення підходів придатних для визначення площі аварійного розливу турбінного масла

Оскільки в умовах машинного залу під час аварії має місце безперервний виток турбінного масла, для визначення радіусу його розливу доцільно використання формули (3) згідно з [13; 14].

Згідно з [13; 14] геометричні розміри осередку пожежі під час розливу турбінного масла з маслонаповненого обладнання розраховується за формулою, яка аналогічна формулі (3):

$$\frac{R}{\sqrt[3]{Q \cdot \tau}} = 0,46 \cdot \left(g \cdot \frac{Q \cdot \tau}{v^2}\right)^{0,06} \cdot \left(g \cdot \frac{\tau^2}{\sqrt[3]{Q \cdot \tau}}\right)^{0,06} \quad (7)$$

де  $R$  – радіус розтікання турбінного масла, м;

$Q$  – витрата масла, м<sup>3</sup>/с.

$\tau$  – тривалість витoku, с;

$g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;

$v$  – в'язкість масла, м<sup>2</sup>/с.

Витрата турбінного масла при його розливі з маслосистеми змазування та ущільнення валу генератора приймається рівним сумі витрат масла крізь два підшипника та два ущільнення генератора та може складати до 25 л/с [18; 19].

Тривалість витoku масла залежить від часу спрацювання відсічної арматури на маслопроводах. Тривалість витoku масла приймається від 1 до 5 хвилин.

В'язкість масла складає  $28,8 \cdot 10^{-6}$  –  $35,2 \cdot 10^{-6}$  м<sup>2</sup>/с при  $t=40^\circ\text{C}$  [18; 19].

Приймається, що діаметр отвору чисельно дорівнює діаметру маслопроводу.

Витрата масла, яке витікає з отвору в маслопроводі, визначається за формулою (8):

$$Q = \mu \cdot S \cdot \sqrt{2 \cdot \frac{\Delta P}{\rho}} \quad (8),$$

де  $\mu$  – коефіцієнт витрати отвору, (згідно з [18-19]=0,6);

$S$  – площа перерізу отвору, м<sup>2</sup>;

$\Delta P$  – надлишковий тиск в трубопроводі, Па;

$\rho$  – густина масла, що витікає, кг/м<sup>3</sup>, (згідно з [18-19]=0,9 кг/м<sup>3</sup>).

Для реальних діаметрів маслопроводів відомі відповідні значення надлишкового тиску в трубопроводі. Наприклад, для маслопроводу діаметром 50 мм,  $\Delta P=0,3$  МПа.

Значення в'язкості масла буде змінюватися залежно від температури масла. Так, у нормальному режимі масло обертається в турбогенераторі при робочій температурі 40-50°C. Під час витoku та горіння масла його температура буде значно

зростати, і в'язкість буде зменшуватися. Це неминуче вплине на збільшення площі його розливу.

## 3. Обговорення результатів дослідження аварійного розливу горючих рідин на горизонтальних поверхнях

Мета роботи вирішувалась шляхом застосування аналітичного методу досліджень. Для досягнення поставленої мети проведено аналіз підходів щодо визначення площі аварійного розливу горючих рідин. Показано, що радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях виражається здобутком ступеневих функцій критерія Галілея та критерія гомохронності. Наведено залежність радіуса розтікання від тривалості, в'язкості, об'єму та витрати горючої рідини, що витікає під час аварії. Ці залежності описуються відповідними рівняннями для випадків разового та безперервного витоків. Наведено визначення таких параметрів, як радіус розтікання горючих рідин на горизонтальних поверхнях, швидкість витoku рідини з закритої ємкості через отвір, витрата рідини, що витікає з отвору.

Представлено модель гравітаційного розтікання рідини для моделювання динаміки розтікання.

Новизна роботи полягає у виявленні підходів, придатних для визначення площі аварійного розливу турбінного масла під час його розтікання з отвору напірного маслопроводу, які є найбільш наближеними до реальних умов розтікання турбінного масла в машинному залі енергетичного підприємства.

Слід зазначити, що полум'я рідини, яка розлита на горизонтальній площині та горить, за своєю структурою не відрізняється від полум'я, що виникає під час горіння рідин в пальниках та резервуарах. Тому з практичної точки зору, вивчення процесу горіння органічних рідин, в тому числі турбінного масла в умовах аварійного розливу доцільно проводити на моделях, які являють собою циліндричні пальники різного діаметру. При цьому, на відміну від проливів, умови проведення дослідів становляться строго контрольованими, а отримані результати можуть бути поширені на умови аварійного розливу.

Також під час визначення площі аварійного розливу турбінного масла необхідно додатково дослідити залежність в'язкості масла від його температури та вплив в'язкості масла на площу його розтікання.

Результати роботи сприятимуть виявленню закономірностей виникнення та поширення пожеж на турбогенераторах машинних залів атомних і

теплових електростанцій за різних сценаріях аварій, а також встановленню механізмів припинення горіння в захищеній зоні, що є важливою науковою задачею, розв'язання якої створить передумови підвищення ефективності систем пожежогасіння турбогенераторів в машинних залах.

Недоліками роботи є відсутність аналізу статистики найбільш великих аварій технологічних трубопроводів на об'єктах енергетики та визначення основних причин їх виникнення.

**Висновки.** Досліджено наявні підходи щодо визначення площі аварійного розливу горючих рідин на горизонтальних поверхнях.

Встановлено, що для розрахунку площі аварійного розливу турбінного масла під час аварійної ситуації на напірному маслопроводі в машинному залі енергопідприємства доцільно використовувати підходи, наведені в [13; 14]. Виявлені підходи справедливі для безперервного витоку турбінного масла. При цьому встановлено, що витрата турбінного масла при його розливі з маслосистеми змазування та ущільнення валу генератора приймається рівною сумі витрат масла крізь два підшипника та два ущільнення генератора та може складати до 25 л/с.

Тривалість витоку масла залежить від часу спрацювання відсічної арматури на маслопроводах та приймається від 1 до 5 хвилин.

### Список літератури:

1. O. Keski-Rahkonen, E. Eloranta, R. Huhtanen, Use of numerical simulation computer codes to fire problems in nuclear power plants in Finland, *Nuclear Engineering and Design* 125 (2012). P. 377–382.
2. М.М. Семерак, А.В. Субота, В.М. Новак, В.М. Байтала Математичне моделювання вогнестійкості несучих металевих конструкцій машинних залів електростанцій. *Пожежна безпека: Збірник наукових праць*. Львів : ЛДУБЖД, 2012. № 21. С. 7–11.
3. V.F. Niolette, S.P. Nowlen, Fire models for assessment of nuclear power plant fires, *Nuclear Engineering and Design* 125 (2011). P. 389–394.
4. Mardyros Kazarians, George Apostolakis, On the fire hazard in nuclear power plants, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM 87185, USA, *Nuclear Engineering and Design* 47 (2012). P. 157–168.
5. R.W. Hockenbury, R.H.V. Gallucci, D.J. Parker, M.L. Yeater, Occurrence rates of fires in nuclear power plants, *Nuclear Engineering and Design* 66 (2013). P. 233–240.
6. W.E. Vesely, Nuclear Power Plants: A Unique Challenge to Fire Safety, Department of Nuclear Engineering, Rensselaer Polytechnic Institute, Troy, NY 12181, USA, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, USA *Fire Safety Journal* 19 (2011). P. 3–18.
7. Steven P. Nowlen, Development of probabilistic models to estimate fire-induced cable damage at nuclear power plants, Division 6419, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico 87185, USA, *Nuclear Engineering and Design* 239 (2013). P. 1113–1127.
8. Genebelin Valbuena I, Mohammad Modarres, Performance-based fire fighting strategies for confined fire zones in nuclear power plants, University of Maryland, Department of Mechanical Engineering, College Park, MD 20742, USA, *Progress in Nuclear Energy* 62 (2013).
9. Moon-Hak Jee, Chan-Kook Moon, Hyeong-Taek Kim, Analysis of the effect of an external fire on the safety operation of a power plant, Nuclear Safety Laboratory, KHNP Central Research Institute, 70-1312-gil, Yuseong-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-343, Republic of Korea, article in press, *Fire Safety Journal* 41 (2014). P. 486–490.
10. Peter Vidmar, Stojan Petelin, An integrated methodology to predict the likelihood of spurious actuation of AC circuits due to fires in commercial nuclear power plants, Faculty of Maritime Studies and Transportation, University of Ljubljana, Pot pomorscakov 4, Portoroz, Slovenia, *Fire Safety Journal* 46 (2011). P. 388–396.
11. Raymond H.V. Gallucci, Naeem Iqbal, Numerical Simulation Study on Sprinkler Control Effect in UBS Fuel Tank Room of Nuclear Power Plants, Office of Nuclear Reactor Regulation, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC 20555-0001, USA, *Procedia Engineering* 43 (2012). P. 276–281.
12. Shi Qiang, Ma Rongyi, Li Juan, Zuo Jiaxu, Zhang Chunming, Chai Jianshe, Performance-Based Fire Protection in the Nuclear Power Plant Design, Capital University of Economics and Business, No. 121 Zhangjialu, Fengtai District, Beijing 100070, China, Nuclear and Radiation Safety Center, No. 54 Hongliannancun, Haidian District, Beijing 100082, China, *Procedia Engineering* 43 (2012). P. 318–323.
13. Van Hees P. Validation and verification of fire models for fire safety engineering. *Procedia Eng.* 2013; 62:154–68.
14. McGrattan K, Peacock R, Overholt K. Validation of Fire Models Applied to Nuclear Power Plant Safety. *Fire Technol* [Internet]. 2016;52(1):5–24. URL : <http://dx.doi.org/10.1007/s10694-014-0436-z>.
15. S. E. Magnusson, and s. Thelandersson, A Discussion of Compartment Fires, *Fire Technology*, Vol. 10, No. 3 (pp. 228- 246), August 2011. A 2.
16. R. S. Alger and s. J. Wiersma, Ship Fire Characteristics Part I-Sealed Compartments, Naval Surface Weapons Center Report NSWC/WOL TR 76-125, Dahlgren, VA, November 2014.



17. V. Babrauskas and R. B. Williamson, Post-Flashover Compartment Fires, University of California-Berkeley Report UCB FRG 75-1, Berkeley, CA, December 2011.
18. A. F. Robertson and D. Gross, Fire Load, Fire Severity, and Fire Endurance, Fire Test Performance ASTM STP 464, American Society for Testing and Materials (pp. 3-29), 2015.
19. R. Baldwin and P. H. Thomas, Passive and Active Fire Protection- The Optimum Combination, Fire Technology, Vol. 10, No. 2 (pp. 140-146), May 2011.
20. T. T. Lie, Characteristic Temperature Curves for Various Fire Severities, Fire Technology, Vol. 10, No. 4 (pp. 315- 326), November 2013.
21. T. Z. Harmathy, Designers Option- Fire Resistance or Ventilation, 6th c. I. B. Congress, Budapest, 2011.
22. AS. T. E. Waterman, Scaling of Fire Conditions Supporting Room Flashover, Illinois Institute of Technology Research Institute Report M 6170, Chicago, IL, December 2013.

**Semichaevsky S.V., Yakimenko M.L., Osadchuk M.V. REGARDING EMERGENCY SPILLAGE OF FLAMMABLE LIQUIDS**

*The factors on which the process of liquid spreading is indicated are indicated. The existing approaches to determining the area of emergency spillage of flammable liquids are analyzed, including the features of determining the area of spill of turbine oil, which flows from the opening of the pressure pipeline in case of an accident in the engine room of the power plant. It is shown that the radius of spread of combustible liquids on horizontal surfaces is expressed by the product of the power functions of the Galileo criterion and the homochrony criterion. The definition of such parameters as the radius of spread of flammable liquids on horizontal surfaces, the rate of leakage of liquid from a closed container through the hole, the flow rate of liquid flowing from the hole. Particular attention is paid to the calculation of the geometric dimensions of the fire during the bottling of turbine oil from oil-filled equipment. It is shown that the flow of turbine oil when it is poured from the oil system of lubrication and sealing of the generator shaft is taken equal to the sum of oil consumption through two bearings and two seals of the generator and can be up to 25 l/s. It is noted that when the combustible liquid spreads on a horizontal surface, the heat flux from the fire will be determined by the type of combustible liquid and the parameters of the spill. The greatest difficulty for assessment is the shape and size of the spill, as they depend on the terrain, the nature of the surface and the type of liquid. Approaches have been established that should be used to calculate the area of emergency turbine oil spill during an emergency situation on the pressure oil pipeline in the engine room of the power plant. It has been established that when determining the area of an emergency spill of turbine oil, it is necessary to investigate the dependence of the oil viscosity on its temperature and, accordingly, the effect of oil viscosity on its spreading area. The necessity of conducting experimental researches on pouring and burning of oil on a concrete or metal surface, which most corresponds to the conditions of the engine room, has been determined. Emphasis is placed on the need to study the dependence of the specific mass rate of combustion of turbine oil on its initial temperature and temperature during combustion.*

**Key words:** flammable liquid, spill area, surface, turbine oil.

УДК 621.311.4.031

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/34>

**Сінчук О.М.**

Криворізький національний університет

**Бойко С.М.**

Криворізький національний університет

**Жуков О.А.**

Вінницький національний технічний університет

**Риков Г.Ю.**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського

**Іванченко Л.В.**

Кременчуцький льотний коледж

Харківського національного університету внутрішніх справ

## **КОМПЛЕКСНЕ ВИКОРИСТАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ДЖЕРЕЛАМИ РОЗОСЕРЕДЖЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ В УМОВАХ ГІРНИЧОРУДНИХ ПІДПРИЄМСТВ**

*Державна політика в електроенергетиці, окрім іншого, сприяє розширенню «географії» виробництва електричної енергії на базі альтернативних відновлюваних джерел енергії та розвитку розподіленої генерації й обладнання для акумулювання енергії, мінімізації витрат на постачання електричної енергії, забезпечення умов та застосування заходів для розвитку енергоефективності в електроенергетиці та мінімізації негативного впливу на навколишнє природне середовище. Відповідно до даних державної статистики регіони України, у яких розвивається гірничорудна промисловість, є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів серед регіонів України, мають граничні величини споживання електричної потужності. Незважаючи на тенденцію до зменшення, яка спостерігається останніми роками, частка споживання промисловістю України електричної енергії становить 42% від загальнодержавного обсягу електроспоживання. Особливістю вітчизняної промисловості є наявність у ній енергоємних підприємств, зокрема гірничовидобувної галузі, які споживають близько половини електричної енергії всіх галузей промисловості. Тільки в Дніпропетровській області, що є найбільш енергоємною серед інших, енергоємність підприємства гірничовидобувної галузі становить майже 30% від усіх вітчизняних енергоємних підприємств. Аналіз досягнень сучасної енергетики показує, що децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Результати аналізу технічного потенціалу впровадження водної енергетики засвідчили доцільність запровадження водневої економіки, широкі можливості для цього, а також вигоду від інфраструктури, з'єднаної з ЄС. Актуальними питаннями є розробка законодавства та стандартів із виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, реалізація пілотного проекту з виробництва «зеленого» водню, розвиток інфраструктури транспортування водню. У статті проведена оцінка базоутворювального потенціалу та комплексного використання власних енергоресурсів джерел розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств. Запропоновано під час упровадження джерел розосередженої генерації використовувати комплексний підхід із застосуванням технологій водневої енергетики, що забезпечить підвищення ефективності їх використання та інтеграцію в стратегію сучасної енергетики.*

**Ключові слова:** розосереджена генерація, енергетичне обладнання, воднева енергетика, електропостачання гірничорудних підприємств, енергетичний баланс підприємства.

**Постановка проблеми.** Згідно з даними енергокомпанії, уряди країн та всіх жителів планети сприяти виробництву 75% світової електричної енергії з відновлюваних джерел вже до 2030 року.

Відповідно до Закону України «Про ринок електричної енергії» державна політика в електроенергетиці, окрім іншого, сприяє розширенню «географії» виробництва електричної енергії на базі альтернативних відновлюваних джерел енергії та розвитку розподіленої генерації і обладнання для акумулювання енергії, мінімізації витрат на постачання електричної енергії, забезпечення умов та застосування заходів для розвитку енергоефективності в електроенергетиці, мінімізації негативного впливу на навколишнє природне середовище. Технологічне об'єднання енергії відновлювальних джерел енергії і енергії вуглеводневого палива в одній системі має суттєві техніко-економічні переваги [1].

Водночас стратегія розвитку енергетики України, як і стратегія її енергетичної безпеки в комплексі, передбачає зменшення енергоємності ВВП. «Дорожня карта» цього спрямування лежить через шлях рішень зменшення енергоємності продукції, котра виробляється підприємствами енергоємних галузей промисловості. Саме цими видами підприємств споживається більше 20% від загального обсягу споживання державою. Одним із локальних і досить ефективних напрямів може стати впровадження потенціалу власних енергоресурсів цих видів підприємств. Вагомим складником енергоємних підприємств є підприємства металургійної галузі та гірничорудної як її сировинного складника.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідження питань формування електроенергетичних систем із джерелами розосередженої генерації знайшли відображення в роботах багатьох учених: Д. де Рензо, Я.І. Шефтера, Є.Р. Абрамовського, О.В. Кириленка, С.О. Кудрі, Н.М. Мхітаряна, Г.І. Денисенка, П.Ф. Васька, В.М. Головка, П.П. Пекура, О.С. Яндульського, В.В. Павловського, А.К. Шидловського, А.Ф. Жаркіна, В.Ф. Сивокобиленка, С.П. Денисюка, С.В. Дубовського, В.А. Попова, П.Д. Лежнюка, О.М. Сінчука, В.В. Кирика, М.В. Приймака та ін. [1–11].

**Постановка завдання.** Метою статті є оцінка базуєтворювального потенціалу та комплексного використання власних енергоресурсів джерел розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Гірничорудна промисловість – наразі базова у формуванні надходжень до валютних запасів держави, володіє значним (притаманним саме їй) енергетичним потенціалом, котрий логічно та необхідно використовувати у формуванні влас-

них автономних джерел живлення, які повинні не тільки компенсувати частку енергії від централізованих структур живлення, а й забезпечити значну безпечну життєдіяльність цих стратегічно важливих видів підприємств. Сучасні гірничорудні підприємства у сфері енергоспоживання характеризуються тим, що майже 90% становить електроенергетика. До того ж, як свідчать дослідження, логічний вихід із такої ситуації (шляхом зменшення обсягів споживання електричної енергії) не є реальним для його реалізації, оскільки технологія видобутку корисних копалин взагалі і залізорудної сировини зокрема передбачає постійне збільшення глибини видобутку, що тягне за собою проблему збільшення рівнів споживання електроенергії і нівелює локальні спроби зменшення обсягів споживання, оскільки тривіальні технічно-технологічні заходи щодо цього процесу мають вкрай обмежену ефективність [2].

Аналіз досягнень сучасної енергетики показує, що децентралізовані енергосистеми з використанням джерел розосередженої генерації можуть бути надзвичайно прибутковою сферою для капіталовкладень, якщо є можливість розміщувати джерела генерації енергії поблизу споживачів. Загалом, витрати на передання енергії сягають 30% від вартості її вироблення [3].

Відповідно до даних державної статистики регіони України, у яких розвивається гірничорудна промисловість, є одними з найбільших споживачів паливно-енергетичних ресурсів серед регіонів України, мають граничні величини споживання електричної потужності, а саме: Дніпропетровська область – 2 800–3 000 МВт у місяць, Запорізька – 1 000–1 100 МВт у місяць, Полтавська – 710–750 МВт у місяць [4].

Тому питання сталого розвитку енергетики є вкрай важливим.

Проведений аналіз енергоспоживання суб'єктами гірничорудних підприємств за видами технології видобутку-переробки корисних копалин демонструє, що оплата енергетичних ресурсів за рік становить 48% (електроенергія, паливо, природний газ), із яких найбільш значущою є електроенергія [4].

Виходячи з цього, можна зробити висновок, що визначальним складником енергоспоживання гірничорудних підприємств є саме споживання електричної енергії.

Незважаючи на тенденцію до зменшення, яка спостерігається останніми роками, частка споживання промисловістю України електричної енергії становить 42% від загальнодержавного обсягу

електроспоживання. Особливістю вітчизняної промисловості є наявність у ній енергоємних підприємств, зокрема гірничовидобувної галузі, які споживають близько половини електричної енергії всіх галузей промисловості. Тільки у Дніпропетровській області, що є найбільш енергоємною серед інших, енергоємність підприємств гірничовидобувної галузі становить майже 30% від усіх вітчизняних енергоємних підприємств, що перебувають на контролі «Держенергонагляду» [5].

Так, за даними Міністерства енергетики України, в січні-серпні 2020 року обсяг виробництва електроенергії енергогенерувальними підприємствами, які входять до об'єднаної енергетичної системи України, досяг 96 337,5 млн кВт·год, що на 6 759,0 млн кВт·год (на 6,6%) менше порівняно з відповідним періодом 2019 року. При цьому за 8 місяців 2020 року виробництво електроенергії ВДЕ (ВЕС, СЕС, біомаса) на 117,1% більше, ніж за відповідний період минулого року [6].

За даними Міністерства енергетики України, за січень-серпень 2020 року спостерігалось зменшення споживання, що на 4,5% менше, ніж за відповідний період минулого року. Споживання електроенергії зменшили промислові споживачі (на 4,9%), зокрема металургійна (на 7,0%), харчова та переробна (на 3,3%) промисловості [6].

Станом на 1 серпня 2019 року на території Дніпропетровської області побудовані 6 біогазових комплексів (у т.ч. на біогазі з полігонів ТПВ), 3 із яких отримали «зелений тариф», 12 – експлуатують наземні та дахові сонячні електростанції.

Споживання великої кількості паливно-енергетичних ресурсів та висока частка викопного палива в енергетичному балансі області (разом із застарілими і неефективними системами очищення димових газів) призводять до високих рівнів забруднення атмосферного повітря у промислових зонах.

Дніпропетровська область має одні з найбільших в Україні показники викидів забруднювальних речовин в атмосферне повітря стаціонарними джерелами забруднення. Найбільше викидів утворюється у Кривому Розі, Зеленодольську, Кам'янському та Дніпрі, де розташовані найбільші енергетичні та металургійні підприємства. Основними забруднювальними речовинами є оксид вуглецю, метан, діоксид сірки та діоксид азоту.

Одними з найбільших забруднювачів атмосферного повітря в області є саме підприємства енергетичного комплексу, як-от теплові електростанції та ТЕЦ. Ураховуючи це, в межах модернізації енергогенерувальних потужностей, крім

підвищення енергоефективності та зниження питомого споживання палива на виробництво електроенергії, актуальним є встановлення сучасних систем очищення димових газів, які дозволять суттєво скоротити викиди забруднювальних речовин в атмосферне повітря [6].

Частка відновлюваних джерел енергії у загальній встановленій потужності електрогенерувального обладнання, розташованого на території області, не перевищує 1%. Водночас є великий потенціал для будівництва нових об'єктів [7].

Активний розвиток виробництва енергії з відновлюваних джерел дозволить додатково зменшити викиди забруднювальних речовин та парникових газів, а також посилити енергетичну безпеку регіону.

Таким чином, для сфери виробництва електричної енергії пріоритетами є підвищення ефективності виробництва, диверсифікація палива (використання вугілля газової групи та біомаси), а також зниження викидів забруднювальних речовин за рахунок установаження систем очищення димових газів та розвитку відновлюваних джерел енергії.

Ефективне споживання енергетичних ресурсів та використання енергії відновлюваних джерел сприятиме не тільки сталому енергозабезпеченню, а й поліпшенню стану довкілля і зменшенню ризиків для здоров'я населення.

Станом на 01.07.2019 р. частка сумарної потужності теплогенерувального обладнання на альтернативних видах палива в області становить 17% відсотків до загальної потужності теплогенерувального обладнання регіону [8].

Метою розвитку сучасної енергетики є пошук надійного та якісного (але при цьому дешевого та екологічно чистого) джерела енергії [9]. Як наслідок, під час вибору джерела енергії оптимальним рішенням за багатьма критеріями (енергетичними, економічними, екологічними, соціальними) усе частіше стають відновлювальні джерела енергії.

В Україні альтернативна енергетика цілком може забезпечити значну частку енергоспоживання [2].

Для отримання ефективного результату необхідно інтегрувати в енергетичну мережу розосередженої генерації комбінації енергетичних установок, які для роботи використовують різні нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії. Для електроенергетики така інтеграція (за умови наявності накопичувачів енергії та пристроїв силової електроніки) має забезпечити належну якість електроенергії, надійність, безперервність і безперебійність електропостачання [10]. Незважаючи на

величину інсоляції в місці, де встановлено фотоелектричну установку, або наявність вітру над місцевістю, де розташовано вітроенергетичний парк, або витрати води в річці, де працює гідроагрегат, споживачі завжди зможуть отримати необхідну кількість електроенергії відповідної якості.

Однак в Україні посилюється дисбаланс між потенціалом генерувальних підприємств і можливостями щодо розподілу і споживання електроенергії, що неминуче призводить до виникнення технічних обмежень як у генерації, так і в розподілі електроенергії.

Актуальність упровадження розосередженої генерації зумовлена необхідністю збільшення частки маневрових потужностей, зменшення втрат електроенергії та модернізації електричних мереж.

До основних питань упровадження концепції Smart Grid в Україні [5] можна уналежнити визначення основних напрямів розвитку генерації, передання і розподілу, збуту, споживання та інноваційного розвитку української електроенергетики, а саме:

- найбільшу частку генерувальних потужностей зосереджено в центральних регіонах країни, що призводить до ситуації, коли окремі регіони стають повністю енергозалежними. Наявність власного джерела енергії дозволить споживачеві ефективніше контролювати цей процес і отримувати більш дешевий продукт;

- раціональна повна або часткова перебудова розподільних мереж приводить до зниження найбільшого складника технологічних втрат;

- в Україні є промислова база, здатна до виробництва (чи його організації) устаткування майже всіх видів генерувальних потужностей, зокрема для малої енергетики;

- Україна має досить сприятливі умови для використання основних видів поновлюваних джерел енергії та альтернативних видів палив, зокрема місцевих, що також належатимуть до малої енергетики.

Безумовно, Енергетична стратегія України до 2030 року [2] тримає курс на раціональну «мінімі-

зацію» енергетики. Так, нею передбачено суттєве збільшення частки використання поновлюваних джерел енергії та позабалансових енергетичних ресурсів до 57,73 млн т у.п. на рівні 2030 року (порівняно з 15,51 млн т у.п., використаними у 2005 році (збільшення у 3,72 раза)) [2].

Водночас відбувається збільшення виробництва електроенергії блоковими станціями промислової та комунальної енергетики до 9,85 млрд кВт/год. у 2010 р.; 10,8 – у 2015 р.; 11,4 – у 2020 р.; 13,5 млрд кВт/год – у 2030 р. [2].

Результати аналізу технічного потенціалу впровадження водної енергетики засвідчили доцільність запровадження водневої економіки, широкі можливості для цього, а також вигоду від інфраструктури, з'єднаної з ЄС. Відповідно до цілей Енергетичної стратегії України на період до 2035 року щодо встановлення потужностей ВЕС та СЕС середньорічне виробництво «зеленого» водню може становити 5,5 млрд м<sup>3</sup> [11].

Залишаються актуальними питання розробки законодавства та стандартів із виробництва, транспортування, зберігання та використання водню, реалізація пілотного проекту з виробництва «зеленого» водню, розвиток інфраструктури транспортування водню.

Отож, перспективних напрямів для видобутку водню багато, а видобуток водню в Україні за допомогою розосередженої генерації, зокрема в умовах гірничорудних підприємств, не просто можливий, а корисний для енергосистеми й енергетичного майбутнього України.

**Висновки.** У статті проведена оцінка базового потенціалу та комплексного використання власних енергоресурсів джерел розосередженої генерації в умовах гірничорудних підприємств.

Запропоновано під час упровадження джерел розосередженої генерації використовувати комплексний підхід із застосуванням технологій водневої енергетики, що забезпечить підвищення ефективності їх використання та інтеграцію в стратегію сучасної енергетики.

#### Список літератури:

1. World Energy Outlook. 2020, OECD/IEA, Paris.
2. Енергетична стратегія України на період до 2035 р. // Сайт Міністерства енергетики та вугільної промисловості України. URL: <http://mpe.kmu.gov.ua>.
3. Денисюк С.П., Дерев'янюк Д.Г., Колесник П.С. Оптимізація режимів електропостачання в локальних системах з розосередженою генерацією. *Збір. праць Ін-ту електродинаміки НАН України*. Спец. вип. 2011. С. 30–37.
4. Buchholz B., Styczynski Z. Smart Grids Fundamentals and Technologies in Electricity Networks, Springer 2014. 396 p.

5. Smart Power Grid. Talking about a Revolution. IEEE Emerging Technology portal, 2009.
6. Праховник А.В. Малая энергетика: распределенная генерация в системах энергоснабжения. Киев : «Освіта України», 2007. 464 с.
7. Білолід В.Д., Таранець К.В. Мала енергетика та її значення в регіональних системах майбутнього. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 18. С. 40–47.
8. Бойко С.М. Теоретичні засади формування електроенергетичних систем з джерелами розосередженої генерації гірничорудних підприємств. Монографія, під редакцією доктора техн. наук, професора О.М. Сінчука. Кременчук, 2020. 263с.
9. Sinchuk O. M., Boiko S. M., Karamanyts F. I., Kozakevych I. A., Baranovska M. L., and Yalova A. M. Aspects of the problem of applying distributed energy in iron ore enterprises electricity supply systems. Warsaw, Poland: ISENCT, 2018 120 p.
10. Реєстр альтернативних видів палива Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України (Держенергоефективності). Київ, 2011. 42 с.
11. Кудря С.О., Морозов Ю.П., Кузнецов М.П. Дослідження ефективності комбінованого використання енергії вітру, сонця і теплоти землі для отримання водню при електролізі води. *Водень в альтернативній енергетиці та новітніх технологіях*: тези доп. наукової звітної сесії НАН України. Київ, 2013. С. 30.

**Sinchuk O.M., Boiko S.M., Zhukov O.A., Rukov G.Yu., Ivanchenko L.V. COMPREHENSIVE USE OF ELECTRIC POWER SYSTEMS WITH SOURCES OF DISTRIBUTED GENERATION IN THE CONDITIONS OF MINING ENTERPRISES**

*State policy in the electricity sector, among other things, promotes the expansion of the “geography” of electricity production based on alternative renewable energy sources and the development of distributed generation and equipment for energy storage, minimizing electricity supply costs, providing conditions and implementing measures for energy efficiency in electricity and minimizing the negative impact on the environment. Meanwhile, according to state statistics, the regions of Ukraine in which the mining industry is developing are one of the largest consumers of fuel and energy resources among the regions of Ukraine, primarily have the limits of electricity consumption. Meanwhile, despite the declining trend observed in recent years, the share of Ukrainian electricity consumption is 42% of national electricity consumption. A feature of domestic industry is the presence of energy-intensive enterprises, including the mining industry, which consume about half of the electricity of all industries. Only in Dnipropetrovsk region, which is the most energy-intensive among others, the energy intensity of the mining industry, which is almost 30% of all domestic energy-intensive enterprises. Analysis of the achievements of modern energy shows that decentralized energy systems using distributed generation sources can be an extremely profitable area for investment, if it is possible to place energy sources near consumers. The results of the analysis of the technical potential of the introduction of hydropower have shown the feasibility of introducing a hydrogen economy, the wide opportunities for this, as well as the benefits of infrastructure connected to the EU. Meanwhile, the development of legislation and standards for the production, transportation, storage and use of hydrogen, the implementation of a pilot project for the production of “green” hydrogen, the development of hydrogen transportation infrastructure are relevant. The article evaluates the base-forming potential and integrated use of own energy resources of sources of dispersed generation in the conditions of mining enterprises. It is proposed to use a comprehensive approach with the use of hydrogen energy technologies in the introduction of distributed generation sources, which will increase the efficiency of their use and integration into the strategy of modern energy.*

**Key words:** dispersed generation, power equipment, hydrogen energy, power supply of mining enterprises, energy balance of the enterprise.

УДК 533.601:662.61  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/35>

**Черноусенко О.Ю.**

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

**Бутовський Л.С.**

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

**Грановська О.О.**

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

**Мороз О.С.**

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

**Старченко О.С.**

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

## ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИФУЗІЙНО-СТАБІЛІЗАТОРНОГО ПАЛЬНИКА ПІД ЧАС СПАЛЮВАННЯ ГАЗУ В ЗАБАЛАСТОВАНОМУ ОКИСНЮВАЧІ

*У статті представлено результати експериментальних досліджень характеристик мікродифузійних стабілізаторних пальникових пристроїв вторинного підігріву повітря під час спалювання газо-подібного палива в умовах зменшеного вмісту кисню в повітряному потоці. Наведені дані враховують вплив на сталість горіння за умов багатого зриву факела режимних і конструктивних факторів, що дозволяє здійснювати попередній розрахунок пальникового пристрою. Показано, що сталість факела на режимі багатого зриву погіршується у разі зменшення вмісту кисню в окиснювачі, зниження температури окиснювача і підвищення швидкості повітряного потоку. Зменшити величину коефіцієнта надлишку повітря на режимі багатого зриву можна шляхом підвищення коефіцієнта затінення стабілізаторної решітки і збільшення розміру стабілізатора. Слід враховувати те, що під час збільшення ширини стабілізатора збільшується довжина зони горіння. Також зменшити коефіцієнт надлишку повітря на режимі багатого зриву можна за рахунок перфорації бокових стінок стабілізатора. Суттєво розширити діапазон сталої роботи пальникового пристрою під час спалювання газу в окиснювачі, забаластованому продуктами згорання першого ступеня підігріву, можна шляхом подання додаткового чистого повітря в зону рециркуляції за стабілізатором через перфорацію в стабілізаторі. При цьому підвищується повнота вигорання палива в камері.*

**Ключові слова:** стабілізаторний пальник, забаластований окиснювач, багатий зрив, коефіцієнт надлишку повітря.

**Постановка проблеми.** Одним із головних напрямів термодинамічного форсування паротурбінних (далі – ПТУ) і газотурбінних (далі – ГТУ) установок є використання когенераційно-утилізаційних технологій на базі ГТУ у великій і малій енергетиці. За рахунок цього досягається економія первинних енергоресурсів і зменшення витрат на виробництво механічної, електричної і теплової енергії шляхом зниження витрат дефіцитного і коштовного природного газу.

Перспективність використання когенераційно-утилізаційних технологій на базі ГТУ визна-

чається, як правило, можливістю використання багатьох варіантів компоновки енергетичних і теплосилових установок, які характеризуються порівняною простотою та малими затратами. Найбільш простими і маловитратними схемами є встановлення в газоході ГТУ теплофікаційних теплообмінників, підігрівачів мережної води, котлів-утилізаторів тощо [1, с. 25; 2, с. 51, 3, с. 0103.1, 4, с. 323]. Із метою підвищення коефіцієнта корисної дії використовується двоступеневе спалювання палива [5, с. 11]. Методи спалювання

можуть бути використані у разі знешкодження шкідливих викидів різних технологічних виробництв [6, с. 190].

Загальними умовами роботи пальникових пристроїв, які використовуються у разі реалізації розглянутих схем камер згорання і топок, є наявність баластування повітряного потоку продуктами згорання після основних камер згорання підігріву повітря першого ступеня. При цьому слід ураховувати, що продукти згорання після основної камери частково охолоджуються під час проходження через проточну частину газової турбіни. Ці фактори значно впливають на сталість факела в пальникових пристроях і ефективність процесу горіння палива.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Під час розгляду можливої конструктивної реалізації допалювальних пальникових пристроїв другого ступеня підігріву повітря слід брати до уваги, що такі камери повинні забезпечувати рівномірне поле температур газів на виході, стабільне горіння під час зміни параметрів повітряного потоку – швидкості і температури, в широкому діапазоні режимів, а також високий ступінь вигорання палива.

Аналіз конструкцій пальникових пристроїв, які використовуються в камерах вторинного підігріву повітря, показує, що здебільшого використовуються дифузійно-стабілізаторні пальникові пристрої, які становлять систему кутових погано-обтічних тіл – стабілізаторів, які обтікаються повітряним потоком. Паливо на горіння подається дискретними струменями в зону рециркуляції за стабілізатором з окремих колекторів або з порожнини самого стабілізатора [7, с. 325; 8, с. 109; 9, с. 158].

У цих пальникових пристроях завдяки високій інтенсивності масообмінних процесів у зоні рециркуляції й аеродинамічному сліду за стабілізатором, незважаючи на дифузійний принцип подачі палива, процеси горіння наближаються до характеристик горіння попередньо перемішаних сумішей палива і повітря. Водночас ступінь перемішування в зоні рециркуляції не є досконалим завдяки дискретній подачі палива, тому робочий процес у таких пальникових пристроях має ознаки дифузійності, тобто працюють у широкому діапазоні режимів щодо зміни коефіцієнта надлишку повітря і швидкості повітряного потоку [7, с. 325].

Стабілізаторні пальникові пристрої вторинного підігріву вихідних газів використано у вигляді системи кутових стабілізаторів – «Блоку допалювальних пристроїв» (далі – БДУ) перед мережними підігрівачами в теплофікаційній ГТУ типу ГТ-25-700 ЛМЗ на Якутській ГРЕС [10, с. 48]. Під-

вищення температури вихідних газів дозволило приблизно удвічі збільшити теплову потужність установки. Такі БДУ також було встановлено на турбінах ГТ-35-770 ХТГЗ. Пальникові пристрої стабілізаторного типу розроблено для котла-утилізатора ПГУ-800 [11, с. 55], а також фірмою Джeneral Електрик для котлів-утилізаторів [12, с. 14].

Характерною конструктивною особливістю таких пальникових пристроїв є те, що вони розраховувались для роботи з порівняно невеликим підігрівом повітря. Крім того, з конструктивних міркувань у наведених конструкціях використовувались стабілізатори щодо великих розмірів  $V_{ст} = 180$  мм; 360 мм, що призводить до значного збільшення довжини факела, а також довжини, яка необхідна для вирівнювання поля температур газів у топці. У роботах відсутні систематизовані дані щодо впливу конструктивних і режимних параметрів, як-от швидкості і температури потоку, а також умісту кисню в окиснювачі на характеристики робочого процесу.

**Постановка завдання.** Метою статті є визначення впливу на характеристики дифузійно-стабілізаторних пальникових пристроїв режимних (температура та швидкість потоку окиснювача, коефіцієнт надлишку окиснювача) і конструктивних (ширина стабілізатора, коефіцієнт затінення, система газороздачі) факторів під час роботи на зниженому вмісті кисню в окиснювачі.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Відповідні дослідження були проведені на стенді, схема якого показана на рис. 1. Повітря від нагнітача (на схемі не показано) з температурою  $t_n^{вх}$  подається до вхідного дифузора 1, за яким розташовується камера попереднього підігріву повітря 2 розміром у світлі 400x400 мм, де відбувається прямий підігрів повітря шляхом спалювання газу з витратою  $G_r^{лст}$  до необхідної температури. Між дифузорею та камерою попереднього підігріву розташована вирівнювальна решітка 3.

Повітря на вході в стенд підігрівується в регенеративному підігрівачі до температури  $t_n^{вх}$ . Для прямого підігріву повітря використовується фронтний пристрій 4 дифузійно-стабілізаторного типу, встановлений у камері попереднього підігріву повітря. Після камери попереднього підігріву повітря продукти згорання проходять вирівнюючи ділянку попереднього підігріву повітря 5, яка футерована зсередини кремнеземним волокном КВ-11. Далі розташована ділянка 6, у якій продукти згорання проходять через систему трубок охолоджувача продуктів згорання кількістю 200 шт. із внутрішнім діаметром 16 мм, що



омиваються ззовні водою. Вирівнювання потоку охолоджених продуктів згорання відбувається в перехідній ділянці 7, до якої приєднана робоча камера 8, футерована зсередини вогнетривкою керамікою з  $Al_2O_3$ , у якій установлюються моделі фронтних пристроїв. Спостереження за робочим процесом здійснюється через вікно 9, яке закрите кварцовим склом діаметром 200 мм. Для введення зондів заміру температури робочого тіла, відбору проб для газового аналізу передбачена система штуцерів 10. Продукти згорання видаляються через газохід 11.

За умовами роботи стану була можливість проводити дослідження з температурою газів у першому ступеню підігріву  $t_{вих}^{1ст} = 50 \div 950^\circ C$ . Після водяного холодильника температура газів перед палинковим пристроєм змінювалася в діапазоні  $t_{вх}^{2ст} = 50 \div 500^\circ C$ .

Випробування моделей палинкових пристроїв проводились у робочій камері шириною  $B_k = 200$  мм і висотою  $H_k = 100$  мм. Ширина стабілізаторів складала  $B_{ст} = 30$  мм  $\div$  60 мм, кут за вершини стабілізатора  $\beta = 60^\circ \div 90^\circ$ ; коефіцієнт затінення  $K_f = 0,3 \div 0,60$ , де  $K_f = B_{ст} / t_{ст}$  ( $t_{ст}$  – крок розміщення стабілізаторів).

На рис. 2 як приклад показана схема одного з варіантів палинкових пристроїв з одним стабілізатором  $B_{ст} = 60$  мм;  $K_f = 0,3$ .

Обробка експериментальних даних виконувалась із використанням таких залежностей.

Коефіцієнт надлишку повітря в камері підігріву повітря першого ступеня

$$\alpha^{1ст} = G_{п} / L_o \cdot G_r^{1ст} \quad (1)$$

де  $G_{п}$  – витрата повітря через дослідну ділянку, кг/с;  $G_r^{1ст}$  – витрата газу в камері підігріву

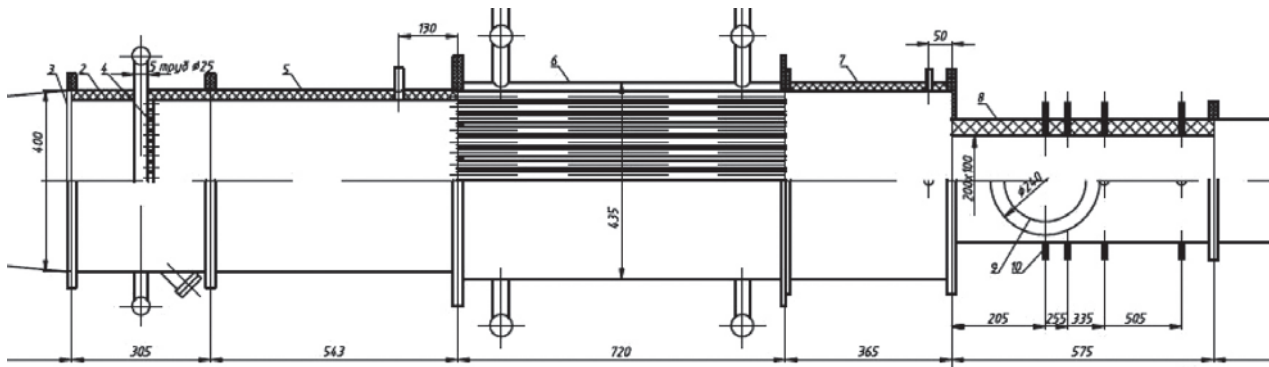


Рис. 1. Схема стану для випробувань палинкових пристроїв в умовах баластування повітря продуктами згорання: 1 – вхідний дифузор; 2 – камера згорання попереднього підігріву повітря; 3 – вирівнювальна решітка; 4 – палинковий пристрій попереднього прямого підігріву повітря; 5 – вирівнювальна ділянка; 6 – охолоджувальна ділянка; 7 – перехідна ділянка; 8 – робоча камера

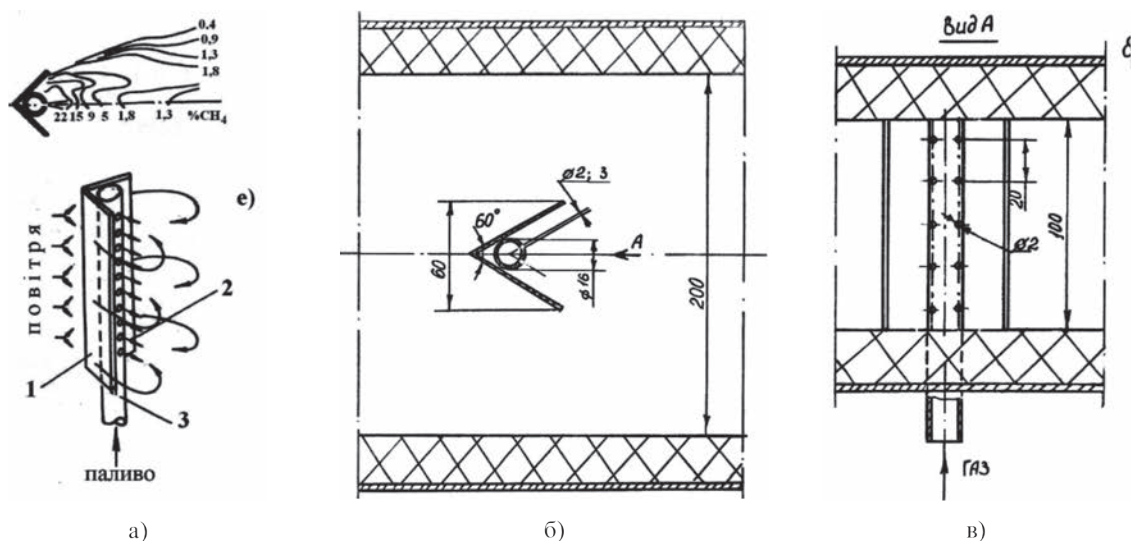


Рис. 2. Схема палинкового пристрою дифузійного типу (а), розміщення в робочій ділянці (б) і схема газороздачі (в)

$B_{ст} = 60$  мм;  $B_k = 200$  мм;  $K_f = 0,30$

повітря першого ступеня, кг/с;  $L_0$  – стехіометричний коефіцієнт, кг/кг.

Коефіцієнт надлишку повітря в дослідному пальниковому пристрої другого ступеня підігріву повітря

$$\alpha^{2ct} = G_r / L_n \cdot G_r^{2ct} \quad (2)$$

де  $G_r^{2ct}$  – витрата газу в дослідному пальниковому пристрої, кг/с,  $L_n$  – стехіометричний коефіцієнт з урахуванням баласту в повітрі від камери підігріву, кг/кг.

Своєю чергою

$$L_n = L_0 \frac{21}{O_{2ocm}^{1cm}} \quad (3)$$

де  $O_{2ocm}^{1cm}$  – вміст залишкового кисню в продуктах згорання камери підігріву повітря першого ступеня, об. %.

Значення  $O_{2ocm}^{1cm}$  знаходиться з формули

$$\alpha^{1cm} = \frac{21}{21 - O_{2ocm}^{1cm}} \quad (4)$$

Доля баластних газів в окислювачі після камери підігріву повітря розраховується за формулою [15, с. 48]

$$g_0 = G_{0,r} / (G_n + g_0^{1cm}) = (1 + L_0) / (1 + \alpha^{1ct} \cdot L_0) \quad (5)$$

де  $G_{0,r}$  – витрата баластних газів з урахуванням вигорання в камері підігріву повітря першого ступеня, кг/с.

З урахуванням отриманих експериментальних даних запропонована формула розрахунку характеристик сталості факела на багатій межі з урахуванням баластування газів продуктами згорання попереднього газового підігріву першого ступеня у вигляді

$$\alpha_{min}^{2cm} = 1,44 \frac{W_k^{0,3}}{B_{ct}^{0,5}} \frac{e^{1,5k_f}}{k_f^{1,5}} \left( \frac{T_b}{273} \right)^{-0,6} \left( 4,08 \cdot 10^{-3} \frac{F_{ct}}{\Sigma f_r} + 0,84 \right) \cdot (1 + g_0)^m \quad (6)$$

де показник ступеню  $m$  залежить від долі баластних газів в окислювачі

$$m = 7,2 \cdot (1 + g_0) - 6,2 \quad (7)$$

Слід зазначити, що в досліджених варіантах стабілізаторних пальникових пристроїв горіння метану виявилось можливим під час зниження вмісту кисню в продуктах згорання основної камери до 15%.

Дослідження щодо розширення діапазону сталої роботи камери вторинного підігріву повітря зі змінним вмістом кисню в окислювачі проводились, виходячи з таких положень.

У роботах [7, с. 330] показано, що під час подання газу в зону рециркуляції за стабілізатором значний вплив на процеси сталості факелу

і вигорання палива мають характеристики зони рециркуляції. Для системи газороздачі, що розглядається, встановлено, що умовний середній коефіцієнт надлишку повітря в зоні пов'язаний із загальним коефіцієнтом надлишку повітря в камері співвідношенням

$$\alpha_{rec}^{top} = K_{rec}^{top} \cdot C_x \cdot \alpha \cdot K_f \cdot (1 + K_f) \quad (8)$$

Як видно, коефіцієнт надлишку повітря в зоні рециркуляції збільшується з підвищенням загального коефіцієнта надлишку повітря  $\alpha$  і коефіцієнтом затінення стабілізаторної решітки  $K_f$ . Дослідний коефіцієнт  $K_f$  під час горіння  $K_f \approx 0,042$ .

Залежно від відносного розміщення стабілізаторів (коефіцієнта затінення) існує діапазон роботи пальникового пристрою з максимальною повнотою згорання. Установлено, що максимум значення  $\eta_z$  відповідає значенню  $(\alpha_{rec}^{top})^{opt} \approx 0,3$ . У такому разі на границі зони встановлюється співвідношення  $\alpha \approx 1,0$ .

У разі збільшення витрати палива до значення  $\alpha_{rec}^{top} < 0,2$  в зоні рециркуляції буде спостерігатись нестача кисню, температура газів зменшиться, що призведе до затягування процесу горіння слід за стабілізатором і зниження повноти згорання. Під час зменшення витрати палива до режиму  $\alpha_{rec}^{top} > 0,4$  в зоні рециркуляції буде надлишок повітря і в результаті інтенсивного масообміну в зоні повнота згорання також буде знижуватись.

Під час роботи камери вторинного підігріву повітря під час зменшення концентрації кисню в окислювачі, що набігає, відповідно зменшується концентрація кисню в зоні рециркуляції, що призводить до погіршення характеристик сталості факела і неможливості горіння.

Для збільшення концентрації кисню в зоні рециркуляції були проведені дослідження з різними схемами перфорації бокових стінок стабілізатора (рис. 3).

На рис. 4 наведені дані щодо діапазону сталої роботи на режимі з мінімально можливими коефіцієнтами надлишку повітря камери вторинного підігріву окиснювача. У першому варіанті (рис. 2,  $B_{ct} = 60$  мм,  $K_f = 0,30$ ,  $d_r = 3,0$  мм) перфорація стінок стабілізатора відсутня, в другому варіанті (рис. 3,  $B_{ct} = 60$  мм,  $K_f = 0,30$ ,  $d_r = 3,0$  мм) виконана перфорація бокових стінок стабілізатора, в третьому варіанті встановлено два стабілізатори з перфорацією ( $B_{ct} = 60$  мм,  $K_f = 0,60$ ,  $d_r = 3,0$  мм).

Із рис. 4 видно, що під час використання перфорації стінок стабілізатора (див. вар. 1 та 2) збільшується кількість кисню, що надходить у зону рециркуляції з потоку, що набігає, що призводить до розширення сталої роботи стабілізаторного

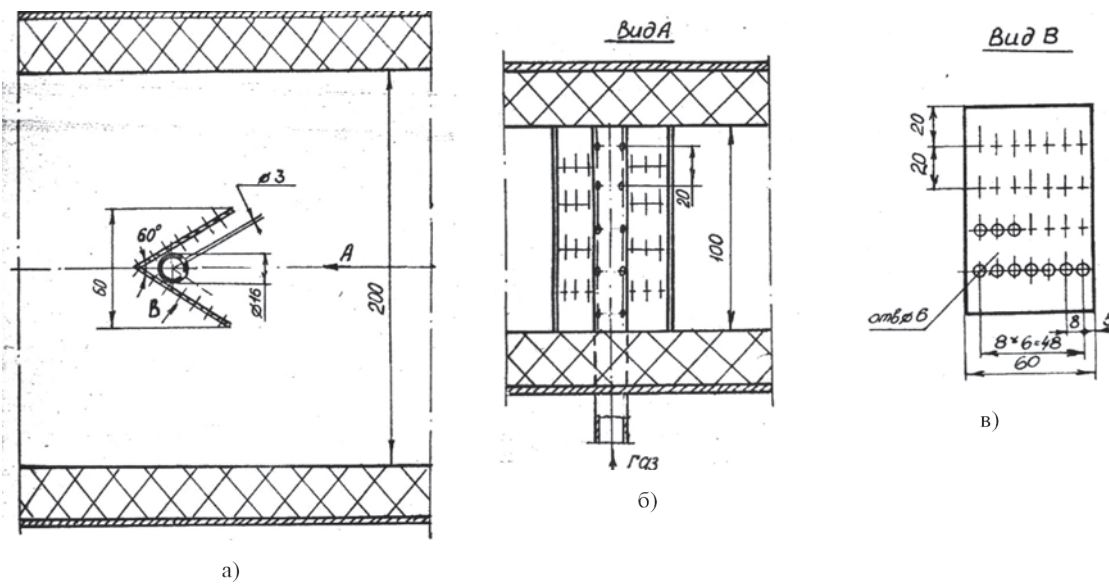


Рис. 3. Схеми розміщення перфорованого стабілізатора в робочій ділянці (а), схеми газороздачі (б) і перфорації бокової стінки (в)

$B_{ст} = 60 \text{ мм}, K_f = 0,30$

пристрою в бік зменшення мінімально можливого коефіцієнта надлишку повітря –  $(\alpha_d^{2ст})^{min}$ .

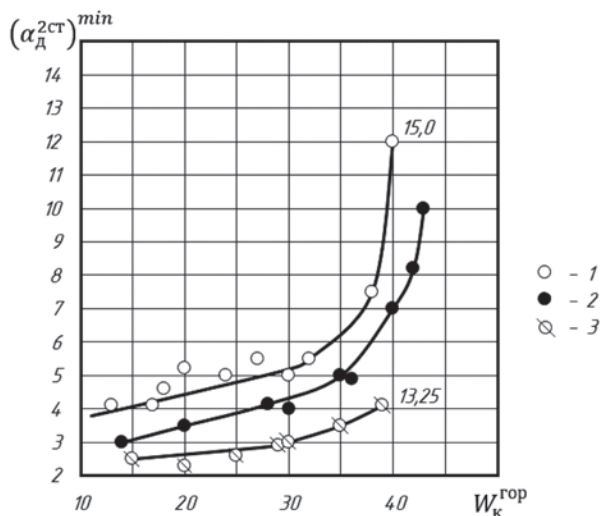


Рис. 4. Вплив перфорації стінок стабілізатора на характеристики багатого зриву паликових пристроїв: 1 – паликовий пристрій без перфорації стінок стабілізатора ( $B_{ст} = 60 \text{ мм}, K_f = 0,30, d_r = 3,0 \text{ мм}$ ); 2 - паликовий пристрій із перфорацією стінок ( $B_{ст} = 60 \text{ мм}, K_f = 0,30, d_r = 3,0 \text{ мм}$ ); 3 – паликовий пристрій із перфорацією стінок стабілізатора і збільшенням коефіцієнта затінення стабілізаторної решітки ( $B_{ст} = 60 \text{ мм}, K_f = 0,30, d_r = 3,0 \text{ мм}$ )

Цифри на графіку – уміст кисню в окиснювачі після першого ступеня підігріву повітря

Підвищення коефіцієнта затінення палики (див. вар. 2,  $K_f = 0,30$  та вар. 3,  $K_f = 0,60$ ) дозволяє

додатково зменшити мінімально допустимий коефіцієнт надлишку повітря  $(\alpha_d^{2ст})^{min}$ . В останньому варіанті була забезпечена можливість роботи паликового пристрою за умов умісту кисню в окиснювачі  $O_2^{1ст} = 13,25 \%$  ( $t_{вих}^{1ст} = 950^\circ\text{C}$ ).

Водночас установлено, що під час зменшення витрати палива попадання додаткової кількості окиснювача в зону рециркуляції у разі перфорації бокових стінок стабілізатора призводить до збільшення коефіцієнта надлишку повітря в зоні і, відповідно, до зменшення коефіцієнта надлишку повітря на бідному зриві, тобто до звуження діапазону сталої роботи паликового пристрою.

Однією з важливих характеристик паликового пристрою є повнота згорання на виході з камери. Як показали результати випробувань натурних паликових пристроїв [10], спалювання газу в забаластованому окиснювачі здебільшого характеризується наявністю недопалу.

Проведені в роботі випробування паликових пристроїв показали, що у варіантах без перфорації стінок стабілізатора і з перфорацією відмічається наявність недопалу під час збільшення ступеню баластування окиснювача (рис. 5).

На рис. 5 наведено дані щодо недопалу в камері для трьох режимів роботи: 1 режим –  $t_{вих}^{1ст} = 50^\circ\text{C}$ , тобто без підігріву повітря, 2 – з підігрівом у камері першого ступеня до  $t_{вих}^{1ст} = 500^\circ\text{C}$ , 3 – до  $t_{вих}^{1ст} = 650^\circ\text{C}$ . Як видно з наведених даних, якщо під час роботи без підігріву повітря ми маємо майже повне вигорання палива  $q_3 \approx 0$ , то під час

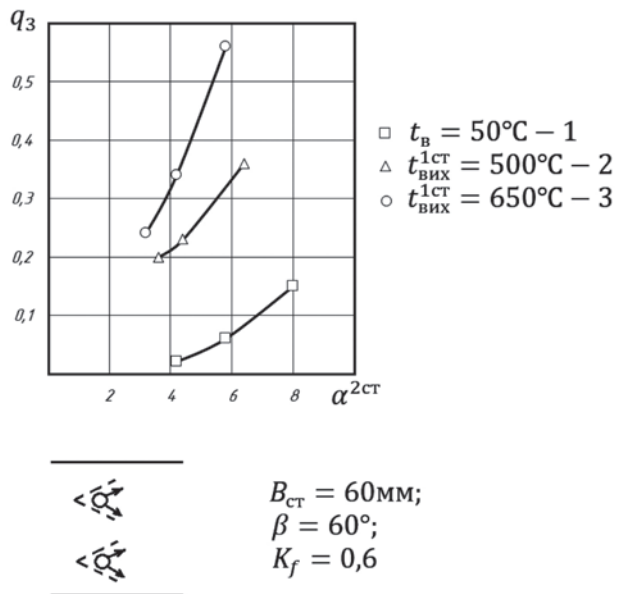


Рис. 5. Залежність недопалу в камері згорання з перфорованими стабілізаторами

$V_{\text{ст}} = 60 \text{ мм}, K_f = 0,60, W_{\text{к}}^{\text{хол}} = 20,0 \text{ м/с}$

роботи з газовим підігрівом повітря  $q_3 > 0$ , причому величина недопалу збільшується з підвищенням ступеня попереднього підігріву і коефіцієнта надлишку повітря в камері –  $\alpha_{\text{д}}^{2\text{ст}}$ .

Ураховуючи значний вплив процесів, що відбуваються в зоні рециркуляції, на характеристики сталості факела і вигорання палива, для розглянутих у роботі варіантів пальників проведено дослідження впливу на такі процеси подання додаткового повітря в зону рециркуляції.

Оскільки для подання додаткового повітря потрібна окрема магістраль зі своїми регулювальними органами, що ускладнює конструкцію камери згорання, були проведені дослідження кількох варіантів із метою досягнення максимального ефекту зі стійкості й повноти згорання за мінімальної витрати додаткового повітря. Схема одного з варіантів пальникових пристроїв показана на рис. 6.

Як видно з рис. 6, повітря з колектора подається в порожнину стабілізатора на всій висоті і потім через перфорацію в бокових стінках стабілізатора надходить у зону рециркуляції за стабілізатором. Отвори для подання додаткового повітря розміщено між рядами газових отворів.

Визначено вплив подання додаткового повітря в зону рециркуляції на характеристики сталості факела. Із рис. 7, де наведено дані щодо впливу подачі додаткового повітря, видно, що збільшення кількості повітря в зоні рециркуляції призводить до зменшення коефіцієнта надлишку повітря на режимі багатого зриву.

Коефіцієнт надлишку додаткового повітря розраховувався за формулою

$$\alpha_{\text{дод}}^{\text{пов}} = G_{\text{дод}}^{\text{пов}} / (L_0 \cdot G_{\text{г}}^{2\text{ст}}) \quad (9)$$

де  $G_{\text{дод}}^{\text{пов}}$  – витрата додаткового повітря.

Водночас у результаті досліджень установлено, що значення коефіцієнта надлишку повітря на режимі бідного зриву факела під час подачі додаткового повітря також зменшуються, що зужує межі сталої роботи за умов малих попередніх підігрівів повітря. З іншого боку, цей факт пока-

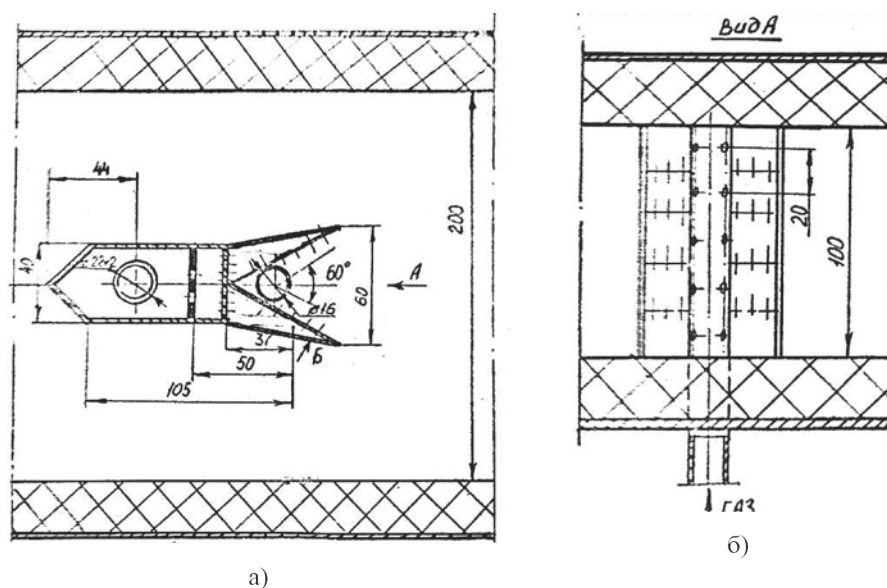
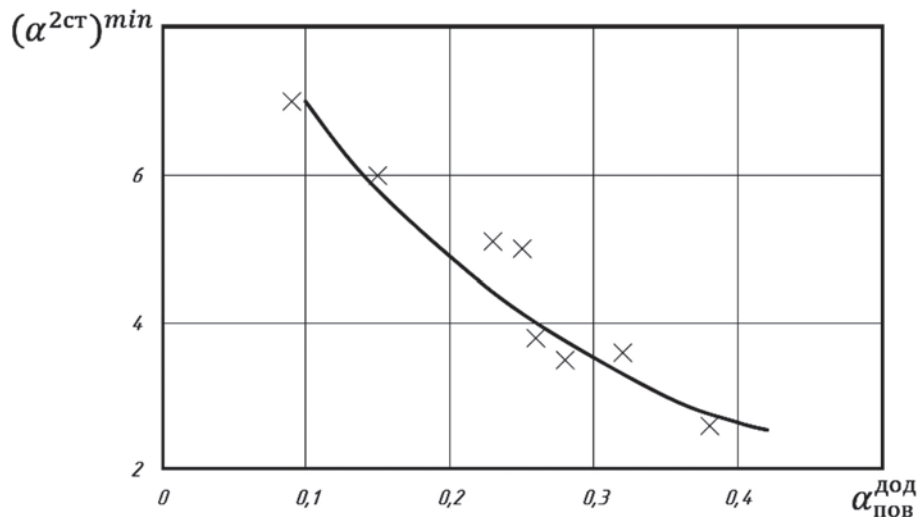


Рис. 6. Розташування перфорованого стабілізатора в камері (а) і схеми подання газу і додаткового повітря (б)



**Рис. 7. Залежність сталості факела на багатій межі від подачі додаткового повітря в зону рециркуляції**

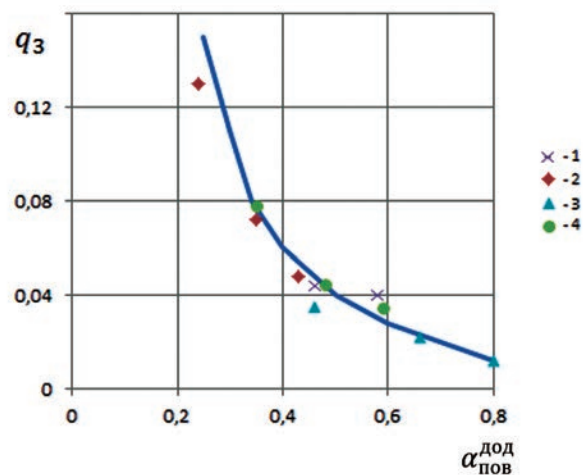
$B_{cm} = 60 \text{ мм}$ ,  $K_f = 0,30$ ,  $W_{\kappa}^{хол} = 14,9 \text{ м/с}$ ,  $W_{\kappa}^{гор} = 38,3 \text{ м/с}$   $\alpha^{1cm} = 2,9$ ,  $t_{вих}^{1cm} = 85^{\circ}\text{C}$ ,  
 $t_{вх}^{2cm} = 480^{\circ}\text{C}$ ,  $g_{бал} = 0,358$ ,  $O_2^{1cm} = 13,76$

зує, що на режимах бідного зриву немає необхідності подавати додаткове повітря.

Результати досліджень щодо впливу подачі в зону рециркуляції додаткового повітря через перфорацію в бокових стінках стабілізатора наведено на рис. 8.

Як видно з наведених на рис. 8 даних, подача в зону рециркуляції додаткового повітря через перфорацію в бокових стінках стабілізатора дозволяє вибрати схему перфорації і режими подачі додаткового повітря, за яких є можливість забезпечити повне вигорання палива з мінімальними витратами додаткового повітря.

**Висновки.** Випробування моделей пальникових пристроїв вторинного підігріву повітря, забаластованого продуктами згорання в камері первинного підігріву повітря, показало, що сталість факела на режимі багатого зриву погіршується у разі зменшення вмісту кисню в окиснювачі, зниження температури окиснювача і підвищення швидкості повітряного потоку. Зменшити величину коефіцієнта надлишку повітря на режимі багатого зриву можна шляхом підвищення коефіцієнта затінення стабілізаторної решітки і збільшення розмірів стабілізатора, якщо довжина топки допускає збільшення довжини зони горіння. Зменшити до певного рівня коефіцієнт надлишку повітря на режимі багатого зриву можна за рахунок перфорації бокових стінок стабілізатора. Суттєво розширити діапазон сталої роботи пальникового



**Рис. 8. Вплив подачі додаткового повітря в зону рециркуляції на величину хімічного недопалу в камері згорання**

$B_{cm} = 60 \text{ мм}$ ,  $K_f = 0,60$ ,  $\alpha^{1cm} = 2,9$ ,  $t_{вих}^{1cm} = 850^{\circ}\text{C}$ ,  
 $t_{вх}^{2cm} = 480^{\circ}\text{C}$ ,  $g_{бал} = 0,36$ ,  $O_2^{1cm} = 13,76$ .  
 1 -  $W_{\kappa}^{хол} = 15,0 \text{ м/с}$ ;  $\alpha^{2cm} = 5,19$ ; 2 -  $W_{\kappa}^{хол} = 15,0 \text{ м/с}$ ;  
 $\alpha^{2cm} = 3,92$ ; 3 -  $W_{\kappa}^{хол} = 11,0 \text{ м/с}$ ;  $\alpha^{2cm} = 5,29$ ; 4 -  $W_{\kappa}^{хол} =$   
 $11,0 \text{ м/с}$ ;  $\alpha^{2cm} = 3,92$

пристрою під час спалювання газу в окиснювачі, забаластованому продуктами згорання першого ступеня підігріву, можна шляхом подачі додаткового чистого повітря в зону рециркуляції за стабілізатором через перфорацію в стабілізаторі. При цьому також підвищується повнота вигорання палива в камері.

Список літератури:

1. Когенерационно-утилизационные технологии на базе газотурбинных установок / Г.Н. Любчик, Л.Б. Чабанович, Р.М. Говдяк и др. // Киев: Варта, 2008. 188 с.
2. Варварский В.С., Прутковский Е.Н., Грибов В.Б. Комбинированное производство тепла и электроэнергии, современные циклы ПГУ, включая внутрицикловую газификацию твердого топлива. *Теплоэнергетика*, 1990. № 3. С. 51–54.
3. Karoly Veszely. Hybrid combined cycle power plant // International Conference «Nuclear Energy for New Europe 2002». Krfnjska Gora, Slovenia, September 9-12, 2002. 5 pp.
4. Трухний А.Д., Изюмов М.А., Поваров О.А., Малышко С.П. Основы современной энергетики / под общ. ред. Е.В. Аметистова. Том 1. Современная теплоэнергетика / Под ред. А.Д. Трухний. Москва : Изд. Дом МЭИ, 2016. 512 с.
5. Хоменок Л.А. Создание горелочных устройств камер дожигания котлов-утилизаторов ПГУ-ТЭЦ. *Теплоэнергетика*, 2007. № 9. С. 10–16.
6. Спейшер В.А. Огневое обезвреживание промышленных выбросов. Москва : Энергия, 1977. 262 с.
7. Бутовский Л.С., Грановская Е.А., Любчик Г.Н., Христич В.А. Исследование закономерностей выгорания топлива за уголковыми и плоскими стабилизаторами пламени. *Теория и практика сжигания газа*. Ленинград, 1975. Вып. VI. С. 324–338.
8. Шатиль А.А. Расчетное исследование топочных устройств. Санкт-Петербург, 2003. 153 с.
9. Постников А.М., Цыбизов Ю.И., Белкин В.М., Васильев В.И., Чикин В.П. Принципы конструирования блока дожигающих устройств для высокоэффективной парогазовой установки на базе двигателя НК-37 / А.М. Постников. *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*, 2007. № 2. С. 155–160.
10. Акулов В.А., Бутовский Л.С., Жемчугов В.И., Христич В.А. Испытание блока дожигающих устройств ГТ-25-700 на Якутской ГРЭС. *Теплоэнергетика*, 1981. № 6. С. 48–51.
11. Горбаненко А.Д., Морозов О.В., Тумановский А.Г., Абросимов А.А., Романов А.П. Горелочное устройство для котла-утилизатора ПГУ-800. *Теплоэнергетика*. 1989. № 5. С. 54–58.
12. Морозов О.В. Горелочные устройства котлов-утилизаторов ПГУ. *Энергетика за рубежом*. 1985. Вып. 5. С. 13–15.
13. Груздев Н.В. Аналитическое представление основных характеристик процессов горения гомогенных топливовоздушных смесей. *Горение в потоке. Межвузовский сборник*. Казань: Казанский авиационный институт, 1982. С. 44–50.

**Chernousenko O.Yu., Butovsky L.S., Hranovska O.O., Moroz O.S., Starchenko O.S.**

**CHARACTERISTICS OF THE DIFFUSION-STABILIZER BURNER WHEN COMBUSTION OF GAS AT REDUCED OXYGEN CONTENT IN OXIDIZER**

*The article presents the results of experimental studies of the characteristics of micro-diffusion stabilizer burners of the secondary heating of the air during the combustion of gaseous fuel in a decrease in oxygen content in the air flow.*

*The given data takes into account the influence on the stability of combustion on a rich disruption of a burner of regime and structural factors, which allows to perform a preliminary calculation of the burner device.*

*It has been shown that the stability of burning on a rich disease deteriorates with a decrease in oxygen content in oxidizers, lowering the temperature of the oxidant and increased air flow rate.*

*To reduce the value of the excess air coefficient on the mode of rich disruption is possible by increasing the coefficient of shading of a stabilizer grating and an increase in the size of the stabilizer, if the length of the furnace allows an increase of the length of the combustion zone.*

*Also, it is possible to reduce to a certain level of excess air coefficient on the mode of rich disruption by the perforation of the side walls of the stabilizer.*

*It is possible to significantly expand the range of the stable work of the burner device in the combustion of gas in oxidizer, amazed with the combustion products of the first degree of heating, by supplying additional clean air to the recirculation zone behind the stabilizer through a perforation in the stabilizer.*

*In this case, the completeness of fuel burning in the chamber is also increased.*

**Key words:** *stabilizer burner; an amazed oxidant, a rich breakdown, a coefficient of excess air.*

УДК 621.31

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/36>**Чернюк А.М.**

Українська інженерно-педагогічна академія

**Кирисов І.Г.**

Українська інженерно-педагогічна академія

**Черевик Ю.О.**

Українська інженерно-педагогічна академія

## АНАЛІЗ ПЕРСПЕКТИВ РОЗВИТКУ СИСТЕМ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В УКРАЇНІ

У статті розглянуто сучасні тенденції розвитку світової та вітчизняної енергетики, сучасний стан та напрями розвитку систем розподіленої генерації, що базуються на альтернативних джерелах живлення.

Проаналізовано проблеми, які виникають під час побудови систем електропостачання з розподіленою генерацією. На застосування РГЕ можуть вплинути такі обмеження: постачання природного газу, щільність електричних і теплових навантажень, стійкість функціонування електроенергетичної системи. Можливість упровадження розподіленої генерації енергії визначає її конкурентоспроможність щодо централізованих систем і в цій перспективі залежать від багатьох чинників: рівня тарифів на приєднання до електричних і теплових мереж; принципів формування тарифів на електроенергію і тепло, тобто від співвідношення тарифів на електроенергію і тепло і вартості палива; практичної реалізації заходів щодо недискримінаційного доступу до електричної мережі і до постачань природного газу; розвиненості ринку енергетичного устаткування (із його обслуговуванням); темпів розвитку економіки країни загалом і конкретних регіонів; протекціоністської політики держави.

Проаналізовано світовий досвід із побудови та експлуатації електричних мереж із розподіленою генерацією. Нині у багатьох країнах світу разом із розвитком централізованого енергопостачання все активніше підтримується тенденція широкомасштабного переходу до РГЕ, яка має перевагу більшої конкурентоспроможності.

Проаналізовано можливості енергетичного потенціалу енергоносіїв систем РГЕ в Україні. Для України під час реалізації завдань щодо широкомасштабного використання енергії відновлюваних джерел для РГЕ дуже важливим є встановлення енергетичного потенціалу кожного з видів ВДЕ на всій території України.

Проаналізовано нормативно-законодавчу базу у сфері впровадження та підтримки екологічно чистої генерації електричної енергії в Україні.

**Ключові слова:** розподілена генерація, Smart Grids, енергоносії, енергетичний потенціал, альтернативні джерела енергії, «зелений» тариф.

**Постановка проблеми.** Сучасними трендами розвитку вітчизняної та світової енергетики є демонополізація та децентралізація енергетичних ринків і систем. Із розвитком альтернативних джерел живлення з'являється все більше суб'єктів енергетичного ринку, які мають подвійне призначення. Тобто можуть виступати у ролі як споживача електричної енергії, так і її джерела залежно від енергетичного потенціалу поновлюваних джерел живлення. Суттєвим недоліком генерації альтернативними джерелами є слабка прогнозованість виробітки електроенергії та неможливість управляти цим процесом із заданою точністю та відповідно до бажаного графіка електроспожи-

вання. Тому аналітичне дослідження провідного світового досвіду побудови надійних енергетичних систем на базі об'єктів розподіленої генерації та аналіз енергетичного потенціалу різних альтернативних джерел живлення є актуальним у сучасних умовах.

**Постановка завдання.** Метою статті є проведення аналізу перспектив розвитку систем із розподіленою генерацією та оцінка енергетичного потенціалу первинних джерел енергії для екологічно чистої генерації.

Завдання дослідження:

– провести критичний аналіз сучасного стану розвитку систем із розподіленою генерацією;

– проаналізувати можливості побудови надійних систем електропостачання на основі об'єктів розподіленої генерації з важкопрогнозованими показниками виробітки електричної енергії

– оцінити нормативно-правову основу розвитку систем розподіленої генерації в Україні.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Розподілена генерація енергії (далі – РГЕ) – це виробництво енергії на рівні розподільної мережі або на стороні споживача, підключеного до мережі [1–3]. Загалом, «розподілена» генерація – це виробництво електричної енергії за місцем її споживання. Відсутність розгалуженої мережі виключає втрати на передання електричної (теплової) енергії (за наявності великої кількості споживачів, що виробляють електричну та теплову енергію для власних потреб та направляють їх надлишки в загальну мережу).

Розподіленими генераторами енергії можуть бути когенераційні установки (далі – КГУ) малої і середньої потужності, які дозволяють понизити витрати на виробництво енергії на 40%, досягти великого ефекту застосування паливних ресурсів і оптимального використання встановленої потужності. Упровадження малої розподіленої генерації енергії визначає її конкурентоспроможність щодо централізованих систем і в цій перспективі залежать від багатьох чинників :

– рівня тарифів на приєднання до електричних і теплових мереж;

– принципів формування тарифів на електроенергію і тепло, тобто від співвідношення тарифів на електроенергію і тепло і вартості палива;

– практичній реалізації заходів із недискримінаційного доступу до електричної мережі і до постачань природного газу;

– розвиненості ринку енергетичного устаткування (з включенням його обслуговування);

– швидкості формування економіки країни загалом і конкретних регіонів;

– протекціоністської політики держави.

Залежно від умов і чинників можливі різні сфери застосування малої розподіленої генерації енергії, а саме:

1. Застосування РГЕ тільки для нових споживачів.

2. Використання технологій РГЕ для перетворення в ТЕЦ дрібних газових котельних.

3. Використання технологій РГЕ для перетворення в ТЕЦ великих котельних, що працюють на природному газі.

4. Перехід споживачів від централізованого електро- і теплопостачання на застосування технологій малої РГЕ.

5. Застосування РГЕ для покриття напівпікової і пікової частин графіка навантажень і як резервної потужності за умов спільної роботи з централізованою генерацією.

– На застосування РГЕ можуть вплинути такі аспекти:

– забезпечення природним газом;

– щільність електричних і теплових навантажень;

– стійкість функціонування електроенергетичної системи.

Інтеграція РГЕ в мережі забезпечує значні перспективи їх застосування поряд із централізованими системами. Можливість роботи РГЕ як єдиної з централізованими джерелами мережу на індивідуальних споживачів створює передумови для інтеграції централізованого й ізольованого (децентралізованого) виробництва енергії [4; 5].

**Огляд світового досвіду.** Наразі у багатьох країнах світу (поряд із розвитком централізованого енергопостачання) все більш активно підтримується тенденція широкомасштабного переходу до РГЕ, яка має перевагу більшої конкурентоспроможності. Водночас кожна із систем має свою сферу застосування, в якій найбільше виявляються її переваги [6; 7; 8].

За минулі роки результатом розвитку поновлюваної енергетики стала зміна традиційної моделі функціонування електричних мереж у низці країн і регіонів. Новітні концепції впровадження розподіленої генерації вимагають більш досконалих систем управління і вирішення питань щодо застосування нових технологій підвищення надійності електромереж, ефективних систем акумулювання енергії та підвищення якості електроенергії. Безперервний пошук напрямів розв'язання проблем підвищення надійності та ефективності розподільної генерації дає можливість знайти спосіб мінімізації втрат під час передавання електроенергії, особливо в умовах широкого впровадження вітрової та сонячної генерації.

В електромережах Німеччини з високою часткою вітрової та фотоелектричної генерації були проведені дослідження щодо впливу розподіленої генерації на втрати електроенергії, які довели, що під час зростання частки мереж низької напруги сумарний рівень втрат електроенергії знижується лише до певного рівня насичення локальними генерувальними джерелами. Спираючись на це, темпи та обсяги розвитку розподіленої генерації мають бути зумовлені відповідними техніко-економічними розрахунками.

У США експлуатується близько 12 млн установок малої розподіленої генерації (одиночною



потужністю до 60 МВт) загальною встановленою потужністю понад 220 ГВт, а темпи її приросту становлять близько 5 ГВт у рік. Сумарна частка РГЕ в США не перевищує 5% від показників у галузі. Представництва компаній BMW, Apple, Google, Wall-Mart і Kroger свої потреби в електроенергії задовольняють за рахунок використання різних видів генерації (на газі, біогазі, паливних елементах і сонячній енергії). Так, наприклад, компанія Kroger зуміла заощадити за минулий рік 160 млн доларів.

У Данії будівництво об'єктів малої енергетики визнане одним із найбільш багатобічючих шляхів розвитку енергетики і підтримується державною програмою. У Данії планується перехід на поновлювану енергетику до 33% до кінця 2021 року і повна відмова від викопного палива до 2050 року. Окрім численних приватних будинків, що проектуються з використанням поновлюваних джерел енергії, в Європі активно діють програми з проектування «екологічних поселень», що підтримуються державою та регіональною владою.

У Японії після аварії на АЕС «Фукусіма-1» втрата довіри японців до централізованої системи енергопостачання стала цілком очевидною. Нині в Японії найбільш популярними автономними джерелами електроенергії є сонячні батареї та паливні елементи. Паливні елементи встановили у своїх будинках більше 40 тис. японських сімей. Попит на це устаткування в Японії стрімко зростає. Показовим є також досвід Китаю, який намагається не відставати від лідерів. У країні особлива роль відведена сонячній енергетиці, а також енергії вітру. Китай планує довести до 2050 року розмір виробництва енергії з альтернативних джерел до 40% у загальному енергетичному балансі країни. Міністерство енергетики Китаю затвердило новий план, який передбачає доведення потужності вітряних електростанцій до кінця 2021 року до 100 ГВт [9].

У Німеччині у межах федеральної землі Баден-Вюртемберг узялися до впровадження проекту енергомережі з розподіленою генерацією Smart Grids силами енергетичного концерну EnBW за підтримки Технологічного інституту в Карлсруе. Метою проекту є створення мережі з розподіленою генерацією в повнофункціональному складі: виробництво, постачання споживачеві, керування споживанням, а також тарифікація і облік. Дотепер випробовувалися лише окремі елементи таких мереж, повномасштабний проект є цілком інноваційним. Важливим аспектом у процесі реалізації проекту є робота зі споживачем. Концерн EnBW

активно просуває інноваційні рішення серед своїх потенційних споживачів-користувачів Smart Grids. Для реалізації проекту концерн вже віднайшов потрібну кількість споживачів, які бажають першими використовувати всі переваги мереж із розподіленою генерацією.

У планах концерну EnBW – побудова єдиних стандартів інформаційного обміну між усіма окремими елементами мережі і всіма пристроями, що входять до складу Smart Grids, а саме:

- генератори (вітро-, сонячні тощо), встановлені в межах домогосподарства;
- пристрої тарифікації та обліку – інтелектуальні електролічильники;
- побутові прилади.

Наступним етапом буде створення аналогічних регіональних Smart Grid із розподіленою генерацією й об'єднання їх у єдину енергосистему Німеччини.

Франція також реалізує два проекти у сфері Smart Grid. Першим проектом є розумні лічильники інтегровані із засобами управління мережами у Ліоні. Другим проектом є створення окремої регіональної системи розподіленої генерації з інтегрованими об'єктами відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та Smart-управлінням мережею [10].

**Аналіз енергетичного потенціалу енергоносіїв систем РГЕ в Україні.** До тенденцій упровадження РГЕ, які мають низку потенційних переваг та перспектив у світовій енергетиці майбутнього, слід зарахувати:

1. Істотне зменшення витрат у мережах (в Україні витрати в мережах становлять близько 10% електроенергії під час транспортування).
2. Суттєве зменшення «витрат природи» на анулювання масової шкоди від великих виробництв, які підривають природні захисні механізми.
3. Відмова від викопного палива, що дозволить значно скоротити забруднення навколишнього середовища та кліматичні зміни.
4. Здешевлення продуктів ВДЕ, по-перше, завдяки науково-інженерним інноваційним технологіям, по-друге, внаслідок відшкодування початкових затрат на будівництво та обладнання [10].

Із досвіду країн ЄС та світу можливо зрозуміти, що впровадження РГЕ у дійсні енергосистеми здійснюється в три етапи.

Перший етап – упровадження РГЕ до дійсних енергосистем. Україна перебуває лише на першому етапі, коли країни ЄС уже пройшли цей етап.

Другий етап – формування децентралізованої електромережі, яка буде працювати разом із

локальною енергосистемою. Країни ЄС та США зараз перебувають на другому етапі. Джерела РГЕ і локальна енергосистема стають рівноправними учасниками процесу забезпечення споживача електричною енергією. Проходять процеси організації взаємодії між основною енергосистемою і РГЕ під час управління енергосистемою. Знаходять рішення проблеми спільної підтримки параметрів напруги у споживача, оптимізації втрат. На роздрібному ринку електроенергії починає діяти конкуренція.

Третій етап – створення дисперсної енергосистеми, де значна частина енергії виробляється системами розподіленої генерації. Основною метою інтеграції РГЕ в енергосистему є підвищення надійності електропостачання, зменшення втрат електроенергії та екологічного навантаження на довкілля. Водночас поява джерел РГЕ призводить до виникнення технічних проблем щодо організації їх роботи в енергосистемі, як-от забезпечення надійності та стійкості роботи, якості електроенергії, організації диспетчерського управління, зокрема виведення джерел РГЕ на паралельну роботу з енергосистемою та контролю відокремлення РГЕ від енергосистеми. При цьому підлягають розв'язанню можливі проблеми в електричних мережах середньої та низької напруги, зважаючи на появу двонаправлених перетікань електроенергії та необхідності обмеження струмів короткого замикання [11].

Для України під час реалізації завдань щодо широкомасштабного використання енергії відновлюваних джерел для РГЕ дуже важливим є встановлення енергетичного потенціалу кожного з видів ВДЕ на всій території України. Для цього треба сформувати єдину інформаційно-аналітичну систему з розширеними функціями, яка дозво-

лить оперативно вирішувати питання ефективності впровадження енергетичного обладнання в конкретній місцевості. До головних складників відновлюваної енергетики України належать: вітроенергетика, сонячна енергетика, мала гідроенергетика, біоенергетика, геотермальна енергетика й енергетика довкілля (використання теплових насосів). Потенціал відновлюваної енергетики в Україні наведені в Таблиці 1 [12].

**Потенціал сонячної енергії в Україні.** За метеорологічними даними надходження сонячної радіації визначено питомі енергетичні показники сонячної енергії та розподіл енергетичного потенціалу сонячного випромінювання для України. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал сонячної енергії в Україні є еквівалентним 4,2 млн т н.е., а його використання дозволяє заощадити біля 5 млрд м<sup>3</sup> природного газу.

Середньорічна кількість сумарної сонячної радіації, що надходить на 1 м<sup>2</sup> поверхні на території України, перебуває в межах від 1070 кВт·год./м<sup>2</sup> у північній частині України [12].

**Потенціал енергії вітру в Україні.** Україна має досить великі ресурси вітрової енергії. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал енергії вітру в Україні є еквівалентним 10,5 млн т н.е., а його використання дозволяє щорічно заощаджувати біля 13 млрд м<sup>3</sup> природного газу. За оцінками українських експертів, вітровий енергетичний потенціал дозволяє на території України економічно ефективно функціонувати вітровим електростанціям (далі – ВЕС) загальною потужністю 16 000 МВт (не враховуючи офшорні ВЕС). В умовах України за допомогою вітроустановок можливим є використання 15÷19% річного обсягу енергії вітру, що проходить крізь перетин поверхні вітроколеса. Очікувані обсяги виробництва елек-

Таблиця 1

Потенціал відновлюваної енергетики в Україні

| №   | ВДЕ                           | Річний технічно-досяжний потенціал |                 |
|---|-------------------------------|------------------------------------|-----------------|
|   |                               | млрд. кВт*год./рік                 | млн. т н.е./рік |
| 1   | Вітроенергетика               | 60                                 | 15              |
| 2   | Сонячна енергетика, зокрема:  | 38,2                               | 4,2             |
| 2.1                                       | – електрична                  | 5,7                                | 1,4             |
| 2.2                                       | – тепла                       | 32,5                               | 2,8             |
| 3   | Велика гідроенергетика        | 20,1                               | 4,9             |
| 4   | Мала гідроенергетика          | 8,6                                | 2,1             |
| 5   | Біоенергетика, зокрема:       | 178                                | 21,7            |
| 5.1                                       | – електрична                  | 27                                 | 7,21            |
| 5.2                                       | – тепла                       | 151                                | 14,49           |
| 6   | Геотермальна тепла енергетика | 97,6                               | 8,4             |
| 7   | Енергія довкілля              | 146,3                              | 12,6            |
| Загальні обсяги заміщення традиційних ПЕР |                               | 548,8                              | 68,9            |

троенергії з 1 м<sup>2</sup> перетину площі вітроколеса у перспективних регіонах становлять 800÷1000 кВт·год/м<sup>2</sup> за рік [12].

**Енергетичний потенціал малих річок України.** Згідно із Законом України № 601-VI до малих гідроелектричних станцій (далі – ГЕС) зараховують станції, що виробляють електричну енергію в результаті перетворення механічної енергії потоку води в електроенергію, встановлена потужність яких не перевищує 10 МВт.

Потенційні можливості малої гідроенергетики України на найближчу перспективу на період до 2030 року оцінені в Енергетичній стратегії на рівні 1147 МВт потужності з річним обсягом виробництва електроенергії 3,75 млрд. кВт·год./рік [10].

**Потенціал геотермальної енергії в Україні.** Геотермальні ресурси України становлять термальні води і тепло нагрітих сухих гірських порід. Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал геотермальної енергії в Україні є еквівалентним 8,4 млн т н.е., а його використання дозволяє заощадити біля 10 млрд м<sup>3</sup> природного газу.

Найбільш поширеним і придатним нині для технічного використання джерелом геотермальної енергії в Україні є геотермальні води. Затверджені Міністерством екології та природних ресурсів України потенційні геотермальні ресурси теплоенергетичних вод становлять 27,3 млн м<sup>3</sup>/добу, а їх теплоенергетичний потенціал – біля 84 млн Гкал/рік [12].

**Енергетичний потенціал твердої біомаси, рідкого біопалива та біогазу в Україні.** Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал твердої біомаси в Україні є еквівалентним 18 млн т н.е., а його використання дає змогу щорічно заощаджувати близько 22 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Найбільший потенціал твердої біомаси зосереджений у Полтавській, Дніпропетровській, Вінницькій та Кіровоградській областях і становить понад 1,0 млн т н.е./рік.

На 14 підприємствах олійної промисловості спалюється понад 500 тис. т лушпиння соняшнику і 120 тис. т його гранулюється. Лісистість території України становить близько 16% її загальної площі. Щорічно заготовлюється 16–17 млн м<sup>3</sup> ділової деревини; відходи переробки деревини становлять до 10 млн м<sup>3</sup>. Нині близько 70% відходів деревини у вигляді тирси, трісок, пелет і брикетів використовується як біопаливо [12].

Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал рідкого біопалива в Україні є еквівалентним 1 млн т н.е. Його використання дає змогу щорічно заощаджувати близько 1,2 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Найбільший потенціал рідкого біопалива зосеред-

жений у Вінницькій та Полтавській областях, де він становить понад 90 тис. т н.е./рік.

Річний технічно-досяжний енергетичний потенціал біогазу в Україні становить 2,3 млн т н.е. Його використання дозволяє щорічно заощаджувати біля 2,8 млрд м<sup>3</sup> природного газу. Найбільший потенціал біогазу зосереджений у Дніпропетровській, Донецькій та Київській областях і становить понад 150 тис. т н.е./рік.

Ефективним шляхом доповнення та заміни традиційних ПЕР є виробництво та використання біогазу, який утворюється в результаті застосування технологій метанового зброджування тваринницької біомаси і на 60–70% складається з метану. Іншим джерелом біогазу є звалища сміття на полігонах твердих побутових відходів [12].

**Аналіз сучасних положень законодавчої бази в альтернативній енергетиці.** ДП «НЕК Укренерго» відповідно до Закону України від 13.04.2017 р. «Про ринок електричної енергії» розробило «План розвитку системи передачі на 2019–2028 роки», який урахує особливості майбутнього розвитку ОЕС України та містить низку заходів із підготовки до вирішення проблем безпеки постачання електроенергії на середньострокову та довгострокову перспективи [13].

На виконання ухваленого в жовтні 2012 р. Рішення Ради Міністрів Енергетичного Співтовариства D/2012/04/МС-EnC Про впровадження Директиви 2009/28/ЕС про заохочення до використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел, розпорядженням Кабінету Міністрів України від 01.10.2014 р №902-р затверджено Національний план дій із відновлюваної енергетики на період до 2021 року (далі – НПД ВЕ) та План заходів із реалізації Національного плану дій із відновлюваної енергетики на період до 2021 року [14].

Головною метою НПД ВЕ є доведення до 2021 р. частки енергії, отриманої з поновлюваних джерел енергії у кінцевому енергоспоживанні країни до 11%, що дозволить до 2021 р. зменшити використання традиційних первинних енергоресурсів в обсязі 8,6 млн т н.е. або 9,2 млрд м<sup>3</sup> природного газу [15; 16].

В Україні створено сприятливі умови для розвитку поновлюваної енергетики: «зелений» тариф розраховується відповідно до курсу євро; «зелений» тариф для електроенергії з біомаси та біогазу збільшено на 10%; відсутні вимоги до «місцевого» складника; інвестор отримує надбавку до «зеленого» тарифу до +10% за українське обладнання; введено «зелений» тариф для геотер-

мальних електроустановок та сонячних і вітрових електростанцій приватних домогосподарств потужністю до 30 кВт; передбачено підписання довгострокових договорів купівлі-продажу електроенергії за «зеленим» тарифом з гарантованим покупцем до 2030 р. [17–19].

В Україні розроблено та запроваджено відповідне законодавство з альтернативної енергетики, зокрема Закони України:

– від 04.06.2015 р. № 514-VIII «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електроенергії з альтернативних джерел енергії», яким скасовано вимоги до «місцевої» складової; запроваджено «зелений» тариф для геотермальних електроустановок, для СЕС і ВЕС приватних домогосподарств потужністю до 30 кВт та введено надбавку до «зеленого» тарифу за дотримання рівня використання обладнання українського виробництва [20; 21].

Формування «зеленого» тарифу проводиться відповідно до курсу євро. За 2015–2017 рр. в Україні більше 3 тис. приватних домогосподарств встановили сонячні панелі загальною потужністю 51 МВт з інвестуванням майже €52 млн.;

– від 01.11.2016 р. № 1711-VIII «Про внесення змін до Закону України «Про альтернативні джерела енергії» щодо віднесення теплових насосів до обладнання, яке використовує відновлювані джерела енергії» приведено у відповідність до Директиви 2009/28/ЄС визначення «альтернативні джерела енергії», «гідротермальна», «геотермальна» та «аеротермальна» енергія;

– від 05.12.2017 р. №2222-19 «Про приєднання України до Статуту Міжнародного агентства з відновлювальних джерел енергії (IRENA)» сприятиме виконанню міжнародних зобов'язань щодо виробництва у 2020 р. 11%, а у 2035 р. – до 25% «чистої» енергії з поновлюваних джерел в енергетичному балансі [22; 25].

Законопроект України від 07.06.2018 р. № 8449 «Про внесення змін до деяких законів України щодо забезпечення конкурентних умов виробництва електричної енергії з альтернативних джерел енергії» передбачено, починаючи з 01.07.2019 р., запровадити новий порядок надання державної підтримки об'єктам електроенергетики, що виробляють електроенергію з енергії сонця або вітру, для СЕС – об'єкти встановленої потужності більше 10 МВт, для ВЕС – більше 20 МВт, які будуть введені в експлуатацію після 01.07.2019 р. Такі об'єкти набувають

права на державну підтримку на аукціоні з розподілу квоти державної підтримки. Нові інвестори матимуть можливість отримувати «зелений» тариф на умовах аукціону, який буде діяти не до 2030 р, а протягом 20 років із моменту введення об'єкта в експлуатацію.

Усі проекти меншої потужності будуть мати можливість вибору: працювати до 2030 р. за «зеленим» тарифом або працювати за тарифом, який визначається на аукціоні [23].

За даними Держенергоефективності Міністерством закордонних справ Фінляндії і Північної екологічної фінансової корпорації NEFCO підписано 29.11.2017 р. Угоду про створення цільового фонду для фінансування поновлюваної енергетики в Україні. Фінсько-українським цільовим фондом передбачено надання технічної допомоги і виокремлення грантових коштів обсягом €6 млн для реалізації проектів «чистої» енергетики в Україні. Сьогодні NEFCO вже профінансовано близько 150 проектів у сфері поновлюваної енергетики та енергоефективності в Україні.

Міненерговугілля України 27.02.2018 р. підписано з Міністерством закордонних справ Королівства Данія Угоду про продовження співробітництва у сфері розвитку та діяльності Українсько-Данського енергетичного центру (Угода від 22.12.2014 р. № 208\_029) щодо сприяння у формуванні сприятливого середовища для залучення інвестицій у сталий розвиток енергетики України, досягнення цілей Стратегії ЕСУ-2035 щодо доведення частки 11% поновлювальної енергії у кінцевому енергоспоживанні до 2020 р. та 25% до 2035 р.; підвищення енергоефективності та енергонезалежності, а також допомога в імplementації Національного плану дій з енергоефективності до 2020 року і в розробці та виконанні нового Національного плану дій з енергоефективності до 2035 року та Національного плану дій із відновлюваної енергетики до 2035 року; стимулюванні енергоефективності для промисловості тощо [24; 25].

**Висновки.** Світовий досвід розвитку систем розподіленої генерації говорить про можливість побудови надійних систем електропостачання на основі альтернативних поновлюваних джерел живлення. Проаналізовано енергетичний потенціал первинних джерел енергії для використання альтернативними джерелами генерації. Проаналізовано нормативно-правову базу зі сприяння розвитку альтернативної енергетики в Україні.

## Список літератури:

1. World survey of decentralized energy 2005. WADE, Edinburgh, 2004. 45 p.
2. Ackermann T., Anderson G., Soeder L. Distributed generation: a definition / Electric Power Systems Research, 2001, Vol. 57, p. 195–204.
3. Кейко А.В. Становление прогнозных технологических исследований в энергетике. / Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. С. 127–146.
4. Воропай Н.И., Кейко А.В., Клер А.М., Стенников В.А Технично-економические проблемы использования нетрадиционной энергетики / Проблемы нетрадиционной энергетики. Материалы науч. сессии През. СО РАН, 13.12.2005. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. С. 32–54.
5. Кейко А.В. Системное сопоставление энергетических технологий / Системные исследования в энергетике. Ретроспектива научных направлений СЭИ–ИСЭМ. Новосибирск: Наука, 2010. С. 215–227.
6. Стенников В.А., Воропай Н.И. Централизованная и распределенная генерация – не альтернатива, а интеграция. Известия РАН. Энергетика. № 1. С. 64–73.
7. Hansen C.J., Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies & Dept. of Geography, Oxford University, 2004. 59 p.
8. Bauen A., Hawkes A. Decentralised generation – technologies and market perspectives. IEA, Paris, 2004. 18 p.
9. Мировой опыт автономного энергоснабжения для российской глубинки. URL: [https://gisee.ru/regionsupport/articles/reg\\_programs/54702/](https://gisee.ru/regionsupport/articles/reg_programs/54702/) (дата звернення: 20.03.2021)
10. Розподілена генерація електроенергії – глобальні тенденції розвитку. URL: <http://uare.com.ua/povynu/453-rozpodilena-generatsiya-elektroenergiji-globalni-tendantsiji-rozvitku.html> (дата звернення: 02.03.2021)
11. Лежнюк П.Д., Ковальчук О.А., Нікіторович О.В., Кулик В.В. Відновлювані джерела енергії в розподільних електричних мережах: монографія. Вінниця: ВНТУ, 2014. 204 с.
12. Кудря С.О. Потенціал розвитку нетрадиційних і відновлюваних джерел енергії. Модуль 23. Київ: ЮНІДО, 2015. С. 19.
13. Законодавчі ініціативи у сфері альтернативної енергетики. Держенергоефективності. Презентація. 2017. 24 стор. URL: [www.sae.gov.ua](http://www.sae.gov.ua). (дата звернення: 09.03.2021)
14. Михайлов М.П. Звіт про виконання Угоди про Асоціацію між Україною та Європейським Союзом у 2017 році. Урядовий офіс координації європейської та євроатлантичної інтеграції, Офіс Віцепрем'єр-міністра з питань європейської та євроатлантичної інтеграції України спільно з експертами Проекту Європейського Союзу «Association4U». Київ. 2018. 88 с. URL: <http://www.eu-ua.org>. «Зеленая» оптимізація. Енергобизнес. 2018. №23. С.18–20 (дата звернення: 02.02.2021)
15. Ковальчук В.В. Інтеграція ОЭС України с ENTSO-E может снизить цены на э/э в стране на 20 – 30%. Интерфакс-Украина. 2017. URL: <https://interfax.com.ua/news/economic/437118.html>. (дата звернення: 12.12.2020)
16. Механізми фінансування заходів енергоефективності в Україні. Мінрегіон України. 2017. 64 стор. URL: <http://es.esco.agency/images/art/3-2017/art20.pdf> (дата звернення: 20.03.2021)
17. Дячук О.А. Перехід України на відновлювану енергетику до 2050 року. Презентація. 2017. 29 с. URL: [https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Studien/Studie\\_20170626](https://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Studien/Studie_20170626) (дата звернення: 20.03.2021)
18. Пріоритетні заходи для зменшення споживання природного газу в Україні (до 2022 року). Держенергоефективності. Презентація. 2017. 20 стор. URL: [http://sae.gov.ua/sites/default/files/EfWconcept\\_15\\_02\\_2018.pdf](http://sae.gov.ua/sites/default/files/EfWconcept_15_02_2018.pdf) (дата звернення: 25.03.2021)
19. Програми утеплення житла: державна і місцева підтримка у 2017 р. Держенергоефективності. Презентація. URL: [http://sae.gov.ua/sites/default/files/Final\\_Savchuk\\_2017.pdf](http://sae.gov.ua/sites/default/files/Final_Savchuk_2017.pdf) (дата звернення: 28.03.2021)
20. Савчук С.Д. Результати урядової політики скорочення споживання енергії та плани на найближчий період. Презентація. 2018. 10 стор. URL: <http://sae.gov.ua/sites/default/files/SAEE> (дата звернення: 25.03.2021)
21. Савчук С.Д. Розбудова сфери енергоефективності та відновлюваної енергетики в Україні: здобутки 2017 р. Презентація. 2017. 41 стор. URL: <http://www.sae.gov.ua>. (дата звернення: 29.03.2021)
22. Україна у співпраці з IRENA залучатиме досвід та інвестиції провідних країн світу у вітчизняну відновлювану енергетику. Держенергоефективності. Презентація. 2018. URL: <http://www.sae.gov.ua/uk/news/2148>. (дата звернення: 29.03.2021)
23. Ковальчук В.В. Укренерго-2017: Результати перших реформ. Енергетика та електрифікація. 2017. С. 10–13.
24. Михайлов М.П. «Укренерго» подводит итоги. Енергобизнес. 2018. № 7. С. 18–19.
25. Укренерго – за розвиток самодостатньої «зеленої» генерації. URL: <http://www.ukrenergo.energy.gov.ua> (дата звернення: 29.03.2021)

**Chernyuk A.M., Kirisov I.G., Cherevik Yu.O. ANALYSIS OF PROSPECTS FOR THE DEVELOPMENT OF DISTRIBUTED GENERATION OF ELECTRICITY GENERATION IN UKRAINE**

*The article considers the current trends in the development of world and domestic energy, the current state and directions of development of distributed generation systems based on alternative power sources.*

*The problems that arise during the construction of power supply systems with distributed generation are analyzed. The application of RGE may be affected by the following restrictions: the supply of natural gas, the density of electrical and thermal loads, the stability of the power system. The possibility of introducing distributed energy generation determines its competitiveness in relation to centralized systems and in this perspective depends on many factors: the level of tariffs for connection to electricity and heat networks; principles of formation of tariffs for electricity and heat, and more precisely – from the ratio of tariffs for electricity and heat and the cost of fuel; practical implementation of measures for non-discriminatory access to the electricity grid and natural gas supplies; development of the power equipment market (including its maintenance); the pace of economic development of the country as a whole and specific regions; protectionist policy of the state.*

*The world experience in construction and operation of electric networks with distributed generation is analyzed. At present, in many countries of the world, along with the development of centralized energy supply, the trend of large-scale transition to EWG, which has the advantage of greater competitiveness, is increasingly supported.*

*Possibilities of energy potential of energy carriers of RGE systems in Ukraine are analyzed. For Ukraine, in the implementation of tasks related to the large-scale use of renewable energy for RGE, it is very important to establish the energy potential of each type of RES throughout Ukraine.*

*The regulatory framework in the field of implementation and support of environmentally friendly electricity generation in Ukraine is analyzed.*

**Key words:** *distributed generation, Smart Grids, energy carriers, energy potential, alternative energy sources, “green” tariff.*

## РОЗРОБКА КОРИСНИХ КОПАЛИН

УДК 622.271.012.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/37>*Азарян В.А.*

Криворізький національний університет

### КОМПУНУВАЛЬНИЙ ПРИНЦИП ТА ТЕХНОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ ЗАСТОСУВАННЯ МОБІЛЬНИХ ДРОБИЛЬНО-СОРТУВАЛЬНИХ РАДІОМЕТРИЧНИХ КОМПЛЕКСІВ

У статті розглянуто актуальну проблему стабілізації якісних показників у інтегрованому залізорудному вантажопотоці гірничо-збагачувальних комбінатів. Під час формування загального рудопотоку найбільшу нестабільність якості викликають видобувні забої приконтактної групи родовища, що мають великі показники засмічення; локальні рудні вантажопотоки із цих забоїв мають значні коливання вмісту корисного компоненту. Нестабільність якості загального рудопотоку ГЗК, що є вхідною сировиною збагачувального комплексу, негативно впливає на якість концентрату та підвищує собівартість продукції. Зниження якості концентрату та високі витрати на його виробництво негативно впливають на конкурентоздатність гірничовидобувних та переробних підприємств України. Збільшити вміст корисного компоненту у рудопотоках із забоїв приконтактної зони «руда – порода» та стабілізувати амплітудні коливання якості можливо у разі застосування мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу, що відсікає некондиційну гірничу масу за встановленим «пороговим» значенням за наявності ознаки бінарності середовища. У запропонованому варіанті мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу радіометричний модуль є окремим рухомих агрегатом, він просувається за дробильно-сортувальним комплексом. Головною ідеєю застосування цієї технологічної схеми є можливість відпрацювання тільки тієї частини забою, що має найбільший показник засмічення, з метою відсікання некондиційної гірничої маси і, таким чином, стабілізувати амплітудні коливання якості як локального, так і загального інтегрованого рудного вантажопотоку.

Запропонована технологічна схема з окремим розташуванням радіометричного модуля дає змогу отримати технологічний, економічний, екологічний та енергозберігаючий ефект та підвищити коефіцієнт використання екскаватора. Мобільні дробильно-сортувальні радіометричні комплекси можуть бути у подальшому застосовані під час відпрацювання техногенних залізорудних родовищ.

**Ключові слова:** гірничо-збагачувальний комбінат, радіометричне сортування, рудний вантажопотік, вміст корисного компоненту.

**Постановка проблеми.** Однією з найбільш актуальних проблем у галузі залізвидобувної та переробної промисловості України є необхідність підвищення якості кінцевого продукту – концентрату, що може бути вирішено як із застосуванням новітніх технологій збагачення, так і шляхом стабілізації якісних показників у вхідному інтегрованому рудному вантажопотоці гірничо-збагачувальних комбінатів (ГЗК). Вирішення цієї проблеми разом зі зниженням собівартості виробництва є головною передумовою підвищення конкурентоздатності ГЗК України на світових ринках залізорудної сировини.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що загальний інтегрований рудний вантажопотік формується шляхом змішування у від-

повідних пропорціях обсягів видобутої із різних забоїв руди [1, с. 45]. Вміст корисного компоненту у забоях кар'єрів відрізняється внаслідок природних чинників, що зумовлені генезисом родовища, а також технологічних факторів, що викликані процесами видобутку залізорудної сировини. Під час формування загального рудопотоку кар'єру найбільш негативний вплив на його якісні характеристики чинять не стільки забої з мінімальним вмістом корисного компоненту, скільки ті, що мають великі показники засмічення. Локальні рудні вантажопотоки з таких забоїв мають значні коливання вмісту корисного компоненту у часі; це значно знижує стабільність якості загального рудного вантажопотоку. Коливання якості загального інтегрованого рудопотоку ГЗК, що є вхідною

сировиною збагачувального комплексу, негативно відображується на кінцевих показниках роботи всього комбінату, знижуючи якість концентрату та підвищуючи собівартість продукції.

Найбільший показник утрат і разубожування руд припадає на видобувні блоки приконтатних зон «руда – порода». Відомо, що головною метою буровибухових робіт є руйнування масиву гірських порід, що є передумовою наступного етапу – видобувних робіт. У процесі руйнування масиву відбувається перемішування шарів гірських порід, що його становлять. Під час підривання блоків приконтатних зон на контурі «руда – порода» внаслідок перемішування корисної копалини з порожньою породою відбувається різке зниження вмісту корисного компоненту. Так, за даними Гірничого департаменту ПАТ «АрселорМіттал Кривий Ріг», показник засмічення у блоках приконтатної зони кар'єру № 3 сягає 28% (рис. 1).

Вирішити проблему підвищення якості під час видобутку залізних руд дає змогу застосування радіометричного сортування. Принцип радіометричного сортування побудовано на існуючій залежності величини потоку відбитого гамма-випромінювання від вмісту корисного компоненту в руді. Підвищення вмісту корисного компоненту відбувається за рахунок відсікання некондиційної гірничої маси.

Упроваджені за кордоном в умовах окремих кар'єрів дробильно-сортувальні комплекси радіометричного сортування мають стаціонарне розміщення.

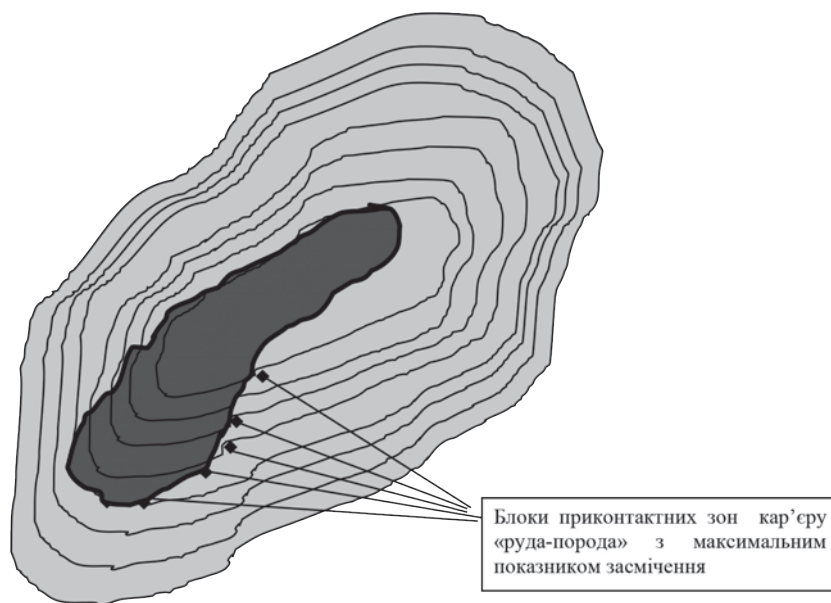


Рис. 1. Розташування блоків залізрудного кар'єру з максимальним показником засмічення

Після виймання рудної маси із забою її необхідно доправити до приймального бункера дробильно-сортувального комплексу. Промпродукт та хвосты сепарації також потрібно переміщувати додатковою транспортною ланкою [2, с. 75]. Технологічний та економічний ефект від підвищення якості залізрудної сировини знижується внаслідок значних додаткових витрат.

Теоретичною базою для впровадження радіометричного сортування в умовах відкритого видобутку залізної руди є проведені дослідження, результати яких відображено у наукових трудах А.А. Азаряна, А.Ю. Большакова, Г.М. Малахова, В.А. Мокроусова, А.М. Марюти, Є.П. Лемана, В.І. Ревнівцева та багатьох інших учених, що працювали у цьому напрямі.

Для оцінки поглинаючих і розсіюючих властивостей гетерогенних середовищ раніше було запропоновано використання технологічного терміна «ефективний атомний номер» ( $Z_{ef}$ ), суть якого полягає у тому, що він є атомним номером фіктивного хімічного елемента, якому притаманний такий самий ефект фотопоглинання на одиницю електронної щільності, як і речовині складного хімічного складу. При цьому  $Z_{ef}$  не залежить від відмінностей хімічних зв'язків або ж фізичного стану середовища [3, с. 253]

Було встановлено межі бінарного та квазібінарного середовища для подальшого використання в радіометричному сортуванні під час розпізнавання образів «руда» або «порода», для чого за корисний сигнал було прийнято пропорційне значення  $Z_{ef}$  проби, а за сумарне значення «зайвих факторів» –  $Z_{ef}$  наповнювача. Співвідношенням цих даних було доведено, що якщо  $Z_{ef}$  проби відрізняється від  $Z_{ef}$  наповнювача на 10% та більше, застосування гамма-гамма методу є обґрунтованим, що дає змогу розпізнавати та виділяти образ «руда» у загальному обсязі гірничої маси.

Раніше дослідженнями було встановлено, що якщо співвідношення  $Z_{ef,проби}/Z_{ef,наповнювача}$  дорівнює 1,1, то це характеризує середовище, що досліджується, як квазібінарне. За співвідношення  $Z_{ef,проби}/Z_{ef,наповнювача} \geq 1,2$  середовище відноситься до бінарного, при цьому ймовір-

но розпізнавання образів «руда» або «порода» становить близько 100%. Якщо ж співвідношення  $Z_{ef,проби}/Z_{ef,наповнювача} < 1,1$ , то це характеризує середовище, що досліджується, як бінарне, при цьому ймовір-



ність розпізнавання образу «руда» у загальному обсязі гірничої маси становить 95%. На підставі цього було зроблено висновок, що основні різновиди залізних руд Кривбасу порівняно з пустими породами відносяться до бінарного середовища, вони можуть бути піддані радіометричному сортуванню з вірогідністю до 95% [3, с. 264].

Сучасні технології попереднього збагачення в умовах відкритого розроблення залізрудних родовищ передбачають застосування комплексів магнітної сепарації, що розміщуються безпосередньо у кар'єрах. Але треба підкреслити, що не всі різновиди залізних руд мають магнітний складник, тому застосування до них магнітних сепараторів не буде ефективним.

**Постановка завдання.** Відомо, що чим ближче до зони видобутку відбудеться вилучення некондиційної гірничої маси з подальшого процесу транспортування і переробки, тим суттєвішим буде ефект від сортування [4, с. 24]. Тому завданням дослідження є побудова компоувальної схеми радіометричного комплексу так, щоб відсікання некондиційної відбувалося у зоні, яка найбільш наближена до забою. Саме тому цей технологічний комплекс повинен мати мобільність, щоб переміщуватися за просуванням забою. Разом із цим радіометричної сепарації не може бути піддана гірнична маса без її підготовки внаслідок різнофракційного складу. Теоретичні та практичні умови цього виду сортування мають вимоги щодо розподілу на фракції, тобто необхідне проведення попереднього подрібнення гірських порід [5, с. 11]. Із цією метою у технологічному комплексі передбачено використання дробильно-сортувального агрегату, що також має функцію мобільності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Поєднання мобільного дробильно-сортувального агрегату та радіометричного модуля запропоновано як головний компоувальний принцип мобільного радіометричного комплексу. Техно-

логічною передумовою застосування цих комплексів у залізрудних кар'єрах є можливість відсікання некондиційної гірничої маси безпосередньо у видобувних забоях приконтатної зони родовища. Прототипами мобільного радіометричного комплексу є стаціонарні радіометричні сепаратори типу РАС-2 і РС-2Ж, що були розроблені в лабораторії контролю якості Криворізького національного університету і раніше пройшли випробування на рудах Криворізького залізрудного басейну. Принцип радіометричного сортування цих сепараторів побудований на так званому «порозі сортування»: рудна маса, яка пройшла через сепаратор, матиме вищий показник умісту загального заліза, ніж встановлене «граничне» значення. Результатом випробувань із сортування кускової руди було отримання промпродукту з підвищенням умісту заліза загального на 11,5–16,8% відносно первинних значень [3, с. 272].

Мобільний дробильно-сортувальний радіометричний комплекс (МДСРК) використовує синергетичний ефект від поєднання мобільного дробильного комплексу і радіометричного сепаратора, який полягає у можливості здійснення відсікання некондиційної гірничої маси.

Технологічну схему з використанням МДСРК наведено на рис. 2. Вона складається з екскаватора (1), мобільного дробильно-сортувального агрегату (2), радіометричного модуля (3), рухомого бункера (4), самоскиду (5) та відрізняється від раніше запропонованої схеми тим, що РМ виконано окремим технологічним модулем без інтегрування у серійний мобільно-сортувальний комплекс. Це зумовлено тим, що переобладнання та монтаж радіометричного сепаратора на шасі комплексу буде неминуче пов'язано з нестачею простору або можливими порушенням діючої технологічної схеми.

Радіометричний модуль (РМ) є рухомих, він просувається за мобільним дробильно-сортувальним комплексом, а той, своєю чергою, –

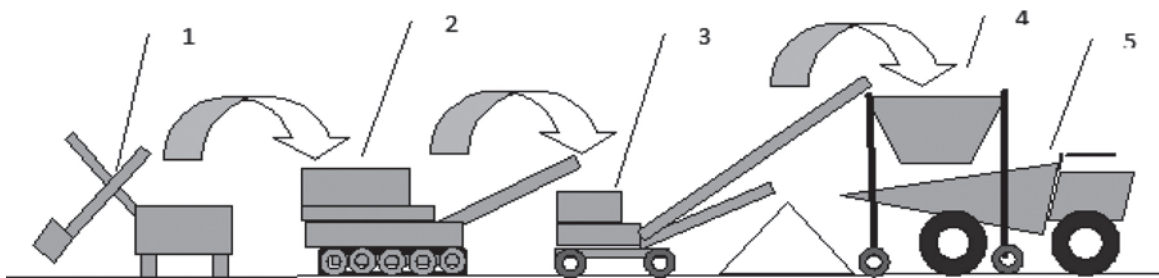


Рис. 2. Технологічна схема із застосуванням МДСРК

за просуванням забою. Технологічно мобільна дробарка поєднана з РМ через консольний розвантажувач та приймальний бункер модуля. РМ здійснює відсікання некондиційної гірничої маси за встановленим порогом сортування з використанням описаного вище принципу бінарності середовища.

Головною ідеєю застосування даної технологічної схеми є можливість відпрацювання саме тієї частини забою, що має найбільший показник засмічення внаслідок перемішування підірваної гірничої маси у видобувному блоці. Тобто весь обсяг руди у забої умовно ділиться на частину, що може бути відвантажено без переробки у самоскиди, і частину, що повинна пройти через МДСРК.

Необхідність застосування дробарки зумовлена вимогами до підготовки рудної маси для сортування шляхом забезпечення сталої крупності 50–100 і 100–300 мм залежно від умов сортування.

Для запропонованого комплексу найбільш доцільні мобільні дробарки серійного виробництва Terex Finlay J-1160 або Lokotrack LT110, що мають паспортну продуктивність до 200 т/год. [6]. Це викликано тим, що продуктивність РМ не перевищує цей показник унаслідок технічних можливостей сепаратора.

Для МДСРК визначено такий порядок роботи: рудна маса екскаватором 1 завантажується в приймальний бункер мобільного дробильно-сортувального комплексу 2, де подрібнюється.

Подрібнена рудна маса подається через розвантажувальну консоль у приймальний бункер радіометричного модуля 3, звідки вібраційним живильником подається у зону вимірювання, де піддається впливу гамма-випромінювання. Залежно від інтенсивності потоку відбитого випромінювання шибєрний пристрій відхиляється на певний кут та, таким чином, розділяє рудну масу, відсікаючи породу з умістом корисного компонента, нижчим за показник встановленого «порогу». Отриманий промпродукт завантажується через накопичувальний бункер 4 у самоскиди 5, а відбита пуста порода або складається у вигляді внутрішнього відвалу в зоні нижньої бровки уступу, якщо габарити робочої площадки це дозволяють, або через окремий накопичувальний бункер теж завантажується у транспортні засоби з подальшим транспортуванням. За можливості складування пустих порід у певному стаціонарному обсязі у відпрацьованому просторі на граничному контурі кар'єру застосування технологічної схеми МДСРК може забезпечити додатковий екологічний ефект.

Слід підкреслити, що основною технологічною перевагою МДСРК порівняно зі стаціонарними

аналогами є його мобільність, яка дає змогу переміщуватися за просуванням видобувного забою, здійснюючи відокремлення некондиційної рудної маси у точці, що найбільш наближена до забою. При цьому не потрібна додаткова транспортна ланка, знижуються витрати за рахунок виключення необхідності підготовки та будівництва площадки та капітальних споруд, в яких зазвичай розміщуються стаціонарні радіометричні комплекси.

Застосування даної технологічної схеми також дає змогу підвищити коефіцієнт використання екскаватора так: під час обміну автосамоскидів у забої екскаватор не простоює, а виконує додатковий цикл, завантажуючи приймальний бункер мобільної дробарки, тим самим забезпечуючи її та радіометричний модуль сировиною для переробки. Після обміну автосамоскидів екскаватор продовжує працювати у звичайному режимі. Наявність у технологічному ланцюгу накопичувальних бункерів, що виконують роль компенсаторів, робить схему більш гнучкою та надійною, а бункер із промпродуктом дає змогу зробити відвантаження автосамоскиду одномоментним, зменшуючи його простої до можливого мінімуму.

Технологічний ефект від застосування радіометричного комплексу полягає у можливості підвищення якості локального рудного вантажопотоку із забоїв приконтатних зон кар'єру до 5%, ураховуючи те, що приблизно третина обсягу рудної маси буде піддана сепарації, й її вміст підвищиться в середньому до 15%. Стабілізація коливань якості у локальних рудопотоках із забоїв приконтатних зон кар'єру призведе до зниження амплітудних значень умісту корисного компонента загального інтегрованого рудного вантажопотоку ГЗК, який є вхідною рудою збагачувального комплексу, що дасть змогу підвищити значення виходу концентрату (вирази 1, 2). Виходячи з комплексного критерію оцінки ефективності управління рудопотоком [3, с. 312]:

$$F_1 = (\alpha_{\text{факт.}} - \alpha_{\text{план.}}) \frac{\varepsilon}{\beta} \times Q_p \times C_4 \quad (1)$$

або

$$(\varepsilon \frac{\alpha_{\text{факт.}}}{\beta} - \varepsilon \frac{\alpha_{\text{план.}}}{\beta}) \times Q_p \times C_4 \rightarrow \min \quad (2)$$

У забоях приконтатної зони родовища відбудеться зниження загального обсягу рудної маси, що спрямовується на переробку, за підвищення вмісту корисного компонента, що призведе до зниження витрат збагачувального комплексу та дасть змогу отримати додатковий обсяг концентрату. За умови константності цін реалізації приріст випуску концентрату призведе до підвищення прибутку ГЗК.

Економічний ефект від упровадження технологічної схеми з МДСРК полягає в отриманні більш якісного концентрату. Залізородний концентрат за вмісту заліза загального 65% має ціну реалізації \$150/т, а кожен додатковий відсоток якості в продукті, вищий за 65%, має додаткову прибавку від \$3 до \$9 за т. Якщо брати в розрахунок у середньостроковому періоді ціну реалізації концентрату на рівні \$100/т та консервативну цінову прибавку у \$3/т за кожний додатковий 1% вмісту заліза загального, то збільшення виходу концентрату на 1% за умов його виробництва на рівні 50 млн т у межах Криворізького залізородного басейну призведе до додаткового надходження 500 тис т концентрату та отримання підприємствами під час його продажу додаткових \$50 млн на рік. Підвищення якості концентрату підприємств Кривбасу лише на 0,5 % дасть змогу під час реалізації продукції отримати \$82,5 млн на рік. Сумарний очікуваний ефект від застосування технологічної схеми з МДСРК становить \$132,5 млн на рік.

Слід також зазначити як подальший напрям досліджень, що запропонований комплекс також може бути використаний під час відпрацювання техногенних залізородних родовищ. У Кривбасі,

за різними оцінками, у відвалах знаходиться 13 млрд т розкривних порід, а у хвостосховищах – до 6 млрд т відходів збагачення бідних залізних руд. В останні роки все активніше досліджується можливість використання накопиченої у відвалах та хвостосховищах Криворізького басейну мінеральної маси [7, с. 3]. Більшу частину цих відвалів становлять низькокондиційні залізні руди, які не мають магнітного складника. Ці руди є важко збагачуваними, але в майбутньому ці техногенні родовища неминуче будуть піддані переробці, і одним зі способів попереднього збагачення є застосування радіометричної сепарації за допомогою МДСРК.

**Висновки.** Запропонована технологічна схема мобільного дробильно-сортувального радіометричного комплексу з окремим розташуванням радіометричного модуля дає змогу отримати певний технологічний, економічний, екологічний та енергозберігаючий ефект.

Застосування даної схеми дає змогу підвищити коефіцієнт використання екскаватора.

МДСРК у подальшому також може бути використаний під час відпрацювання техногенних залізородних родовищ.

#### Список літератури:

1. Бызов В.Ф. Управление качеством продукции карьеров : учебник. Москва, 1991. 239 с.
2. Федоров М.Ю. Основные технические и конструктивные принципы рентгенорадиометрических сепараторов РАДОС. III междунар. науч.-технич. конф. «Рентгенорадиометрическая сепарация минерального сырья и техногенных отходов». Екатеринбург, 2007. С. 70–79.
3. Азарян В.А. Технологіко-теоретичні засади управління якістю залізвмісної сировини генералізованого комплексу рудопотоків гірничо-збагачувальних комбінатів : дис. ... докт. техн. наук : 05.15.03 «Відкрита розробка родовищ корисних копалин». Кривий Ріг, 2019. 376 с.
4. Ревнивцев В.И., Леман Е.П., Кротков М.И. Рентгенорадиометрический метод в комплексной системе управления качеством руд. *Обогащение руд*. 1983. № 5. С. 24–25.
5. Мокроусов В.А., Остроумов Г.В., Кузнецов А.П. Применение радиометрических методов для обогащения полезных ископаемых. *Обогащение руд*. 1985. № 5. С. 10–12.
6. URL: <http://www.tehnoplaza.kiev.ua/drobilno-sortirovochnye-kompleksy/>.
7. Вилкул Ю.Г., Азарян А.А., Колосов В.А. Переработка и комплексное использование минерального сырья техногенных месторождений. *Гірничий вісник*. 2013. № 96. С. 3–10.

#### **Azarian V.A. COMPOSING PRINCIPLE AND TECHNOLOGICAL ASPECTS OF APPLICATION OF MOBILE CRUSHING AND SORTING RADIOMETRIC COMPLEXES**

*The topical issue of stabilizing qualitative indicators in the integrated iron ore cargo flow at mining and processing plants is considered in the article. During the total ore flow formation, the highest quality instability is caused by the mining extraction face of the deposit contact group with high clogging rates; local ore cargo flows from such faces have significant fluctuations in the useful component content. The quality instability of the total ore flow from MPP, which is the input raw material of the ore mining and processing plant, negatively affects the concentrate quality and increases the cost of production. Decreased quality of concentrate and high costs of its production negatively affect the competitiveness of mining and processing plants in Ukraine. The useful component content in ore flows from the face of the contact zone "ore-rock" may be increased and the amplitude fluctuations of quality can be stabilized in applying mobile crushing and sorting radiometric complex cutting off the off-specification run-of-mine at the set "threshold" value in the presence of binary environment sign. The radiometric module is a separate mobile unit in the proposed option of the mobile*

*crushing and sorting radiometric complex. It moves along the crushing and sorting complex. The main idea of this process flow diagram is the ability to work only the part of the face with the highest clogging rate in order to cut off off-specification run-of-mine and, thus, to stabilize the amplitude fluctuations in quality for both local and total integrated ore cargo flow.*

*The proposed process flow diagram with a separate location for the radiometric module provides obtaining technological, economic, environmental and energy saving effect and increases the excavator utilization. Mobile crushing and sorting radiometric complexes may be further used in the development of technogenic iron ore deposits.*

**Key words:** *ore mining and processing plant, radiometric sorting, ore cargo flow, useful component content.*

## ТРАНСПОРТ

УДК 502.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/38>

**Тірон-Воробйова Н.Б.**

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

**Данилян А.Г.**

Дунайський інститут

Національного університету «Одеська морська академія»

### МІЖНАРОДНА МОРСЬКА ОРГАНІЗАЦІЯ ЯК СТРАТЕГІЧНА СТАЛА МІСІЯ У ВІДРОДЖЕННІ ОКЕАНІВ

Океани займають 99% усієї площі нашої планети, заселені фауною, флорою, здатні прогнати більші 3,5 млрд людей, але запаси продукції, що видобуваються з року в рік, виснажуються, тому щороку людство втрачає 50 млрд доларів. Глобальне потепління різко погіршило стан океанів, збільшуючи закислення вод, знижуючи показник рН, що негативно відбивається на промислових рибах молодого віку (особливо цінних порід). Стратегічний план Міжнародної морської організації (ІМО) SD4 визначив шляхи та інструментарій розвитку відродження Світового океану щодо його деградації до 2030 року, які відображені в Програмі Організації Об'єднаних Націй (ООН) (цілі стійкого розвитку: 2020–2030 рр.). SD4 ІМО є 14-ою ціллю відродження океанів в умовах пандемії. Програма з навколишнього середовища передбачає до 2030 року реалізувати 90 трлн доларів, тим самим покінчивши з хворобами, війнами та згубними процесами проживання людини, відродивши чистоту океанів. Провідну роль контролю й управління відводять ІМО як ексклюзивному міжнародному менеджеру всіх водних ресурсів планети. Як уважає ЮНЕСКО (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), океани є нашим порятунком у боротьбі з пандемією, адже бактерії, виявлені в глибоководних його районах, здатні створити новий вид експрестесту і високоефективних препаратів у боротьбі з багатьма вірусними захворюваннями. Досить стійке зростання економічних аспектів (з огляду на план розвитку на 2030 рік) буде реалізовано підтримкою транспортного світового сектору (завдяки безперебійній роботі ІМО) й запланованих цілей стійкого розвитку. Неабияку роль у розвиненості широкого кола питань щодо збереження водного сектору надається затвердженню Конвенцій, у яких передбачено довгострокову реалізацію окреслених стандартів, прерогатив, правил.

**Ключові слова:** Міжнародна морська організація, стратегічні напрями (директиви), 14-та мета збереження океанів, стала місія, Організація Об'єднаних Націй.

**Постановка проблеми.** ММО (ІМО) – Міжнародна морська організація – це спеціалізоване агентство Організації Об'єднаних Націй (ООН), відповідальне за безпеку судноплавства та попередження морського та атмосферного забруднення суднами. ІМО (далі – Організація) може укладати угоди про співпрацю з іншими міжурядовими органами певних організацій із питань, що становлять спільний інтерес, із метою забезпечення максимуму координації щодо таких питань. Нині є 63 міжурядові організації, які підписали угоди про співпрацю з ІМО. Організація складається з Асамблеї, Ради та п'яти основних Комітетів:

- the Maritime Safety Committee;
- the Marine Environment Protection Committee;
- the Legal Committee;
- the Technical Cooperation Committee;
- the Facilitation Committee.

Так, низка підкомітетів підтримують роботу основних технічних комітетів.

ІМО (як спеціалізоване агентство ООН) є світовим стандартом установлення повноважень із безпеки, охорони та екологічних показників міжнародної доставки. Головна роль Організації полягає у створенні нормативної бази для судноплавної галузі, яка є справедливою та ефективною, загальноприйнятою та універсально реалізованою. Тобто

її роль полягає у створенні рівних «ігрових умов» для цієї галузі, коли оператори суден, просто скоротивши кути і компрометуючи безпеку та екологічні показники, не можуть вирішити свої фінансові проблеми. На цьому підході також базуються інновації та заохочується ефективність.

Судноплавання – це справді міжнародна галузь, яка може працювати ефективно, якщо норми та стандарти самі узгоджені, прийняті та впроваджені на міжнародній основі. ІМО – це форум, на якому відбувається цей процес.

Заходи ІМО охоплюють усі аспекти міжнародного судноплавання, включаючи дизайн суден, будівництво, обладнання, комплектування, експлуатацію та утилізацію (безпеку, екологічність, енергоефективність). ІМО (як частина сім'ї ООН) активно працює у напрямі сталого розвитку на 2030 рік [1] та пов'язаних із цим стратегічних директив (напрямів). Дійсно, більшість елементів такого розвитку на 2030 рік буде реалізовуватися лише зі стійким становленням транспортного сектору, що підтримує світову торгівлю та сприяє світовій економіці.

Комітет технічного співробітництва ІМО офіційно затвердив зв'язки між робочою групою з технічної допомоги Організації й стратегічними директивами. Поки мета океанів – директива 14 – є центральною для ІМО, але аспекти роботи Організації можуть бути пов'язані з усіма окремими директивами [2].

Енергоефективність, нові технології та інновації, морська освіта та навчання, морська безпека, управління морським рухом та розвиток морської інфраструктури; розробка та впровадження за допомогою ІМО; глобальні стандарти, що охоплюють ці та інші питання, будуть підкріплені прихильністю ІМО забезпечити інституційну базу, необхідну для екологічного та стійкого глобального розвитку системи морського транспорту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ІМО продовжує провадити свою діяльність, дотримуючись таких Стратегічних указівок (напрямів-директив) визначення сфер, на які слід звернути особливу увагу в період 2018–2023 рр.:

- SD (strategic direction) 1 Improve implementation;
- SD 2 Integrate new and advancing technologies in the regulatory framework;
- SD 3 Respond to climate change;
- SD 4 Engage in ocean governance;
- SD 5 Enhance global facilitation and security of international trade;
- SD 6 Ensure regulatory effectiveness;
- SD 7 Ensure organizational effectiveness [3].

Четверта ціль збереження океанів. Для забезпечення сталого розвитку діяльності в морському просторі повинна бути збалансована «здатність» Світового океану залишатися здоровим у довгостроковій перспективі.

ІМО, активно співпрацюючи з іншими відповідними органами, повинна забезпечити, щоб використання морських просторів не тільки непропорційно обмежувало здатність судноплавання підтримувати та сприяти сталому розвитку світової економіки, соціально-економічному прогресу та розвитку, а також сприяло здійсненню відповідних аспектів директив.

1. Фактори, які впливають на навколишнє середовище, глобальне потепління як результат парникового ефекту.

Зміна клімату, тобто підвищення глобальної температури поверхні Землі, є однією з проблем планетарного масштабу з тривожними прогнозами, що викликає підвищений інтерес протягом останніх десятиліть. Глобальне потепління – це спостережуване або прогнозоване підвищення середньої температури поверхні, що становить середньозважену за площею: 1) температуру поверхні океану, тобто підповерхневу середньомасову температуру океану на глибині декількох метрів; 2) поверхневу температуру повітря на суші на висоті 1,5 м над рівнем ґрунту.

Явище глобального потепління пояснено посиленням парникового ефекту внаслідок підвищення в атмосфері Землі концентрації так званих «парникових» газів ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_3$  та ін.). Зазначимо, що для визначення концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері використовуються позначення: ppm (parts per million) – кількість молекул  $\text{CO}_2$  в одному млн молекул повітря; чм – частинок на млн частинок повітря.

Виявлені тренди підвищенням концентрації  $\text{CO}_2$  в атмосфері і зростання глобальної температури стали предметом ініціатив з аналізу клімату.

З'явилися численні публікації у засобах масової інформації та наукових виданнях із викладом необоротних драматичних для планети і її окремих районів наслідків, серед яких:

- підйом рівня світового океану внаслідок танення льодовиків, що призведе до затоплення низинних територій низки прибережних і острівних країн та підвищення кислотності океанів;
- порушення біологічної різноманітності: деякі види тварин і рослин не зможуть пристосуватися до нових умов і можуть зникнути, що може викликати зниження врожайності низки сільськогосподарських культур;

– нестача питної води, міграція комах і, як наслідок, поширення епідемій (лихоманка, малярія);  
 – ускладнення доступу до водних і продовольчих ресурсів, що може привести до загострення міждержавних відносин; збільшення витрат енергії на кондиціонування будівель (приміщень) у містах.

Учені-океанологи вирішальну роль у формуванні клімату Землі відводять Світовому океану. Стан атмосфери значно залежить від океану, маса якого в 1 000 разів більше за масу атмосфери, а теплоємність – у 3 500 разів. Величина природних потоків ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , пил) з океану і суші в атмосферу і назад на Землю вимірюються десятками мільярдів тонн на рік і значно перевищують викиди цих речовин в атмосферу в результаті діяльності людини, зокрема під час спалювання кам'яного вугілля і рідкого палива, отриманого з нафти та газу. Загальний уміст вуглекислого газу в океані в 50 разів більший, ніж в атмосфері, і навіть слабке дихання океану може драматично міняти рівень  $\text{CO}_2$  в атмосфері.

2. Захист людства від шкідливих вірусів, пандемії COVID-19 у використанні ресурсів Світового океану.

Пандемія COVID-19 продемонструвала глибокий взаємозв'язок між людським і планетарним здоров'ям, а також необхідність міжнародного співробітництва у протидії глобальним загрозам. Вона завдала серйозної шкоди світовій економіці, значно вплинула на суспільство і завдала колосальної шкоди нашим громадам. Це збільшило фінансовий тиск на країни, що розвиваються, зокрема на найменш розвинені країни і малі островні держави, що розвиваються.

Океани страждають від перевилову ресурсів і задихаються від пластикових відходів. Вуглекислий газ, який вони поглинають, підкислює моря. Коралові рифи знебарвлюються і вмирають. Забруднення повітря і води щорічно забирає життя 9 мільйонів людей, що понад ушестеро перевищує нинішні втрати через пандемію. А оскільки люди і худоба все глибше заповнюють ареали проживання диких тварин і руйнують природу, ми стаємо свідками того, як дедалі більше вірусів й інших збудників хвороб переходять із тварин на людей.

Не слід забувати про те, що 75% нових і таких, що виникають, інфекційних захворювань людини є зоонозними. Сьогодні у двох нових важливих доповідях Всесвітньої метеорологічної організації та Програми ООН із навколишнього середовища говориться про те, наскільки ми близькі до кліматичної катастрофи. 2020 рік увійде в

тріюку найтепліших років за всю історію, навіть з урахуванням охолоджувального ефекту урагану «Ла-Нінья» цього року. Останнє десятиріччя було найтеплішим в історії людства. Температура Океану досягла рекордно високого рівня.

У цьому році понад 80% простору Світового океану [4–5] зазнало впливу сильної спеки. В Арктиці у 2020 році були зафіксовані абсолютно високі показники температури, більше ніж на 3 градуси Цельсія вище середнього, а в північному Сибіру – більше ніж на 5 градусів. У жовтні площа арктичного льоду зменшилась до рекордно значення, а зараз його відновлення відбувається максимально низькими темпами.

У довгостроковій перспективі триває танення гренландських льодів, які втрачають у середньому 278 гігатонн на рік. Вічна мерзлота тоне і, відповідно, виділяє метан – потужний парниковий газ. Апокаліптичні пожежі і повені, циклони й урагани все частіше стають новою нормою.

Під час сезону ураганів у північній частині Атлантики відбулося 30 ураганів, що понад удвічі перевищує середній показник за багато років і є новим сезонним рекордом. Центральна Америка досі не оговталася від двох ураганів поспіль, які зробили цей сезон найбільш інтенсивним за останні роки. Минулого року такі лиха обійшлися світу в 150 млрд дол. США.

Карантинний режим (у зв'язку з COVID-19) призвів до тимчасового зменшення викидів і забруднення навколишнього середовища. Водночас рівень умісту вуглекислого газу все ще є рекордно високим і продовжує зростати. У 2019 році рівень умісту вуглекислого газу досяг 148% від доіндустріального рівня. У 2020 році, незважаючи на пандемію, тенденція до підвищення збереглася. Показники вмісту метану злетіли ще вище – до 260%. Уміст закису азоту, який є потужним парниковим газом, що також завдає шкоди озоновому шару, збільшився на 123%. Кліматичні стратегії все ще не відповідають масштабам наявних проблем. Зараз обсяг викидів на 62% вище, ніж у 1990 році, коли почалися міжнародні переговори щодо клімату. Кожна десята частина градуса потепління має значення.

Нині потепління становить 1,2 градуса і вже викликало безпрецедентні надзвичайні кліматичні явища і нестабільність у всіх регіонах і на всіх континентах. У цьому столітті нам доведеться пережити величезний підйом температури на 3–5 градусів Цельсія.

Із наукової точки зору ситуація абсолютно зрозуміла: щоб обмежити підвищення температури

до 1,5 градусів Цельсія вище за доіндустріальний рівень, необхідно зменшувати видобуток викопних видів палива у світі приблизно на 6% щорічно в період до 2030 року. Замість цього світ рухається в зворотному напрямку і планує щорічне зростання на 2%.

Наслідки цих агресивних дій щодо нашої планети перешкоджають нашим зусиллям для подолання бідності і ставлять під загрозу продовольчу безпеку. І це ще більше ускладнює нашу роботу з досягнення миру, оскільки такі потрясіння породжують нестабільність, міграцію і конфлікти. Не випадково 70% найбільш уразливих до зміни клімату країн належать також до країн із найслабшим рівнем економіки, політичного врядування та з 15 країн, які перебувають у зоні найбільшого кліматичного ризику, у восьми перебувають миротворчі або спеціальні політичні місії ООН. Як завжди, найбільше страждають найменш захищені групи населення світу. Найбільше страждають ті, хто мав найменший вплив на виникнення проблеми. Навіть у розвинутих країнах маргіналізовані групи першими отримують удар лих і останніми оговтуються від наслідків.

**Постановка завдання.** У статті поставлено такі завдання, як:

- оцінка теоретичного підходу щодо цілісної картини опису основних відомостей Міжнародної морської організації;
- опосередкований аналіз фінансової діяльності ІМО на період 2018–2020 рр.;
- аналіз впливу парникового ефекту на глобальне потепління;
- розгляд проблематики відродження світового океану в умовах COVID-19 за внесенням багатогранних ресурсів ІМО;
- роль ІМО у наданні можливостей розвитку судноплавства в період 2020–2030 рр.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Програма ООН про відродження середовища існування людства в період 2019–2030 рр. поєднує фінансування певних програм та роль ІМО у їх реалізації [6]:

Місія ІМО як об'єднаного спеціалізованого агентства з питань – сприяння безпеці, екологічності, ефективному та стійкому розвитку судноплавства завдяки співпраці. Це буде здійснено, прийнявши найвищі практичні стандарти морської безпеки, ефективності судноплавства та запобігання й контролю забруднення із суден шляхом як розгляду відповідних правових питань, так і ефективного впровадження інструментів ІМО (з метою їх універсального та рівномірного застосування).

«ООН-Океани» – міжвідомчий механізм, який прагне вдосконалити координацію, узгодженість та ефективність компетентних організацій системи ООН та «Міжнародний орган морського дна» (the International Seabed Authority).

UN-Oceans («ООН-Океани») була створена для того, щоб:

– посилити та сприяти координації та узгодженості системної діяльності ООН, яка пов'язана з океаном та прибережними зонами;

– регулярно ділитися поточними та запланованими заходами, що беруть участь організацій у межах відповідних мандатів ООН із метою виявлення можливих сфер співпраці та взаємодії;

– сприяти (за необхідності) участі організацій-учасниць щорічним звітам Генерального секретаря з питань океанів та морського права та ін., яке буде подано до Секретаріату;

– сприяти міжвідомчому обміну інформацією, включаючи досвід, найкращі практики, інструменти та методології й уроки, отримані в суміжних тематичних питаннях щодо Світового океану.

Програма ООН про відродження середовища існування людства на період 2019–2030 рр.:

1. До 2030 року підвищити економічні вигоди, одержувані малими острівними державами, що розвиваються, і найменш розвиненими країнами від екологічно раціонального використання морських ресурсів (завдяки екологічно раціональній організації рибного господарства, аквакультури і туризму).

2. Збільшити обсяг наукових знань, розширити наукові дослідження і забезпечити передання морських технологій, беручи до уваги Критерії і керівні принципи щодо передання морських технологій, розроблені Міжурядовою океанографічною комісією, щоб поліпшити екологічний стан океанського середовища і підвищити вклад морського біорізноманіття у розвиток країн, що розвиваються, особливо малих острівних держав, що розвиваються, і найменш розвинених країн.

3. Забезпечити доступ дрібних господарств, що займаються кустарним рибним промислом, до морських ресурсів та ринків.

4. Поліпшити роботу зі збереження і раціонального використання океанів і їх ресурсів шляхом дотримання норм міжнародного права, закріплених у Конвенції ООН із морського права, яка, як зазначено в пункті 158 документа «Майбутнє, якого ми хочемо», закладає юридичну базу для збереження і раціонального використання Світового океану і його ресурсів.

Плани сталого розвитку океану повинні відповідати Порядку дня у сфері сталого розвитку на



період до 2030 р., ґрунтуватися на комплексному управлінні океаном і знаннях про екосистеми [7], вирішувати проблеми, пов'язані з усіма наземними і морськими джерелами, враховувати прогнозовані наслідки зміни клімату. Будучи фундаментом стійкої економіки океану, ці плани повинні розроблятися і реалізовуватися в межах процесу, заснованого на принципах інклюзивності, участі, прозорості та відповідальності.

Щодо багатогранної діяльності ІМО як світового менеджера із захисту повітряного океану і водних ресурсів.

Проблеми охорони Світового океану набули глобального значення для всіх держав унаслідок того, що морське середовище не розділене кордонами. Системою течій (через поверхневий стік, взаємозв'язок з атмосферою) шкідливі речовини розповсюджуються на величезні площі і значні відстані від конкретного джерела забруднення. Саме тому міжнародне співробітництво у цій галузі має виключне значення для всього світового співтовариства.

Найважливішу роль у координації міжнародної діяльності з охорони водних ресурсів планети відіграють міжнародні угоди (Конвенції), які вже давно використовуються у міжнародному праві та практиці. Конвенції затверджуються міжнародними організаціями на конференціях. Першою міжнародною угодою, яка встановила певні зобов'язання держав у галузі охорони Світового океану, була Лондонська Конвенція з попередження забруднення моря нафтою 1954 р. Конвенцією заборонено зливання нафти із суден, установлено заборонені зони, нею зобов'язано кожну державу, яка підписала Конвенцію, застосувати необхідні заходи для обладнання окремих портів пристроями для приймання нафтових залишків.

Після Лондонської конвенції 1954 р. першими міжнародно-правовими документами у галузі морського права, які започаткували процес його кодифікації, були чотири конвенції 1958 р.:

- про територіальне море і прилеглу зону;
- про континентальний шельф;
- про відкрите море;
- про рибальство й охорону живих ресурсів моря.

Усіма питаннями, пов'язаними з проблемами Світового океану, займається ІМО. Це міжнародна міждержавна організація, що має статус спеціалізованої агенції ООН. У межах ІМО проведено багато конференцій, що завершилися укладенням конвенцій із різних аспектів морського судноплавства. ІМО затвердила велику кількість рекомендацій, кодексів, керівництв, настанов, резолюцій. ІМО вирішує

питання, пов'язані із забезпеченням співробітництва у судноплавстві й мореплаванні, розробкою рекомендацій і проектів конвенцій із морського права.

Отже, міжнародний правовий режим використання й охорони водних ресурсів планети базується на таких головних аспектах, як: регулювання рибальства та інших морських промислів; використання донних надр і прямих надр океану за межами шельфу можливе виключно в мирних цілях; проведення багатосторонніх наукових досліджень океану, а також атмосфери і космосу з морських акваторій; тісний взаємозв'язок правового режиму повітряного простору над відповідними акваторіями з правовим режимом океану; дотримання правового режиму торговельного судноплавства і військового мореплавства.

Щодо розвитку судноплавства на період 2020–2030 рр. і роль ІМО в цьому процесі.

Судноплавна галузь є найбільш глобальною з усіх найбільших світових галузей і однією з найнебезпечніших. Ключова роль ІМО полягає у створенні нормативно-правової бази для судноплавної галузі, яка є справедливою і ефективною, повсюдно застосовується і повсюдно імплементується.

Функції Організації:

1) уживає дієвих заходів щодо забезпечення безпеки та охорони життя на морі, включаючи заходи, націлені на попередження піратських нападів на екіпажі й судна;

2) на міжнародному рівні розробляє і встановлює стандарти й правила, які стосуються: проектування, будівництва, обладнання, формування екіпажів, експлуатації та утилізації морських суден; морської освіти і професійної підготовки; розвитку морської інфраструктури; інноваційних технологій і передових практик;

3) управляє морськими перевезеннями для забезпечення безпеки, екологічності та енергоефективності світового судноплавства;

4) є форумом, на якому відбувається процес взаємообміну інформацією між представниками держав-членів і зацікавленими сторонами з усіх питань, що стосуються торгового судноплавства і морських перевезень;

5) просуває сталий розвиток судноплавної і морської галузі, що є одним із пріоритетних напрямів роботи Організації на найближчі роки.

ІМО забезпечує механізми для співпраці між урядами у формуванні норм і правил, пов'язаних із технічними питаннями, що впливають на міжнародне судноплавство, для сприяння затвердженню здійснених стандартів безпеки та ефективності морського судноплавства, а також для

охорони морського середовища через запобігання та боротьбу з її забрудненням суднами.

**Висновки.** Глибокий аналіз фінансового плану ІМО показав високий ступінь ефективності роботи організації протягом 2018–2020 рр. Порушено питання цільових напрямів, пов'язаних із програмою SD4 [8] на найближчу перспективу 2020–2030 рр., які дозволять значно поліпшити стан Світового океану та його флори і фауни.

У статті проаналізовано основні напрями з локалізації шкідливих викидів в атмосферу, очищення

океану і використання його ресурсів у боротьбі зі шкідливими вірусами та пандемією COVID-19.

Представлено систему заходів ІМО, необхідних для значного поліпшення ролі судноплавства і вантажоперевезень щодо їх ефективності та безпеки.

Доведено високий рівень авторитету ІМО в ООН і всієї світової громадськості: завдяки успішній фінансовій діяльності ІМО кожний отриманий і зароблений долар був примножений та витрачений на поліпшення чистоти повітряного океану і водних ресурсів.

#### Список літератури:

1. IMO Financial Statements. URL: <https://www.imo.org/en/OurWork/Pages/Financial-Statements.aspx> (дата звернення: 31.12.2019).
2. International ocean governance. URL: [https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/ocean/international-ocean-governance\\_en](https://ec.europa.eu/oceans-and-fisheries/ocean/international-ocean-governance_en)
3. Цель 14: Сохранение и использование океанов, морей и морских ресурсов в интересах устойчивого развития. URL: <https://www.un.org/sustainabledevelopment/ru/oceans/>
4. UN-Oceans. URL: <http://www.unoceans.org/>
5. Marine biological diversity beyond areas of national jurisdiction. URL: [https://www.un.org/depts/los/biodiversityworkinggroup/marine\\_biodiversity.htm](https://www.un.org/depts/los/biodiversityworkinggroup/marine_biodiversity.htm)
6. Тірон-Воробйова Н.Б., Данилян А.Г. Фоміна К.А. Спроба України наблизитися до міжнародних морських стандартів: аудит міжнародної морської організації (ІМО). «Сучасні проблеми екологічного контролю та аудиту»: зб. інтернет конф. з міжнар. участю (м. Харків, 2021 р.). Харків, 2021. С. 72–73.
7. Тірон-Воробйова Н.Б., Данилян А.Г. Екологічні проблеми на морському транспорті: шлях до їх подолання. Безпека людини в контексті наукового пошуку та технологічних рішень: зб. наук.-практ. конф. (м. Київ, 24-25 лютого 2021 р.). Київ, 2021. С. 7.
8. Тірон-Воробйова Н.Б., Данилян А.Г. Відродження океанів в умовах пандемії: стійка економіка – стратегічний напрямок SD4 ІМО // Інноваційні підходи до розвитку компетентнісних якостей фахівців в умовах професійного становлення: зб. V-ої наук. -практ. конф. з міжнар. участю (м. Ізмаїл, 28 травня 2021 р.). Ізмаїл, 2021.

#### **Tiron-Vorobiova N.B., Danylyan A.H. INTERNATIONAL MARITIME ORGANIZATION AS A STRATEGIC SUSTAINABLE MISSION IN OCEAN REVIVAL**

*The world's oceans cover 99% of our planet, which is inhabited by fauna and flora capable of feeding more than 3.5 billion people, but the reserves of products extracted from year to year are depleted, and each year humanity loses \$ 50 billion. Global warming has sharply worsened the oceans, increasing water acidification and lowering the pH, which has a negative effect on young commercial fish (especially valuable species). The Strategic Plan of the International Maritime Organization (IMO) SD4 has identified ways and tools for the development of the revival of the oceans for its degradation by 2030, as reflected in the UN Sustainable Development Program (2020-2030). SD4 IMO is the 14th goal of ocean recovery in a pandemic. The environmental program plans to sell \$ 90 trillion by 2030, ending disease, war, and the destructive processes of human habitation, restoring the purity of the oceans. The leading role of control and management is assigned to IMO, as the exclusive international manager of all water resources of the planet. According to UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization), the oceans are our salvation in the fight against a pandemic, bacteria found in deep areas are able to create a new type of rapid tests and highly effective drugs to combat many viral diseases. Sufficiently stable growth of economic aspects in terms of development for 2030 will be realized with the support of the global transport sector, thanks to the smooth functioning of the IMO and the planned goals of sustainable development. An important role in the development of a wide range of issues related to the conservation of the water sector is given to the adoption of conventions that provide for the long-term implementation of planned standards, prerogatives, rules.*

**Key words:** International Maritime Organization, Strategic Directions (Directives), 14th Ocean Conservation Goal, Mission, United Nations.

**Хабутдінов Р.А.**

Національний транспортний університет

**Федоренко І.О.**

Національний транспортний університет

## АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПОКАЗНИКІВ ТРАНСПОРТНОЇ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОБУСА ДЛЯ МІСЬКИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Пріоритетним напрямом розвитку міських пасажирських перевезень є оновлення рухомого складу. Велика капіталоємність інвестиційних проектів, різноманіття конструктивно-технічних особливостей сучасних автобусів, високі рівні енергоємності та ресурсоємності автобусних перевезень на міських маршрутах, величини яких суттєво залежать від значень кількості пасажирів в автобусі, зумовлюють актуальність техніко-технологічного підходу і нових методів обґрунтування міських автобусів, які відповідають концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження на автотранспорті.

Наукова новизна полягає у застосуванні моделі транспортно-технологічної операції автобусних перевезень на заміну від транспозиційної за схемою віртуального руху автобуса з технічною швидкістю. Практичне значення для транспортних підприємств полягає в реалізації концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження в автобусних перевезеннях з урахуванням конструктивних факторів, дорожніх умов тощо. Основною метою статті є встановлення закономірностей зміни показників транспортної енергоефективності автобуса на міських маршрутах від впливу різних факторів (довжини перегону між зупинками, максимальної потужності двигуна автобуса, коефіцієнта статичного використання його пасажиромісткості). Установлено актуальність комплексного підвищення транспортної енергоефективності міських автобусних перевезень з урахуванням концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження. Установлено залежності комплексу показників транспортної енергоефективності автобуса від довжини перегону, коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості, максимальної потужності двигуна. У роботі пропонується новий підхід і метод моделювання транспортно-технологічної операції автобусних перевезень, за допомогою яких отримано математичні та графічні залежності, що дозволяють ухвалювати більш обґрунтовані рішення під час оновлення автобусів за концепцією експлуатаційно-технологічного енергозбереження. Проведено аналіз техніко-експлуатаційних властивостей і транспортної енергоефективності автобуса для міських пасажирських перевезень на прикладі автобуса Богдан А70132.

**Ключові слова:** автобус, автотранспортний процес, транспортно-технологічна операція, транспортна енергоефективність, паливна енергоефективність, міські пасажирські перевезення.

**Постановка проблеми.** У загальному обсязі автомобільних пасажирських перевезень частка міських перевезень в Україні становить приблизно 82%, приміських – 15%, міжміських – 3%, міжнародних – 0,002%. Міські автобуси щодня проїжджають по 200–250 км. Наявний парк міських автобусів характеризується високим рівнем фізичного та морального зношення, що зумовлює необхідність прискореного його оновлення з використанням нових методів аналізу придатності автобусів до енергозберігальних технологій перевезень і до концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження на автотранспорті [1; 11].

Такі методи базуються на теорії енергоресурсної ефективності автотранспортних засобів, технологій і процесів, яка розроблена на кафедрі транспорт-

них технологій НТУ [1; 8; 11]. Для оцінки техніко-технологічного рівня автобусів пропонується використовувати комплекс безрозмірних показників транспортної енергоефективності автобуса. Застосовується новий метод імітаційного моделювання функціонування автобуса як ресурсо-технологічного засобу виробництва автотранспортної послуги з використанням математичних моделей його адаптивно-дискретної кінематики, динаміки та енергетики в міських тестових операціях різної довжини.

Наявні методи обґрунтування оновлення парку автобусів [2; 3; 4; 5; 7] не відповідають вищезгаданій концепції технологічно-інноваційного енергозбереження на автотранспорті [11].

На цьому етапі розвитку перевезень виникає проблема вибору автобусів для здійснення

міських пасажирських перевезень із метою оновлення рухомого складу з урахуванням великої кількості виробників транспортних засобів, типів автобусів та їх конструкцій. У наявних методах вибору автобуса та вдосконалення організації автобусних перевезень [2; 3; 4; 5; 6; 7] розглядається схема віртуального переміщення пасажирів (рух автобуса між зупинками), причому враховуються лише факти відправлення та прибуття на зупиночний пункт (далі – ЗП). Рух вважається сталим (із певною технічною швидкістю). Робота виконана в межах кафедральної науково-дослідної роботи на тему «Теоретичні основи транспортно-технологічних енергозберігальних процесів» (Національний транспортний університет, номер державної реєстрації – 0121U110243, 2017-2022 р.), а також положень Національної транспортної стратегії України до 2030 року, схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30.03.2018 р. № 430-р, ст. 3 Закону України «Про енергозбереження» від 01.07.1994 р. № 74/94-ВР.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У теоріях транспортної економіки й організації автомобільних перевезень [4; 5; 6; 7; 8] знання про транспортний процес формуються на основі суто емпіричного підходу і двох принципів:

а) підміни схеми транспортної операції схемою віртуальної транспозиційної операції;

б) незмінності параметрів автомобілів і транспортних технологій (принцип FUT – Freezing Undescribed Technology).

Завдяки цим принципам у названих теоріях відсутній науковий опис виробничої сутності машинних процедур та процесів автотранспортних технологій. Крім того, відсутня можливість теоретичного аналізу впливу техніко-технологічних новацій на транспортну енергоефективність нових автобусів як носіїв технічних ресурсів автотранспорту. У математичних моделях для аналізу собівартості пасажирських перевезень ураховується тільки один параметр автобуса – його пасажиромісткість (тобто розглядається найпростіший перевізний засіб – кузов) [3; 5; 6; 7]. Згідно з методикою економічного аналізу в цих моделях враховуються тільки попередні експлуатаційні витрати [4]. Тому відома модель собівартості перевезень не є придатною для технологічного прогнозування транспортної енергоефективності автобусів. Зважаючи на це, можна зробити висновок, що наявні методи аналізу продуктивності автобуса і собівартості перевезень мають такі недоліки:

а) виходять із моделі транспозиційної операції, в яку закладена схема віртуального транспортування пасажирів;

б) не враховують параметрів енергетики автобуса й автотранспортних технологій, тому є техно-емпіричними;

в) непридатні для технологічного прогнозу й аналізу транспортної енергоефективності нових автобусів.

**Постановка завдання.** Метою роботи є встановлення закономірностей впливу показників транспортної енергоефективності від довжини перегону, зміни потужності двигуна, зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості для автобуса, що здійснює міські пасажирські перевезення. Для її досягнення необхідно виконати такі завдання:

1) проаналізувати вплив довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та транспортну енергоефективність автобуса;

2) здійснити аналіз впливу зміни потужності двигуна автобуса залежно від довжини перегону;

3) провести аналіз зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Згідно з наявним організаційним (нетехнологічним) підходом [6] в організації автобусних перевезень використовується схема транспозиційної операції з урахуванням лише Пп, Пв (подій прибуття та відправлення автобусів) та Ті, Ті+1 (зупинки) (рис. 1).

Пропонується використовувати схему транспортно-технологічної операції [11; 12] (рис. 2). Схема передбачає, що до транспортної операції залучається складний носій технологічних ресурсів із комплексом властивостей (автомобіль як складна транспортна машина, автомобіль як перевізний засіб, автомобіль як складний об'єкт керування рухом тощо). При цьому враховується адаптивно-дискретний рух автобуса [13].

Позначення на рисунку:  $R_{tx}$  – технологічні ресурси автотранспорту (сукупність технічних  $R_t$ , енергетичних  $R_e$ , трудових ресурсів  $R_{tr}$ );  $M_p$  – кількість пасажирів, яких перевозять; Пп, Пв – події прибуття та відправлення автобуса із зупинки; Ті, Ті+1 – транспортні термінали (зупинки); КТТ2 – другий компонент транспортних технологій (матеріальний і виробничо-процедурний); ERW – процес енергетичного перетворення ресурсів у фізичний продукт транспорту;  $W_f$  – фізичний продукт транспорту,  $-\Delta E$  – витрати енергії в транспортно-технологічній операції.

Використовуючи математичні моделі транспортної енергоефективності автомобіля узагальненого вигляду й узагальнену модель

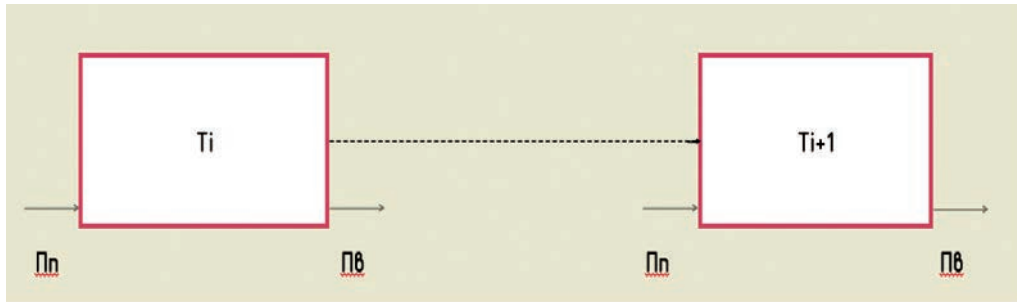


Рис. 1. Схема транспозиційної операції між i-ми автобусними ЗП

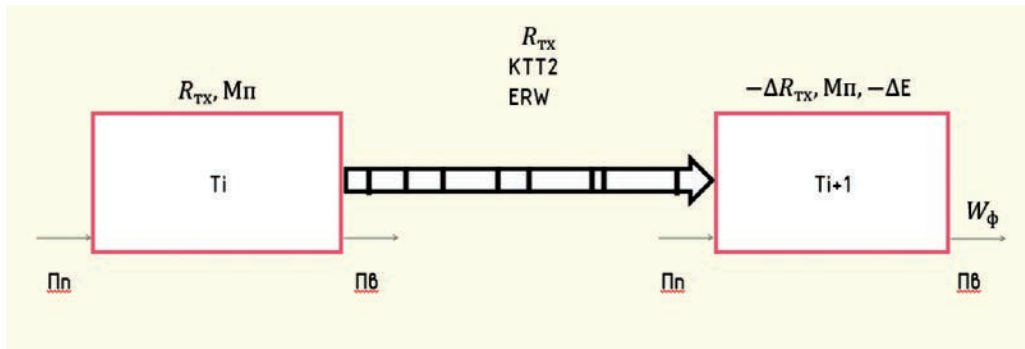


Рис. 2. Схема транспортно-технологічної операції

транспортної операції, [1; 8; 11], розглянуто схему адаптивно-дискретного руху автобуса між зупинками «мінімальна постійна швидкість – розгін – адаптивна постійна швидкість – службове гальмування» у міській тестовій операції з несталими режимами функціонування (з урахуванням зміни довжини перегону в діапазоні 200–2 600 м із кроком 400). Представлена основна формула ресурсовіддачі (1.1), що враховує весь процес адаптивно-дискретного руху. Загальні вирішення моделей транспортної енергоефективності автомобіля узагальненого типу отримано в роботі [1]. У цій статті були використані ці рішення й адаптовані для завдань формування математичних моделей автобусної тестової операції.

$$\rho_e = \frac{q \times \gamma_{cm} \times \sum_1^{n\phi} L_i}{\sum_1^{n\phi} Ei(V_i, +\Delta V_i, -\Delta V_i, K_{jr})} \quad (1.1)$$

де  $q$  – вантажність автобуса, т;  $\gamma_{cm}$  – коефіцієнт статичного використання пасажиромісткості автобуса;  $\bullet L_i$  – сумарна довжина перегонів циклу, м ( $n\phi$  – число фаз циклу);  $\sum_1^{n\phi} Ei(V_i, +\Delta V_i, -\Delta V_i, K_{jr})$  – сумарні енергетичні витрати ( $V_i$  – швидкість на  $i$ -й ділянці, км/год;  $+\Delta V_i, -\Delta V_i$  – приріст та зменшення швидкості на  $i$ -й ділянці, км/год;  $K_{jr}$  – коригувальний коефіцієнт:  $j$  – індекс класу автобуса,  $r$  – різновид конструкції кожного класу).

Проведено аналіз впливу довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та транспортну енергоефективність на прикладі автобуса Богдан А70132. Проаналізовано вплив зміни максимальної потужності двигуна автобуса, зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону (200 м, 700 м, 2 600 м) в умовах циклічного руху між зупинками. Згідно з теорією транспортної енергоефективності [1; 14] враховують такі показники функціонування автобуса, як сумарні рухові енергетичні витрати автобуса у разі його циклічного руху ( $A_c$ ), загальна витрата палива ( $Q_c$ ), тривалість руху між зупинками ( $T_c$ ), показник транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів ( $TB$ ), енергетичний коефіцієнт пробігу ( $UI_c$ ), паливний коефіцієнт пробігу ( $UIQ_c$ ), коефіцієнт швидкості ( $K_{vc}$ ), транспортна енергоефективність ( $Per$ ), паливна ефективність ( $Peq$ ), рух у несталих режимах ( $K_{tn}$ ).

На рис. 3 представлена залежність сумарних енергетичних витрат автобуса ( $A_c$ ) від довжини перегону ( $l_c$ ). Вона має лінійний зростальний характер. Так, під час зміни довжини перегону від 200 м до 2 600 м величина збільшується на 330%. Такий же вид мають графічні залежності таких показників, як загальна витрата палива ( $Q_c$ ) та тривалість руху між зупинками ( $T_c$ ).

Показник результативності технологічного впливу автотранспортного засобу під час розгону (ТВ) (1.2) [1; 8] від довжини перегону має гіперболічну залежність із максимальним значенням 4,698 під час довжини перегону 200 м, але зі зростанням довжини перегону різко спадає (600 м – 1,796; 2600 м – 0,418), що представлено на рисунку 4.

Величина показника транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів:

$$T_{ei} = \frac{q * \gamma_{cm} * V_{ci}}{g * P_{ci} * (t_i + t_{nep})} \quad (1.2)$$

$q\gamma_{cm}$  – маса пасажирів в автобусі, кг ( $\gamma_{cm} = 1$ )

$V_{ci}$  – середня швидкість за передачами, м/с

$P_{ci}$  – середня сила тяги за передачами, кгс

$t_i$  – час розгону за передачами, с

$t_{nep}$  – час переключання передач, с ( $t_{nep} = 2c$ )

Енергетичний та паливний коефіцієнти пробігу зменшуються зі збільшенням довжини перегону. Графік представлено на рисунку 5.

Як видно з рисунків 4, 5, показники, що досліджуються, різко знижуються за довжини перегону 600 м. Зворотна ситуація спостерігається під час аналізу коефіцієнта швидкості, енергоефективності та паливної енергоефективності (рис. 6), значення цих показників різко збільшуються.

Аналіз зміни потужності двигуна (Nm) у діапазоні 80%, 100%, 130% заданої потужності показав, що зі зміною довжини перегону ( $l_c$ ) в діапазоні 200–2 600 (200 – мінімальна, 700 – середня, 2 600 – максимальна) сумарні енергетичні витрати ( $A_c$ ) та загальна витрати палива ( $Q_c$ ) для  $l_c = 200$  і  $l_c = 700$  зростають лінійно, при цьому за  $l_c = 2600$  зростання відбувається стрімко і  $A_c$  збільшується на 25,22%,  $Q_c$  – на 41% (рис. 7, рис. 8). При цьому зростання сумарних енергетичних витрат ( $A_c$ ) та загальної витрати палива ( $Q_c$ ) також спостерігається під час збільшення довжини перегону від 700 до максимальних 2 600 м за умов потужності двигуна 264 к.с., а саме:  $Q_c$  зростає на 281% порівняно з  $Q_c$  за  $l_c = 700$ ,  $A_c$  зростає на 223% порівняно з  $A_c$  за  $l_c = 700$ .

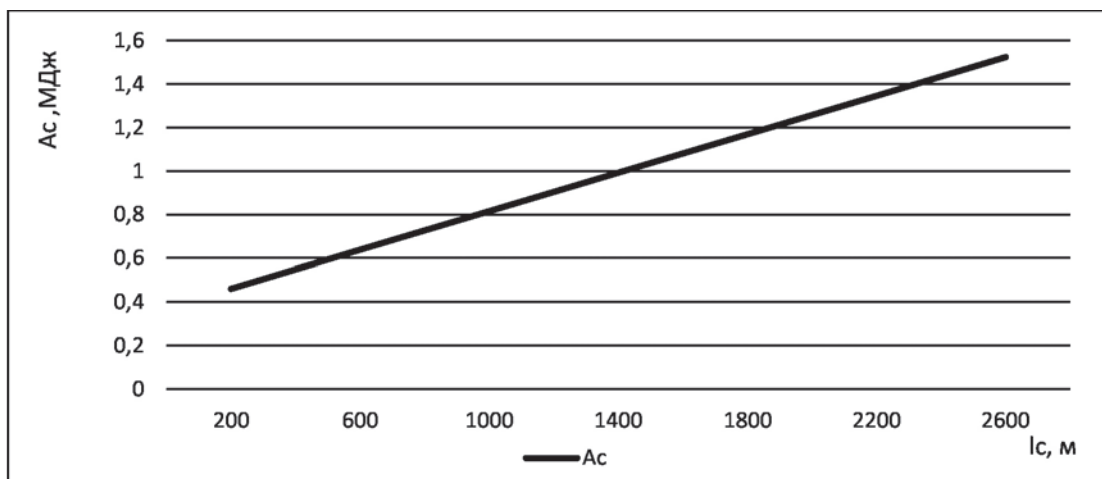


Рис. 3. Залежність сумарних енергетичних ( $A_c$ ) витрат від довжини перегону ( $l_c$ )

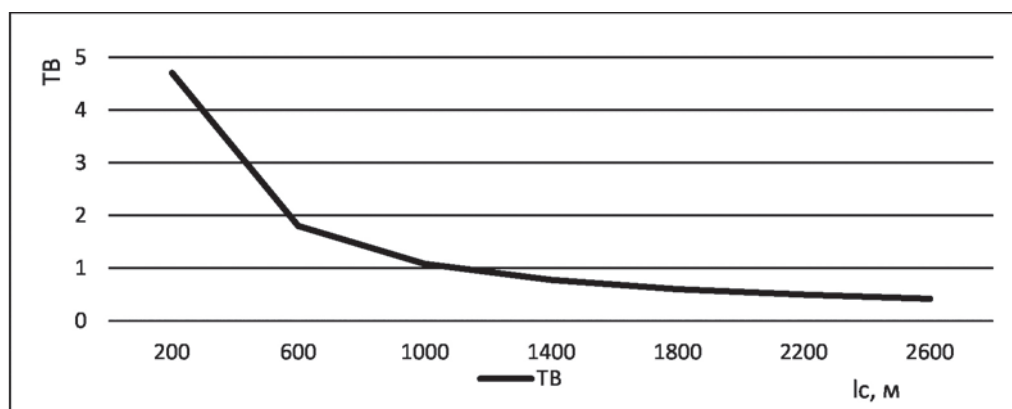


Рис. 4. Залежність показника результативності технологічних впливів (ТВ) під час розгону від довжини перегону ( $l_c$ )

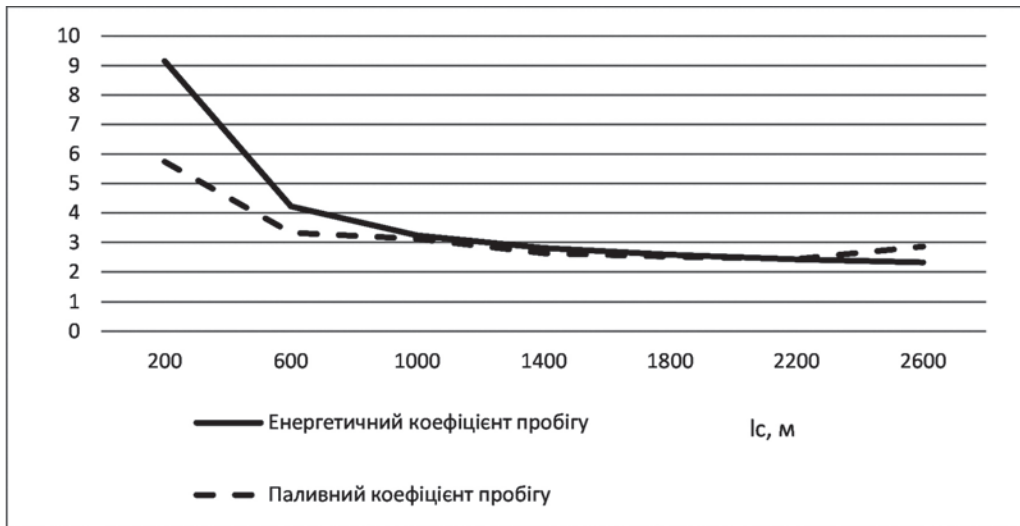


Рис. 5. Залежність енергетичного (UІс) та паливного коефіцієнтів пробігу (UІQс) автобуса від довжини перегону (lс)

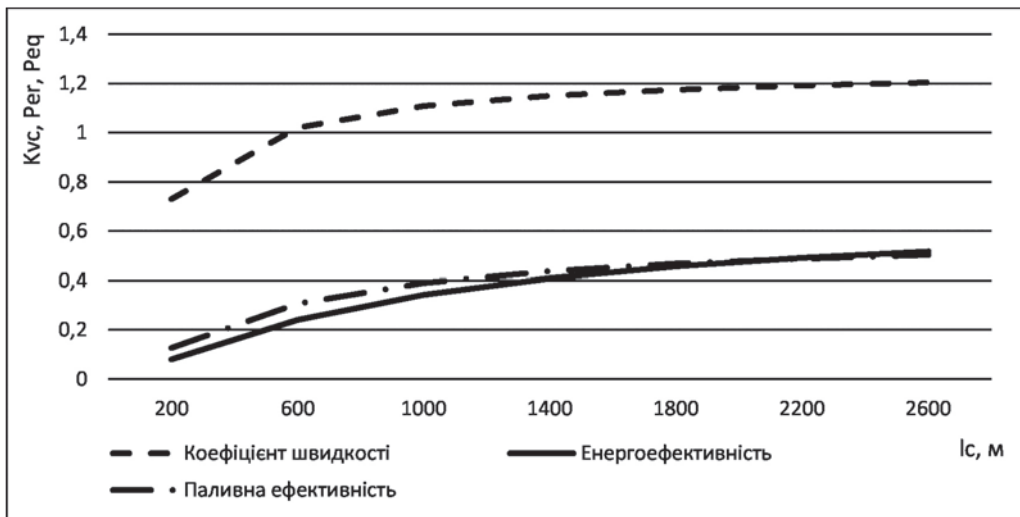


Рис. 6. Залежність коефіцієнта швидкості (Kvc), транспортної енергоефективності (Per) та паливної ефективності (Req) від довжини перегону (lс)

Аналіз зміни показника статичного використання пасажиромісткості ( $\gamma_{cm}$ ) у діапазоні 0,2–1 під час довжини перегону 700 м показує, що сумарні рухові енергетичні витрати автобуса за умов його циклічного руху ( $A_c$ ), загальна витрата палива ( $Q_c$ ), тривалість руху між зупинками ( $T_c$ ), показник транспортної результативності машинних процедур автобуса під час його розгону як технологічного засобу транспортування пасажирів ( $T_B$ ), транспортна енергетична ефективність (Per), паливна енергоефективність (Req), рух у несталих режимах ( $K_{tn}$ ) мають лінійну залежність та зростають зі збільшенням  $\gamma_{cm}$  (рис. 9). При цьому енергетична ефективність зростає на 12,5%, паливна – на 17,12%.

Для енергетичного коефіцієнта пробігу (UІс), паливного коефіцієнта пробігу (UІQс) і коефіцієнта

швидкості (Kvc) спостерігається зворотна залежність: зі збільшенням коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості UІс зменшується на 10,9%, UІQс – на 17,3%, Kvc – на 0,15% (рис. 10).

**Висновки.** Установлено актуальність комплексного підвищення транспортної енергоефективності міських автобусних перевезень з урахуванням концепції експлуатаційно-технологічного енергозбереження та запропоновано комплекс показників для математичного моделювання й аналізу техніко-експлуатаційних властивостей і енергоефективності автобуса.

Проаналізовано на прикладі автобуса Богдан А70132 вплив довжини перегону на техніко-експлуатаційні характеристики та енергоефективність автобуса. Установлено, що за умов довжини

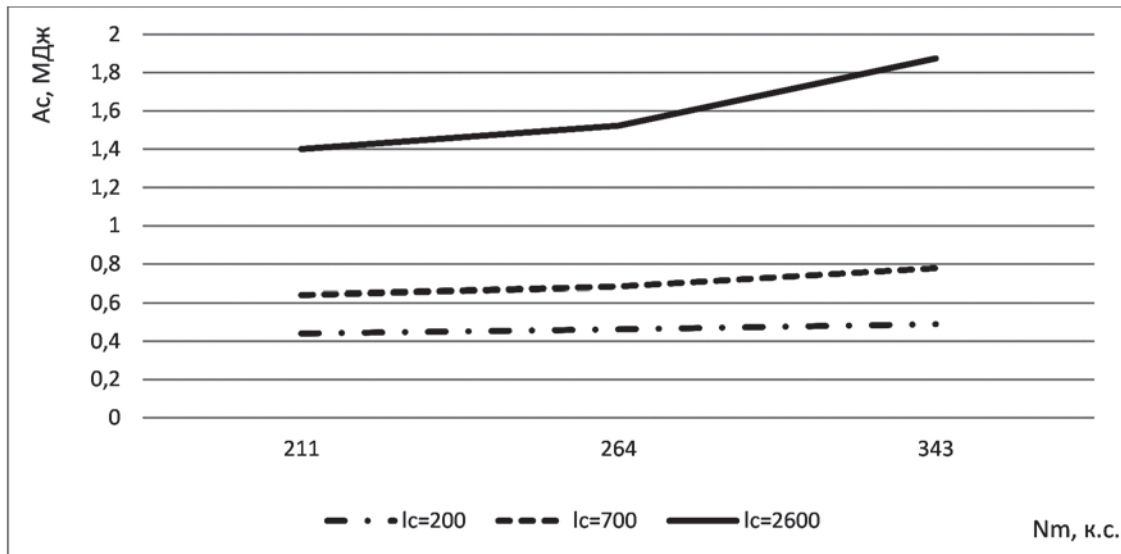


Рис. 7. Залежність сумарних енергетичних витрат ( $A_c$ ) від потужності двигуна ( $N_m$ ) під час зміни довжини перегону ( $l_c$ )

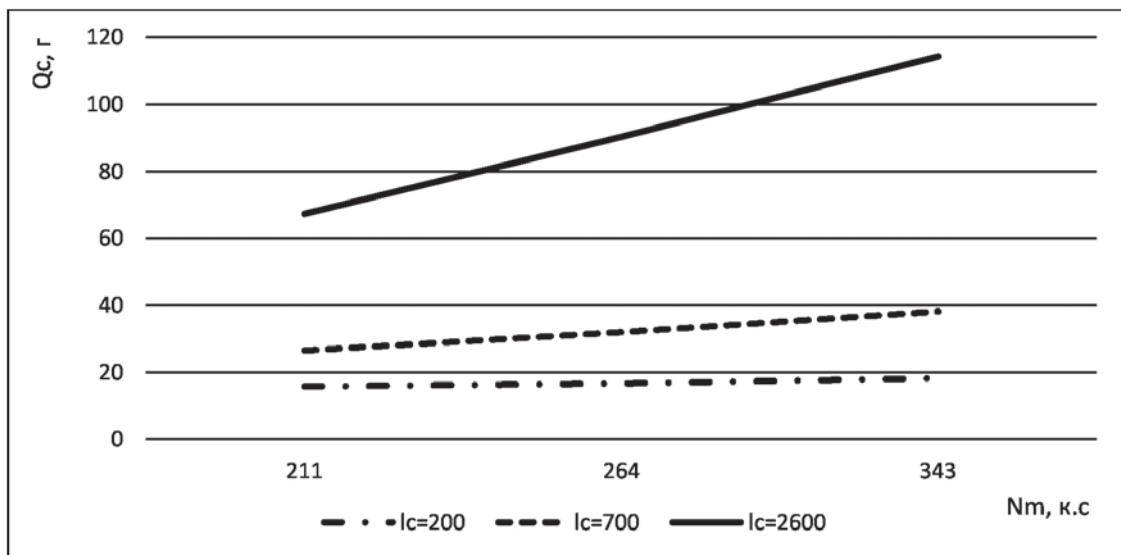


Рис. 8. Залежність загальної витрати палива ( $Q_c$ ) від потужності двигуна ( $N_m$ ) під час зміни довжини перегону ( $l_c$ )

перегону 600 метрів відбувається різка зміна характеру залежності для низки показників.

Аналіз впливу зміни потужності двигуна автобуса залежно від довжини перегону показав, що зі збільшенням довжини перегону відбувається зростання сумарних енергетичних витрат та загальної витрати палива на 281% та 223% відповідно.

Проведено аналіз зміни коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості залежно від довжини перегону. Установлено, що показники поділяються на ті, що зростають зі збільшенням коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості (сумарні енергетичні витрати, сумарні витрати

палива, тривалість часу руху між зупинками, показник результативності технологічних впливів під час розгону, енергетична ефективність, паливна енергоефективність, рух у несталих режимах), і ті, що спадають (енергетичний коефіцієнт пробігу, паливний коефіцієнт пробігу, коефіцієнт швидкості).

Установлено графічні залежності комплексу показників транспортної енергоефективності від важливих техніко-експлуатаційних факторів

Подальші дослідження планується проводити для пошуку закономірностей впливу техніко-експлуатаційних характеристик та транспортної енергоефективності для автобусів іноземного виробництва та електробусів.



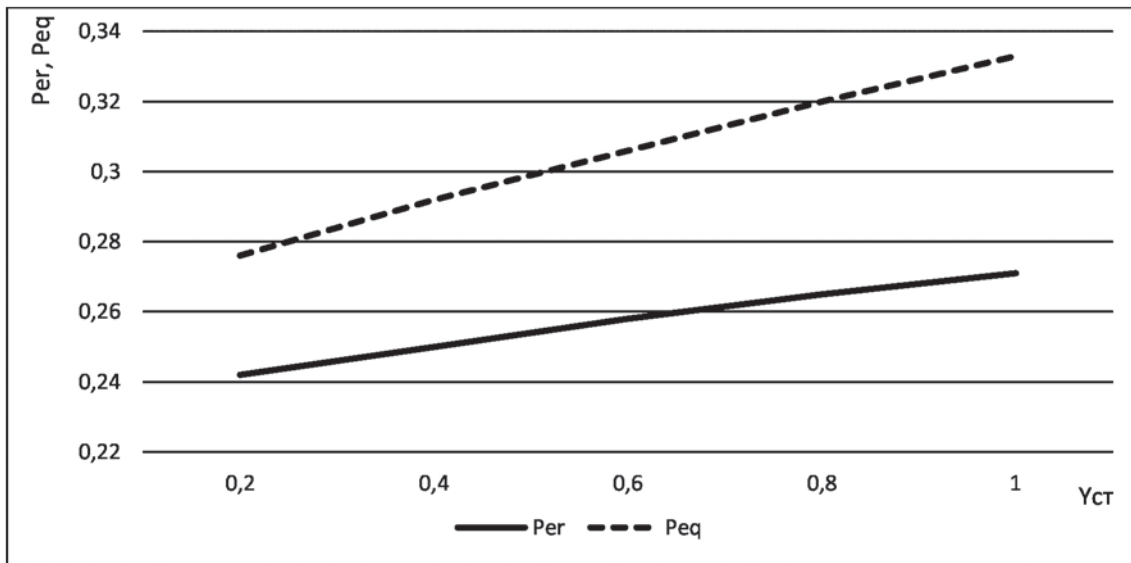


Рис. 9. Залежність транспортної енергетичної ефективності (Per) та паливної енергоефективності (Req) від показника статичного використання пасажиромісткості  $\gamma_{ст}$ .

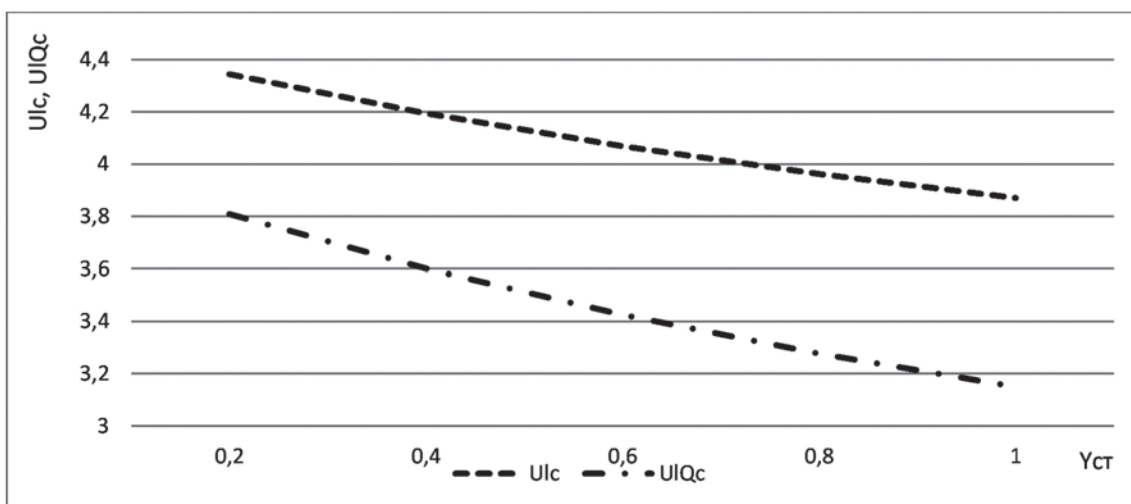


Рис. 10. Залежність енергетичного коефіцієнта пробігу (Ulc) і паливного коефіцієнта пробігу (UIQc) від коефіцієнта статичного використання пасажиромісткості  $\gamma_{ст}$ .

#### Список літератури:

1. Хабутдінов Р.А. Системне формування технологій автомобільних перевезень за критеріями енерго- і ресурсовіддачі : дис. ... докт. техн. Наук : 05.22.01. Київ, 2003. 332 с.
2. Тхорук Є.І., Кучер О.О. Визначення оптимального терміну використання автомобільного транспортного засобу як параметра системи оновлення парку рухомого складу. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк, 2016. Вип. 55. С. 412–417.
3. Вакуленко К.Є., Доля К.В. Управління міським пасажирським транспортом : навч. посібник; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. 257 с. ISBN 978-966-695-382-0 URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/33759816.pdf>
4. Экономика транспорта : учебник и практикум для академического бакалавриата / Е. В. Будрина и др.; под редакцией Е. В. Будриной. Москва : Издательство Юрайт, 2018. 366 с.
5. Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник / Маруніч В.С., Шморгуна Л.Г. та ін.; за ред. доц. В.С. Маруніч, проф. Л.Г. Шморгуна. Київ : Міленіум, 2017. 528 с. ISBN 978-966-8063-80-1
6. Ігнатенко О.С., Маруніч В.С. Пасажирські перевезення. Київ : НТУ, 2017. 265 с.

7. Верелопуло Г.А. Организация движения и перевозок на городском пассажирском транспорте. Москва : Транспорт, 2009. 267 с.
8. Хабутдінов Р.А., Коцюк О.Я. Енергоресурсна ефективність автомобіля, Київ : УТУ. 1997. 197 с.
9. Піцик М.Г. Підвищення транспортної енергоефективності міських пасажирських автобусних перевезень : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Київ, 2020. 20 с.
10. Піцик М.Г., Хабутдінов Р.А. Аналіз експлуатаційно-технологічних характеристик міських автобусів. *Вісник Національного транспортного університету*. 2008. № 17. С. 160–163.
11. Хабутдінов Р.А. Системна концепція енергоресурсної синергії та методологія технологічно-інноваційного управління на автотранспорті / Р.А. Хабутдінов. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки». Науково-технічний збірник*. Київ : НТУ, 2020. Вип. 1 (46). DOI: 10.33744/2308-6645-2020-1-46-365-374.

**Khabutdinov R.A., Fedorenko I.O. ANALYSIS OF THE IMPACT OF TRANSPORT ENERGY EFFICIENCY INDICATORS OF THE BUS FOR URBAN PASSENGER TRANSPORTATION**

*The priority area for the development of urban passenger transportation is the renewal of the rolling stock. High capital intensity of investment projects, variety of constructive and technical peculiarities of modern buses, high levels of energy and resource intensity of urban passenger transportation, the values of which greatly depend on the number of passengers in the bus, make technical and technological approach and new methods of urban buses justification, which correspond to the concept of operational and technological energy saving on the motor transport. Scientific novelty consists in application of transport-technological operation model of bus transportation to replace the existing one by the scheme of virtual bus traffic with technical speed. Practical significance for transport enterprises lies in the implementation of the concept of operational and technological energy saving in bus transportation taking into account the design factors, road conditions etc. The main objective of the article is to establish the regularities in changes of transport energy efficiency indicators of buses on the city routes, influenced by different factors (length of the route between bus stops, maximum bus engine power, coefficient of static use of its passenger capacity). The urgency of the comprehensive improvement of transport energy efficiency of urban bus transportation, taking into account the concept of operational and technological energy conservation. The dependence of the complex of indicators of the transport energy efficiency of buses on the length of the route, the coefficient of the static use of the passenger capacity, the maximum power of the engine have been determined. The paper proposes a new approach and method for modeling the transport and technological operation of bus transportation, with the help of which mathematical and graphical dependences are obtained, which allow to make more justified decisions when upgrading the buses according to the concept of operational and technological energy saving. The analysis of technical-operational properties and transport energy efficiency of the bus for urban passenger transportation on the example of the Bogdan A70132 bus is performed.*

**Key words:** bus, motor transport process, transport technological operation, transport energy efficiency, fuel energy efficiency, urban passenger transportation.

# БУДІВНИЦТВО

УДК 624.137.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/40>**Лучковський І.Я.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

**Єсакова С.В.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

**Чепурний Д.О.**

Харківський національний університет будівництва та архітектури

## РОЗВИТОК ТИСКУ НА ПІДПІРНІ СТІНИ, ЩО УТРИМУЮТЬ УКОС ІЗ ДВОШАРОВОЮ ЗАСИПКОЮ ТА НАВАНТАЖЕННЯМ НА ПОВЕРХНІ

Під час проектування підірних стін відсутні методи обліку багатошарової основи за наявності навантажень на поверхні засипки. Існуючі методи не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки за врахування власної ваги ґрунту приймається свій не вигідний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від різного виду корисних навантажень поки не знайдено. Тому для багатошарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпозиції, за якого підсумовується тиск від ваги ґрунту і навантажень на поверхні, залишається технічно не здійсненним. Таким чином, розроблення методу, що дає змогу визначати бічний тиск багатошарової засипки за наявності навантаження на поверхні, є актуальним завданням для будівництва.

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень розподілу площин зсуву по глибині багатошарової ґрунтової засипки підірних стін нами встановлено, що з ростом глибини нахил площин зсуву змінюється, однак кожній глибині відповідає єдина площина, що проходить від поверхні ґрунту до розглянутої точки внутрішньої поверхні стінки незалежно від кількості шарів засипки. При цьому цей ефект не залежить від послідовності шарів із різними фізико-механічними характеристиками по глибині засипки.

Ухвалення єдиної площини ковзання для кожної глибини підірної стінки дає змогу сформулювати нові принципи визначення горизонтального тиску на підірну стінку з урахуванням навантажень на поверхні засипки та вирішити завдання визначення тиску у багатошаровій основі з навантажень на поверхні засипки, у тому числі для засипок, що мають укіс.

Також у роботі наведено конкретний розрахунок визначення горизонтального тиску ґрунту, що одержуваний за запропонованою методикою, та порівняння цих результатів із результатами вирішення завдання за допомогою програмної системи скінчено-елементного аналізу Plaxis.

**Ключові слова:** площини зсуву, призма обвалення, підірні стіни, горизонтальний тиск, смугове навантаження, багатошарова основа.

**Постановка проблеми.** Під час проектування підірних стін відсутні методи обліку багатошарової основи за наявності навантажень на поверхні засипки. Існуючі методи не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки за врахування власної ваги ґрунту приймається свій не вигідний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від різного виду корисних навантажень поки не знайдено. Тому для багатошарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпозиції,

за якого підсумовується тиск від ваги ґрунту і навантажень на поверхні, залишається технічно не здійсненним. Таким чином, розроблення методу, що дає змогу визначати бічний тиск багатошарової засипки за наявності навантаження на поверхні, є актуальним завданням для будівництва.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Г.К. Клейн [1] дав наближену розрахункову схему для зосередженої сили, і ним же надано два варіанти визначення тиску від смугових навантажень обмеженої ширини.

Теоретичні дослідження дії місцевого навантаження на поверхні, виконані В.В. Синельниковим [2, с. 245–253], виявили наявність двох видів площин ковзання за одночасної дії тимчасового навантаження і ваги ґрунту. Тимчасове навантаження  $q$  різної інтенсивності сприяє підняттю початкової точки передачі горизонтального тиску на огорожу. За високої інтенсивності  $q$  кут нахилу до горизонту площини ковзання, що проходить через найближчу до стінки межу площадки навантаження, становить не  $\theta_0$ , а  $\varphi$ , тобто горизонтальний тиск передається значно вище, ніж за нормативною методикою. В.В. Синельников, проводячи чисельні дослідження конкретних прикладів, виявив на деякій глибині стінки з віддаленим на відстані  $a$  смуговим навантаженням наявність стрибка напруги  $\sigma$ , викликаним дією навантаження  $q$ .

А.Н. Богомолівим за співавторами [3] розроблено два нових підходи до визначення сил активного тиску ґрунту на елементи огорожувальних конструкцій будівельного котловану. Перший підхід полягає у тому, що як зігнута вісь вертикальної балки розглядається крива, що є обвідною епюри гіпотетичних горизонтальних переміщень, які можуть отримати точки, що лежать на вертикальній поверхні укусу, за умови, що під дією власної ваги і тимчасового навантаження укiс деформується не руйнуючись. Другий підхід заснований на методі розрахунку сил зсувного тиску. Проведено зіставлення отриманих результатів і відзначено можливість отримання істотного економічного ефекту, однак відзначено необхідність проведення експериментальних досліджень для обґрунтування можливості практичного використання зроблених пропозицій.

В.К. Квітковим [4] запропоновано методику розрахунку системи «ґрунт – підпірна стінка» за допомогою вирішення відповідних контак-

тних задач плоскої теорії пружності. Методика дає змогу врахувати вплив розмірів поперечного перерізу стінки, міцності матеріалу, з якого вона виготовлена, а також врахувати вплив на стійкість системи поверхневих навантажень.

І.Я. Лучковським і співавтором [5] розглянуто характер зміни активного тиску ґрунту за наявності на засипці підпірних стін смугових навантажень малої ширини, виявлено закономірності розподілу поверхонь ковзання за наявності навантаження на поверхні засипки.

Як видно з наведеного аналізу, сьогодні інженерні методи теорії граничної рівноваги у ґрунтовій засипці з урахуванням багат шаровості основи і навантаження на поверхні не розроблено, відсутні експериментальні дані про характер розподілу площин ковзання за багат шарової засипки; практично відсутні експериментальні дослідження розподілу горизонтального тиску на підпірні стіни, які утримують багат шарову основу; не встановлено закономірності впливу місцевих навантажень на розподіл горизонтального тиску на підпірні стіни в ідеально пружному середовищі (стані спокою).

**Постановка завдання.** Визначення тиску на підпірну стіну, що утримує схил та характерні положення площин ковзання, що проходять через двох шаровий масив ґрунту зі смуговим навантаженням на поверхні.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Під час проведення лабораторних експериментальних досліджень розподілу площин зсуву по глибині багат шарової ґрунтової засипки підпірних стін нами встановлено, що з ростом глибини нахил площин зсуву змінюється, однак кожній глибині відповідає єдина площина, що проходить від поверхні ґрунту до розглянутої точки внутрішньої поверхні стінки, незалежно від кількості шарів засипки (рис. 1). При цьому цей ефект не залежить від послідовності шарів із різними фізико-механічними характеристиками по глибині засипки.

Ухвалення єдиної площини ковзання для кожної глибини підпірної стінки дає змогу сформулювати нові принципи визначення горизонтального тиску на підпірну стінку з урахуванням навантажень на поверхні засипки:

- масив засипки між стінкою і площиною ковзання ділиться на окремі призми, що спираються в межах кожного шару  $h_i$  на площину обвалення;

- призми поділяються вертикальними площинами, що проходять із точок перетину

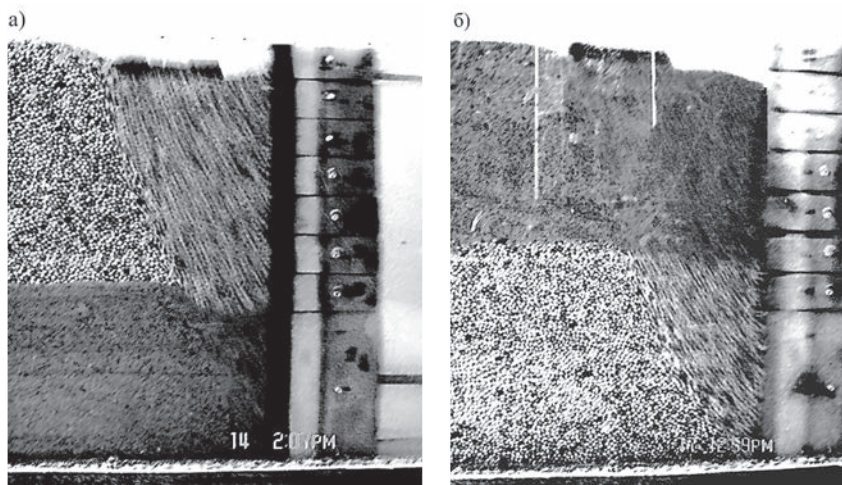
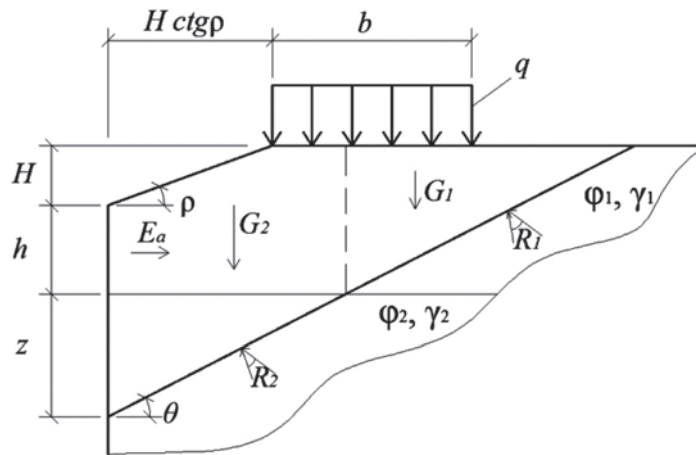
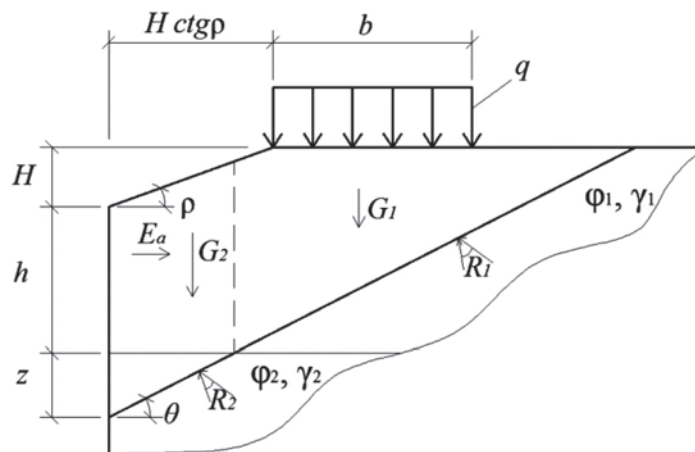


Рис. 1. Фотографія виникнення площини обвалення у двошаровій засипці зі смуговим навантаженням за горизонтального зсуву підпірної стінки: а – просо – пісок, б – пісок – просо



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\gamma_1(H+h)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + (H \operatorname{ctg} \rho + b - z \operatorname{ctg} \theta)q; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[ (H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + (z \operatorname{ctg} \theta - H \operatorname{ctg} \rho)q. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

Рис. 2. Випадок 1. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 \left[ \frac{(h+H)^2}{2} \operatorname{ctg} \theta - \frac{H \operatorname{ctg} \rho - z \operatorname{ctg} \theta}{2} (H - z \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} \rho) \right] + qb; \\ G_2 &= z \operatorname{ctg} \theta \left[ \gamma_2 \frac{z}{2} + \gamma_1 \left( h + \frac{z \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} \rho}{2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Рис. 3. Випадок 2. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

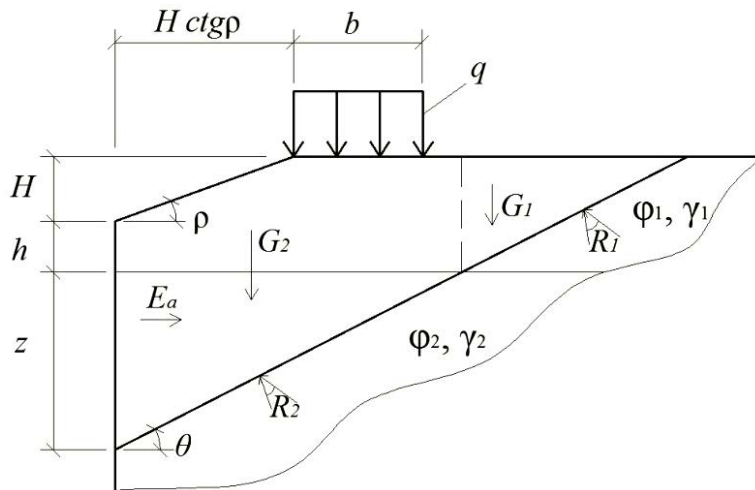
площини ковзання (обвалення) з межами шарів ґрунту до поверхні засипки (на ділянках, що не мають навантаження на поверхні) або до підшви місцевого навантаження;

– частина розподіленого навантаження, що знаходиться на будь-якій призмі, підсумовується з вагою цієї призми, тобто входить у величину  $G_i$ ;

– взаємодія призм по вертикальних площинах не враховується;

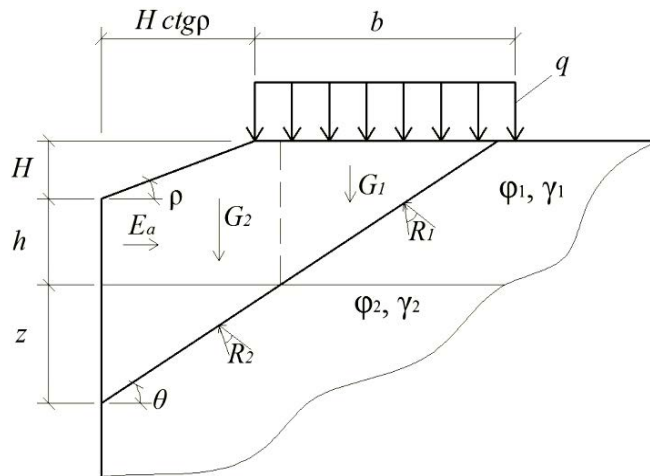
– кожній глибині відповідає своя площина ковзання, положення якої не залежить від загальної глибини стінки.

На рис. 2–7 представлено шість характерних положень площин ковзання, що проходять через двошаровий масив ґрунту. На цих розрахункових схемах дано також формули для визначення  $G_1$  та складників ваги повної призми зсуву на глибині  $z_i$  другого шару, що відповідають прийнятому куту  $\theta_i$  на кожному етапі ітерації.



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 \frac{(h+H)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2}; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[ (H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + qb. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Рис. 4. Випадок 3. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\gamma_1 (H+h)^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + (H+h)q \operatorname{ctg} \theta; \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \operatorname{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left[ (H+h)z \operatorname{ctg} \theta - \frac{H^2 \operatorname{ctg} \rho}{2} \right] + (z \operatorname{ctg} \theta - H \operatorname{ctg} \rho)q. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Рис. 5. Випадок 4. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

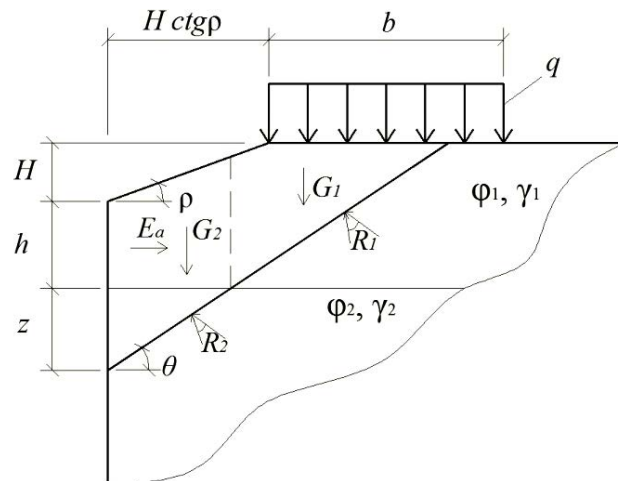
При цьому значення рівнодіючої горизонтального тиску  $E$  і функцій  $F_1$  та  $F_2$  визначається за формулами:

$$E = G_1 F_1 + G_2 F_2$$

де  $F_i = \operatorname{ctg} \theta \operatorname{tg} (\theta - \varphi_i)$ .

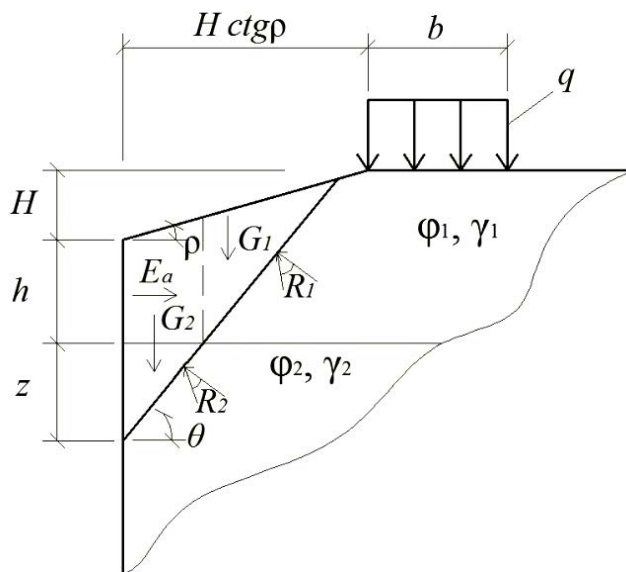
**Приклад.**

Як приклад було розглянуто двошарову основу з такими характеристиками:  $\gamma_1 = \gamma_2 = 2 \text{ тс/м}^3$ ,  $\varphi_1 = 30^\circ$ ,  $\varphi_2 = 20^\circ$ , висота укосу  $H = 1 \text{ м}$ ,  $h = 3 \text{ м}$ ,  $\rho = 20^\circ$ . Основу завантажено смуговим навантаженням  $q = 5 \text{ тс/м}^2$ ,  $b = 3 \text{ м}$ .



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \gamma_1 \left[ \frac{(h+H)^2}{2} \text{ctg} \theta - \frac{H \text{ctg} \rho - z \text{ctg} \theta}{2} (H - z \text{ctg} \theta \text{tg} \rho) \right] + q [(H+h+z) \text{ctg} \theta - H \text{ctg} \rho]; \\ G_2 &= z \text{ctg} \theta \left[ \gamma_2 \frac{z}{2} + \gamma_1 \left( h + \frac{z \text{ctg} \theta \text{tg} \rho}{2} \right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Рис. 6. Випадок 5. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом



$$\left. \begin{aligned} G_1 &= \frac{\gamma_1 \text{ctg}^2 \theta}{2} \left( \frac{(h+z)^2 \sin \theta \sin \rho}{\sin(\theta - \rho)} - z^2 \text{tg} \rho + \frac{h^2}{\text{ctg} \theta} \right); \\ G_2 &= \gamma_2 \frac{z^2 \text{ctg} \theta}{2} + \gamma_1 \left( h z \text{ctg} \theta + \frac{z^2 \text{ctg}^2 \theta \text{tg} \rho}{2} \right). \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Рис. 7. Випадок 6. Розташування площин ковзання у двошаровій засипці з укосом

На рис. 8а показано площини зсуву по глибині масиву, а на рис. 8б дано епюри горизонтальних напружень  $\sigma$ .

**Висновки.** У практиці проектування підпірних стін інженерні методи розрахунку багат шарової основи не розроблено. Існуючі методи

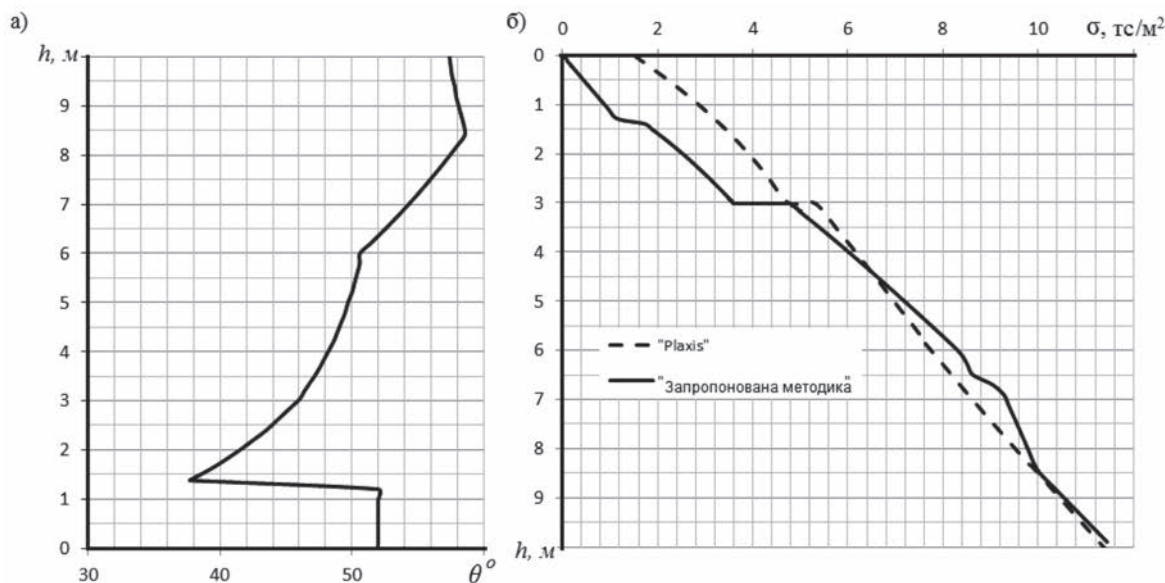


Рис. 8. Приклад розрахунку активного тиску за наявності смугового навантаження на поверхні засипки з укосом: а) площини зсуву; б) епюри горизонтальних напружень  $\sigma$

не можуть бути використані, оскільки в кожному шарі неоднорідної засипки під час розрахунку власної ваги ґрунту приймається свій невідгдний кут нахилу площин зсуву, а закономірності поширення в масиві тисків від місцевих (смугових) навантажень поки не знайдено. Тому для багатшарового ґрунту використання навіть найпростішого методу суперпозиції залишається технічно не здійсненним.

Прийняття підтвердженої лабораторними дослідженнями гіпотези про існування в багатшаровій засипці на будь-якій глибині підірних

стін єдиної площини ковзання дало змогу створити чисельний метод визначення горизонтального тиску ґрунту за наявності смугового навантаження  $q$ , у тому числі для підірних стін, що утримують укіс.

Зіставлення епюр горизонтального тиску ґрунту, одержуваних за запропонованою методикою і за програмою Plaxis (де використовується МСЕ), показує близькість одержуваних результатів, хоча у верхньому шарі Plaxis завищує результати, що одержані з використанням принципів теорії Ш. Кулона.

#### Список літератури:

1. Клейн Г.К. Строительная механика сыпучих тел. Москва : Стройиздат, 1977. 256 с.
2. Синельников В.В. Развитие метода Кулона при определении давления сыпучего тела. *Строительная механика*. 1946. Вып. 69. С. 241–265.
3. Два новых подхода к определению горизонтального давления ґрунта на ограждающие конструкции котлована / А.Н. Богомолов и др. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура»*. 2012. Вып. 29(48). С. 26–35.
4. Цветков В.К. Расчет системы «ґрунт – подпорная стенка» на основе анализа их напряженного состояния. *Вестник Волгоградского государственного архитектурно-строительного университета. Серия «Строительство и архитектура»*. 2008. Вып. 10(29). С. 41–46.
5. Лучковский И.Я., Данько А.М. Распределение давления ґрунта на подпорные стены при «узких» площадках нагружения поверхности полосовой нагрузкой. *Коммунальное хозяйство городов. Серия «Технические науки и архитектура»*. 2010. Вып. 93. С. 471–479.

#### Luchkovsky I.Ya., Chepurnyi D.O., Yesakova S.V. DEVELOPMENT OF PRESSURE ON RETAINING WALLS THAT KEEPS THE SLOPE WITH DOUBLE-LAYER FILLING AND SURFACE LOADS

*In the design of retaining walls no accounting methods multilayered bases in the presence of stress on the surface of the filling. Existing methods cannot be used, as each layer of inhomogeneous backfill, taking into account its own soil weight, takes its unfavorable angle of inclination of the landslide planes, and the patterns of propagation in the array of pressures from different types of payloads have not yet been found. Therefore, at*



present, for multilayer soil, using of even the simplest method of superposition, which summarizes the pressure from the weight of the soil and the loads on the surface, remains technically impossible. Thus, the development of a method that allows to determine the lateral pressure of the multilayer backfill in the presence of a load on the surface, is an urgent task for construction.

In laboratory experimental studies of the distribution of landslide planes along the depth of multilayer soil backfill, we found that with increasing depth, the slope of the landslide planes changes, but each depth corresponds to a single plane passing from the soil surface to the considered point of the inner surface of the wall, regardless of the number of backfill layers. This effect does not depend on the sequence of layers with different physical and mechanical characteristics along the backfill depth.

Adoption of a single sliding plane for each depth of the retaining wall allows to formulate new principles for determining the horizontal pressure on the retaining wall considering the loads on the backfill surface and solve the problem of determining the pressure in a multilayer base from loads on the backfill surface, including for backfills.

Also in the work the concrete calculation of definition of horizontal pressure of the soil received by the offered technique and comparison of these results with results of the decision of a problem by means of the software system of the finite element analysis "Plaxis".

**Key words:** shear planes, collapse prism, retaining wall, horizontal pressure, strip load, multilayer base.

**Скоробагатько Т.М.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Слуцька О.М.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Боровиков В.О.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Пруський А.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Стилик І.Г.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## РЕАЛІЗАЦІЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ СИСТЕМИ ОЦІНЮВАННЯ ЯКОСТІ ПІНОУТВОРЮВАЧІВ ДЛЯ ГАСІННЯ ПОЖЕЖ ОНОВЛЕННЯМ ВІДПОВІДНОЇ НОРМАТИВНОЇ БАЗИ

*У роботі проаналізовано наукові публікації та нормативні документи стосовно контролювання показників якості піноутворювачів для гасіння пожеж загального і спеціального призначення. Зауважено, що більшість наявних наукових публікацій присвячено вивченню впливу природи поверхнево-активних речовин та функціональних добавок на властивості композицій, що дають змогу генерувати повітряно-механічну піну із застосуванням відповідного обладнання, а також розробленню рецептур піноутворювачів для гасіння пожеж. Відмічено обмаль публікацій, що стосуються розроблення та оцінювання об'єктивності методів визначення показників якості піноутворювачів. Узагальнено накопичений в Україні досвід застосування методів випробувань піноутворювачів для гасіння пожеж, розкрито їх недоліки та переваги. Наголошено на необхідності удосконалення національної нормативної бази, що регламентує порядок поводження з піноутворювачами для гасіння пожеж на різних етапах їхнього життєвого циклу. Розкрито основні відмінності між редакціями національного стандарту ДСТУ 3789, відмічено доцільність під час проведення випробувань із визначення вогнегасної ефективності пін, утворених з робочих розчинів піноутворювачів як загального, так і спеціального призначення, застосовувати замість автомобільного бензину розчинник «Нефрас С-2-80/120». Обґрунтовано необхідність перегляду «Інструкції про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння», зокрема в частині нормування порядку оцінювання якості вогнегасних речовин, що зберігаються в пожежно-рятувальних підрозділах та резервуарах стаціонарних систем пожежогасіння, й розроблення на її заміну відповідного національного стандарту. Описано сутність передбачуваних змін з огляду на результати раніше проведених робіт, а також окреслено напрями додаткових досліджень, які необхідно здійснити.*

**Ключові слова:** вогнегасна ефективність, горюча рідина, контролювання, піна, піноутворювач, пожежа, показник якості.

**Постановка проблеми.** У теперішній час в Україні наявна велика кількість типів і марок піноутворювачів загального та спеціального призначення для гасіння пожеж. Оцінювання їх якості на всіх стадіях життєвого циклу, а також ефективності під час гасіння тих чи інших речовин і матеріалів потребує застосування адекватних методів випробувань, регламентованих відповідними нормативними документами. На сьогодні вимоги щодо піноутворювачів різноманітних типів регламентовано

рядом стандартів [1–5], проте нормативних документів, які б чітко визначали, зокрема, порядок випробування піноутворювачів, що зберігаються в пожежно-рятувальних підрозділах залежно від їх типу, окрім Інструкції [6], не існує. За час, що минув з моменту її затвердження, нормативно-технічна база і номенклатура піноутворювачів, наявних на вітчизняному ринку, значною мірою змінилися, чим і зумовлено необхідність розроблення нормативного документа на її заміну. Зважаючи на те,

що в Україні використовуються піноутворювачі, що відповідають вимогам як суто національного стандарту [1], так і вимогам прийнятих в Україні європейських норм [2–5], положеннями яких передбачене використання генераторів піни різних конструкцій, випробування піноутворювача кожної конкретної марки необхідно проводити з урахуванням вимог, встановлених стандартом (стандартами) і нормативними документами виробника саме до нього, що і має відображати оновлений нормативний документ.

Як свідчить досвід, накопичений в Україні [7], застосування неналежного методу випробування з високою вірогідністю може стати причиною хибних висновків. З іншого боку, цілком очевидно, що рівень протипожежного захисту об'єктів, для гасіння пожеж на яких можуть використовуватися піноутворювачі, значною мірою залежить від їх правильного вибору та якості. Вибірання піноутворювачів, у свою чергу, залежить від особливостей захищуваного об'єкта (наявність, хімічна природа і кількість тих чи інших горючих речовин і матеріалів, конструкційні особливості технологічного обладнання, а також стаціонарних систем пожежогасіння і наявної протипожежної техніки тощо). Основним критерієм правильного вибору типу піноутворювача можна вважати якомога вищу вогнегасну ефективність піни, генерованої з його робочого розчину, під час гасіння наявних на об'єкті речовин і матеріалів у спосіб, який може бути реалізований, з урахуванням особливостей захищуваного об'єкта [7]. З метою її перевірення в умовах зберігання піноутворювачів та їх водних розчинів (періодичного контролювання якості) необхідно розробити нові або підтвердити придатність відомих експрес-методик визначення вогнегасної ефективності піни, застосування яких має за мету забезпечення можливості контролювання якості вогнегасних речовин за прийнятого рівня витрат.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Опрацювання матеріалів, викладених у мережі «Internet» (зокрема, каталогів «Scopus»), реферативних журналах і дисертаційних роботах свідчить, що більшість наукових публікацій присвячено вивченню впливу природи поверхнево-активних речовин та функціональних добавок на властивості композицій, що дають змогу генерувати повітряно-механічну піну із застосуванням відповідного обладнання, а також розробленню рецептур піноутворювачів для гасіння пожеж. Водночас публікацій, присвячених розробленню та оцінюванню об'єктивності самих методів визначення показників якості піноутворювачів, обмаль.

Піноутворювачі для гасіння пожеж застосовуються для гасіння відносно невеликої кількості пожеж, за статистичними даними, не більше ніж 1,5% від їх загальної кількості [7; 8]. Разом із тим застосування піноутворювачів у багатьох випадках (наприклад, під час пожеж у резервуарах для зберігання горючих рідин) є практично єдиним можливим або найбільш ефективним способом гасіння пожеж. До середини 1990-х років минулого століття піноутворювачі вітчизняними підприємствами не вироблялися, підрозділи пожежної охорони і промислові підприємства споживали здебільшого біологічно «жорсткі» вогнегасні речовини, рецептури яких було розроблено ще за радянських часів. Початок їх виробництва, а також розроблення нормативної бази щодо випробування і застосування піноутворювачів в Україні стали можливими завдяки роботам численних дослідників, проте основну увагу в їх роботах приділяли розробленню рецептур піноутворювачів, у той час як питання, пов'язані з підвищенням об'єктивності результатів випробувань з оцінювання їх якості, було вивчено неповною мірою [7].

Система контролювання якості піноутворювачів в Україні до останнього часу не відповідала сучасним вимогам, наразі частина чинних нормативних документів також потребує коригування. Так, наприклад, перехід на нові технології виробництва автомобільного бензину, який традиційно використовують під час випробувань піноутворювачів, призвів до зміни його компонентного складу, що спричинило ряд проблем під час оцінювання вогнегасної ефективності піни як ключової характеристики піноутворювачів для гасіння пожеж. Саме тому відповідними фахівцями проводилися дослідження, спрямовані на удосконалення відповідної нормативної бази, результати яких, зокрема, описано в дисертаційній роботі [7]. Виявлено, що багато методів випробування, застосовуваних у теперішній час, було розроблено на основі методів, якими користувалися раніше та описи обґрунтування порядку проведення яких втрачено. Критерії успішності випробування можуть стосуватися контрольних випробувань піноутворювачів «високої якості», які були наявні на ринку раніше і які, можливо, було розроблено з розрахунку на використання іншої горючої рідини [9]. Удосконалення нормативних документів, які регламентують показники якості, методи їх визначення і порядок контролювання якості піноутворювачів, має полягати у більш чіткій регламентації відповідних показників якості й удосконаленні методів їх визначення, а також виявленні можливих

причин виникнення помилок під час випробувань. Показники якості піноутворювачів у роботі [7] поділено на чотири групи (рисунок 1).

Публікації у науково-технічних виданнях, проаналізовані в роботі [7], містять неоднозначну, іноді суперечливу інформацію про ефективність піноутворювачів різних типів. Натомість більшість авторів роблять висновки про те, що найбільш ефективними є фторсинтетичні (типу «AFFF») і фторпротеїнові (типу «FFFP») плівкоутворювальні піноутворювачі. Фторсинтетичні піноутворювачі найбільш ефективні на початкових стадіях розвитку пожежі, у той час як фторпротеїнові мають порівняно вищу ефективність у тих випадках, коли рідина або металеві конструкційні матеріали, розташовані в осередку пожежі, встигли сильно нагрітися. Найбільше на вогнегасну ефективність піни впливають компонентний склад пального (насамперед велика кількість летких вуглеводнів і наявність полярних добавок, у тому числі добавок-антидетонаторів). Є також інформація про те, що послідовне подавання піни, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів цих типів, дає змогу забезпечити більш швидке і надійне гасіння. Загальновизнаним є також той факт, що в разі наявності у складі пального значної кількості полярних рідин (у тому числі добавок-антидетонаторів) більш ефективні піноутворювачі, до складу яких входять водорозчинні полімери [7].

Разом із тим описів експрес-методик визначення вогнегасної ефективності піни низької

кратності в доступній літературі обмаль. Деякі літературні дані вказують на доцільність розроблення таких методик. Так, у монографії [10] зазначено, що для оцінювання вогнегасної ефективності піни низької кратності достатньо проводити випробування з визначення тривалості гасіння порівняно невеликих за площею (близько 0,25 м<sup>2</sup>) вогнищ пожежі. Вказується, що між результатами гасіння модельних вогнищ пожежі 8В (0,25 м<sup>2</sup>) і 144В (4,52 м<sup>2</sup>) спостерігається чітка кореляція. Аналогічний висновок зроблено авторами [11], які запропонували оцінювати вогнегасну ефективність піни за результатами визначення тривалості гасіння модельного (макетного) вогнища пожежі, яке має форму прямокутного паралелепіпеда. Таку форму вогнища пожежі обрано з метою забезпечення найбільш жорстких умов гасіння [7].

У публікаціях [12–22] наведено результати досліджень з виявлення впливу показників якості фторсинтетичних плівкоутворювальних піноутворювачів на вогнегасну ефективність піни низької кратності, генерованої з їх робочих розчинів (на жаль, методику її визначення не описано). Автори зазначених робіт вивчали взаємозв'язок між плівкоутворювальними властивостями водних розчинів піноутворювачів (тобто величинами поверхневого, міжфазового натягу і коефіцієнта розтікання), швидкістю розтікання водної плівки поверхнею вуглеводнів (для досліджень використовували н-гептан), кратністю піни та її вогнегас-



Рис. 1. Показники якості піноутворювачів для гасіння пожеж [7]

ною ефективністю. Разом із тим одержані результати стосуються тільки одного піноутворювача і окремих рецептур, які складаються із сумішей тільки однієї фторвмісної і тільки однієї вуглеводневої поверхнево-активної речовини (ПАР), взятих у різних співвідношеннях, та води. Вони навряд чи можуть бути справедливими для водних розчинів будь-яких фторвмісних ПАР або їх композицій з вуглеводневими ПАР. До того ж їх одержано здебільшого під час вивчення поведінки водних плівок на поверхні горючої рідини, яка мала кімнатну температуру. У той же час хімічний склад водного розчину, який утворюється під час руйнування піни на поверхні палаючої рідини, може суттєво відрізнятись від хімічного складу робочого розчину піноутворювача. На плівкоутворювальну здатність суттєво впливає температура пального і водного розчину, за певних температур можлива повна втрата плівкоутворювальної здатності, причому ця температура залежить від природи рідини [7].

У роботі [7] зазначено, що визначення вогнегасної ефективності піни згідно з методиками, описаними у стандартах [1–5], пов'язане зі значними матеріальними витратами. Із метою їх зниження доцільно користуватися експрес-методиками визначення вогнегасної ефективності піни. Ці методики можуть бути придатні не тільки для оцінювання вогнегасної ефективності піни низької та середньої кратності, генерованої з робочих розчинів піноутворювачів, але й для визначення нормативної інтенсивності їх подавання в разі гасіння горючих рідин піною низької та середньої кратності. Саме такий підхід реалізовано під час розроблення нової редакції стандарту ДСТУ 3789:2015 [1] на заміну ДСТУ 3789-98, яким керувалися під час розроблення Інструкції [6].

**Постановка завдання.** З урахуванням вищевикладеного на теперішній час в Україні не втрачає актуальності питання удосконалення вимог із поводження з піноутворювачами для гасіння пожеж на всіх етапах їхнього життєвого циклу та застосування у пожежогасінні і протипожежному захисті об'єктів, й потребує проведення подальших досліджень, результати яких стали б підґрунтям для розроблення нормативного документа на заміну Інструкції [6].

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У результаті досліджень, описаних у роботі [7], зроблено ряд висновків стосовно необхідності нормування, методик і порядку контролювання показників якості піноутворювачів для гасіння пожеж, а також описано результати досліджень з

визначення параметрів процесів горіння неполярних горючих рідин, використовуваних як пальне під час випробування піноутворювачів, та результатів взаємодії піни з полум'ям під час їх гасіння. Зокрема, основні з яких свідчать, що:

1) зміна водневого показника дистильованої води, яка використовується для приготування водних розчинів піноутворювачів, може призводити до значної зміни відповідного показника якості цих розчинів. Такий ефект найбільшою мірою спостерігається у разі вимірювання водневого показника водних розчинів фторсинтетичних піноутворювачів, основним компонентом яких є нейоногенні ПАР (у цьому разі дистильована вода – розчинник – «нав'язує» значення рН водному розчину);

2) найкращу змочувальну здатність щодо гідрофобної тканини мають водні розчини піноутворювачів загального призначення, основою яких є вуглеводневі ПАР, а найгіршу – піноутворювачі на основі сировини природного походження (фторпротеїнові піноутворювачі);

3) з метою підвищення ефективності гасіння змочувальними розчинами піноутворювачів загального призначення твердих гідрофобних матеріалів для кожного з них має визначатися нормована концентрація змочувального розчину;

4) існує кореляція між тривалістю гасіння модельних вогнищ пожежі певного діаметра, а також критичною інтенсивністю подавання робочих розчинів піноутворювачів у разі гасіння горючої рідини піною середньої кратності, та тривалістю гасіння модельного вогнища пожежі 55В і показником вогнегасної здатності за класом пожежі В;

5) недосягнення нормованого значення кратності піни середньої кратності не є достатньою підставою для надання висновку про недоцільність його застосування для гасіння пожеж з використанням ежекційних генераторів піни середньої кратності;

6) зниження температури призводить до погіршення піноутворювальної здатності водних розчинів, однак неоднозначно впливає на вогнегасну ефективність піни;

7) швидкість вигорання та температура полум'я бензину автомобільного марки «А-76» є вищою за аналогічні показники для н-гептану та розчинника «Нефрас С-2-80/120». Останні два види пального за процесом горіння подібні між собою, при цьому відмічається також менша щільність диму ніж під час горіння бензину;

8) гасіння бензину автомобільного марки «А-76» пінами низької кратності, генерованими з

робочих розчинів піноутворювачів спеціального призначення різної природи, являє собою більш довготривалий процес, а його повторне займання після встановлення тигля повторного запалювання відбувається через найменші проміжки часу. Гасіння н-гептану відбувається протягом менших проміжків часу, ніж гасіння розчинника «Нефрас С-2-80/120», а проміжки часу до повторного займання н-гептану мають приблизно такі ж або дещо менші значення, ніж у випадку названого розчинника;

9) гасіння бензину автомобільного марки «А-76», що знаходиться у деку модельного (макетного) вогнища пожежі відповідного діаметру, потребує подавання піни протягом більшого проміжку часу, а ніж для випадку коли у якості пального застосовується н-гептан або «Нефрас С-2-80/120». При цьому відповідно збільшується й критична інтенсивність подавання робочого розчину піноутворювача;

10) результати досліджень з гасіння модельних вогнищ пожежі 55В і 144В (пальне – бензин марки «А-76» та «Нефрас С-2-80/120») підтвердили висновки про порівняльну вогнегасну ефективність та ізолювальну здатність піни під час їх гасіння. Тривалість гасіння і час повторного займання модельного вогнища пожежі 144В

у разі використання як пального розчинника «Нефрас С-2-80/120» відповідають тим значенням, які, відповідно до міжнародної класифікації дослідженого піноутворювача, повинні бути одержані під час його випробувань з використанням пального, яке відповідає вимогам відповідних міжнародних та європейських стандартів;

11) «Нефрас С-2-80/120» доцільно використовувати у якості пального замість автомобільного марки «А-76» під час випробувань піноутворювачів тощо.

Описані вище результати дали змогу обґрунтувати зміни до ДСТУ 3789, реалізовані розробленням його нової редакції [1]. На рисунку 2 згідно із [7] наведено основні відмінності між зазначеними редакціями національного стандарту.

У роботі [7] також йдеться про напрями удосконалення системи оцінювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж, порядок якого подається у вигляді блок-схеми, показаної на рисунку 3.

Принциповою відмінністю цієї схеми, від тієї, яку застосовували в Україні раніше, є обов'язковість визначення вогнегасної ефективності піни, а також можливість застосування з цією метою стендових методик [7]. Одержані у цій роботі результати використано у розробленні не тільки ДСТУ 3789 [1], а й ДСТУ 8615:2016 [23]. За час, що минув з моменту

завершення зазначених досліджень, принципових змін у методиках визначення показників якості піноутворювачів для гасіння пожеж не сталося. У відповідних джерелах, як і раніше, обмаль інформації щодо методів їх випробування, зокрема, роботи [24–28] містять головним чином результати порівняння ефективності піноутворювачів різних типів у разі їх випробування за не стандартизованими методиками. Чітка регламентація термінів, переліку показників якості піноутворювачів і порядку їх контролювання, за висновками автора [7], дає змогу одержати об'єктивні результати і, відповідно, вчасно вжити заходів щодо регенерації або заміни піноутворювачів, що зберігаються



Рис. 2. Основні відмінності ДСТУ 3789:2015 від ДСТУ 3789-98 [7]

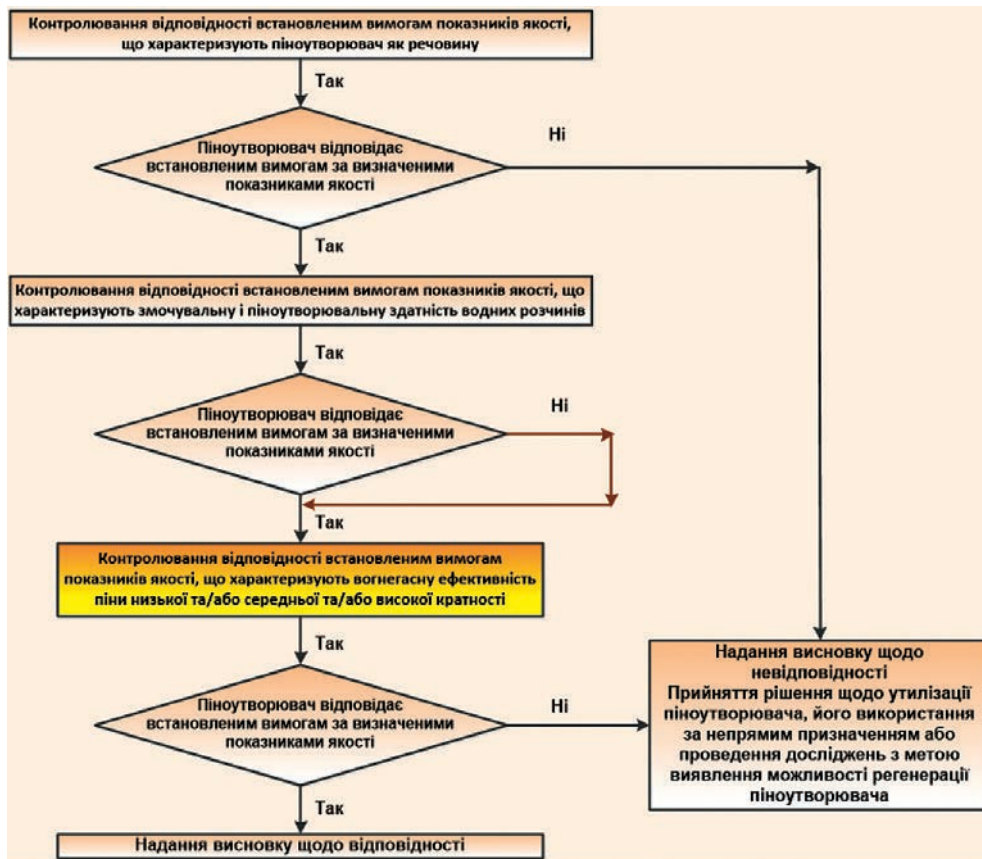


Рис. 3. Блок-схема процесу періодичного контролювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж [7]

в пожежно-рятувальних підрозділах або в резервуарах стаціонарних систем пожежогасіння. Водночас використання бензину-розчинника для гумової промисловості «Нефрас С-2-80/120» замість гептану як пального для вогневих випробувань дає змогу провести їх із забезпеченням прийнятної вартості [7].

**Висновки.** Зважаючи на викладене, розроблення нормативного документа на заміну Інструкції [6] має здійснюватися з урахуванням положень стандартів [1; 23], а також результатів, описаних у роботі [7]. За його основу передбачається прийняти положення, що регламентують порядок оцінювання якості піноутворювачів, регламентований вищезазначеними нормативними документами. Передбачається, що знов розроблюваний нормативний документ матиме статус національного стандарту, а його при-

йняття буде здійснене з одночасним скасуванням Інструкції [6]. Відмінності від чинної Інструкції першочергово мають відповідати змінам, обґрунтованим під час виконання роботи [7]. Для обґрунтування положень документа передбачається провести додаткові аналітичні дослідження і скласти інформаційні таблиці із зазначенням нормованих показників якості піноутворювачів для гасіння пожеж, використовуваних в Україні. Також убачається необхідність проведення експериментальних досліджень з метою оцінювання кореляції показників вогнегасної ефективності та ізолювальної здатності піни низької кратності, визначених за стендовою методикою, запропонованою в роботі [7], із значеннями, які відображають вказані виробниками класи піноутворювачів за вогнегасною ефективністю піни та рівнем її опору повторному займанню.

#### Список літератури:

1. ДСТУ 3789:2015 Пожежна безпека. Піноутворювачі загального призначення для гасіння пожеж. Загальні технічні вимоги і методи випробування.
2. ДСТУ EN 1568-1:2018 (EN 1568-1:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 1. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною середньої кратності, що подається на поверхню.

3. ДСТУ EN 1568-2:2018 (EN 1568-2:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 2. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною високої кратності, що подається на поверхню.
4. ДСТУ EN 1568-3:2018 (EN 1568-3:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 3. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водонерозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.
5. ДСТУ EN 1568-4:2018 (EN 1568-4:2018, IDT) Вогнегасні речовини. Піноутворювачі. Частина 4. Вимоги до піноутворювачів, призначених для гасіння водорозчинних горючих рідин піною низької кратності, що подається на поверхню.
6. Інструкція про порядок застосування і випробування піноутворювачів для пожежогасіння, затверджена наказом МНС України від 24.11.2008 за № 851.
7. Слущька О.М. Удосконалення системи оцінювання якості піноутворювачів для гасіння пожеж : дис. ... канд. техн. наук. Львів, ЛДУБЖД ДСНС України, 2019. 212 с.
8. Боровиков В.О. Одержання та застосування екологічно безпечних піноутворювачів для гасіння пожеж : дис. ... канд. техн. наук. Київ : УкрНДІПБ МВС України, 2002. 237 с.
9. Persson H., Bobert M., Amon F. ENANKFIRE – Fire extinguishing tests of ethanol tank fires in reduced scale, SP Swedish National Testing and Research Institutes, SP Report 2016:56, Boras, Sweden.
10. Шароварников А.Ф. Противопожарные пены. Состав, свойства, применение. Москва : Знак, 2000. 486 с.
11. РЖ Пожарная охрана, 1980, 10А98. Жесткий лабораторный метод огневых испытаний огнетушащих пен. Severe laboratory fire test for fire fighting foams / Chiesa P.J., Alger R.S. *Fire Technology*, 1980, т. 16, № 1. С. 12-21.
12. Низкократная фторсинтетическая пленкообразующая пена – эффективное средство тушения пожаров нефтепродуктов / Макаров С.А., Кряквин А.К., Беляев С.Г., Грошев М.А. *Юбилейный сборник научных трудов Академии государственной противопожарной службы МВД России*. Иваново : Изд. ИВГУ, 2001. С. 86–91.
13. Воевода С.С., Шароварников С.А., Макаров С.А. Влияние кратности пены на скорость растекания водной пленки по поверхности гептана. *Крупные пожары: Предупреждение и тушение: Матер. 16 научно-практ. конф.* Москва, 2001. Ч. 2. Москва : Изд. ВНИИПО, 2001. С. 54–58.
14. Макаров С.А., Шароварников С.А., Воевода С.С. Влияние скорости растекания водной пленки на огнетушащую эффективность пены. *Крупные пожары: Предупреждение и тушение: Матер. 16 научно-практ. конф.* Москва, 2001. Ч. 2. Москва : Изд. ВНИИПО, 2001. С. 63–72.
15. Шароварников С.А., Воевода С.С., Макаров С.А. Влияние коллоидно-химических свойств водных растворов поверхностно-активных веществ на скорость растекания водной пленки. *Крупные пожары: Предупреждение и тушение: Матер. 16 научно-практ. конф.* Москва, 2001. Ч. 2. Москва : Изд. ВНИИПО, 2001. С. 78–82.
16. Шароварников С.А., Воевода С.С., Макаров С.А. Исследование растекания пленки из водных растворов поверхностно-активных веществ по поверхности гептана. *Крупные пожары: Предупреждение и тушение: Матер. 16 научно-практ. конф.* Москва, 2001. Ч. 2. Москва : Изд. ВНИИПО, 2001. С. 82–87.
17. Комплексные исследования свойств фторсинтетической пены для тушения нефтепродуктов / Воевода С.С., Макаров С.А., Шароварников А.Ф., Шароварников С.А. *Пожаровзрывобезопасность*, 2003, т. 12, № 6. С. 39–42, 98.
18. Воевода С.С., Макаров С.А., Грошев М.А. Математическое моделирование тушения пламени нефтепродуктов пленкообразующей пеной. *Пожаровзрывобезопасность*, 2003, т. 12, № 6. С. 43–45, 98.
19. Воевода С.С., Макаров С.А., Шароварников С.А. Определение скорости растекания ряда фторсинтетических пенообразователей по поверхности нефтепродукта. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003, т. 12, № 6. С. 46–48, 98.
20. Экспериментальное определение характеристик тушения пленкообразующей пеной / Воевода С.С., Макаров С.А., Грошев М.А., Шароварников С.А. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003. Т. 12, № 6. С. 49–52, 98.
21. Влияние кратности противопожарной пленкообразующей пены на образование и растекание изолирующей водной пленки / Воевода С.С., Макаров С.А., Грошев М.А., Шароварников С.А. *Пожаровзрывобезопасность*. 2003, т. 12, № 6. С. 53–55, 99.
22. Пешков В.В., Цариченко С.Г. Пенообразователи для тушения пожаров. Что мы проверяем по методикам российского и международных стандартов (ISO и EN)? *Сборник трудов 5 Юбилейной Международной специализированной выставке «Пожарная безопасность XXI века» и 4 Международной специализированной выставке «Охранная и пожарная автоматика» (комплексные системы безопасности)*, Москва, 2006. Москва : Эксподизайн РА, М: ПожКнига, 2006. С. 73–74.



23. ДСТУ 8615:2016 Пожежна безпека. Піноутворювачі для гасіння пожеж. Настанови щодо поводження з вогнегасними речовинами, використовуваними у стаціонарних системах пінного пожежогасіння.
24. Xiaoyang Yu, Ning Jiang, Xuyang Miao, Fan Li, Jiyun Wang, Ruowen Zong, Chouxiamg Lu. Comparative studies on foam stability, oil-film interaction and fire extinguishing performance for fluorine-free and fluorinated foams. *Process Safety and Environmental Protection*, 2020, v. 133, pp. 201–215.
25. Youjie Sheng, Ning Jiang, Shouxiang Lu, Changhai Li. Fluorinated and fluorine-free firefighting foams spread on heptane surface. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2019, v. 552, pp. 1–8.
26. Katherine M.Hinnant, Michael W.Conroy, Ramagopal Anath. Influence of fuel on foam degradation for fluorinated and fluorine-free foams. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2017, v. 522, pp. 1–17.
27. Timm Rapsilber, Simone Kruger. Design fires with mixed-material burning cribs to determine the extinguishing effects of compressed air foams. *Fire Safety Journal*, 2019, v. 98, pp. 3–14.
28. Wenjie Pan, Mingguang Zhang, Xuyang Gao, Sifan Mo. Establishment of Aqueous Film Forming Foam extinguishing agent minimum supply intensity model based on experimental method. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 2020, v. 63, 103997.

**Skorobahatko T.M., Slutska O.M., Borovykov V.O., Pruskyi A.V., Stylyk I.H. IMPLEMENTATION OF THE IMPROVED QUALITY ASSESSMENT SYSTEM FOR FOAM CONCENTRATES FOR FIRE-FIGHTING BY UPDATING APPROPRIATE REGULATORY BASE**

*The paper analyses scientific publications and regulations regarding quality control of general and special purpose foam concentrates for fire-fighting. It is established that most of the available scientific publications are devoted to the study of the influence of nature of surfactants and functional additives on the properties of compositions that allow generation of air-mechanical foam using appropriate equipment as well as the development of formulations of foam concentrates. There are a small number of publications related to the development and evaluation of the objectivity of the methods for determining the quality of foam concentrates. The experience gained in Ukraine in applying test methods for foam concentrates for fire-fighting is generalized, and their disadvantages and advantages are revealed. Emphasis is placed on the need to improve the national regulatory framework governing handling of foam concentrates for fire-fighting at different stages of their life cycle. The main differences between the editions of the national standard DSTU 3789 are revealed, and the expediency of using gasoline-solvent for the rubber industry of «Nefras C-2-80/120» grade instead of petrol during tests to determine the fire-fighting efficiency of foam generated of foam solutions of general and special purpose foam concentrates. The need to revise the «Instruction on the use and testing of foam concentrates for fire-fighting», in particular, in terms of standardization of quality assessment of fire extinguishing agents stored at fire and rescue divisions and tanks of fixed fire-fighting systems, and to develop appropriate national standard to replace it. The essence of the envisaged changes is described taking into account the results of previous works as well as the directions of additional research that need to be carried out are outlined.*

**Key words:** fire-fighting efficiency, flammable liquid, controlling, foam, foam concentrate, fire, quality performance.

## ГЕОДЕЗІЯ

UDC 528.4:332.3

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/42>

### ***Wen Mingming***

School of Management  
of Guangdong Ocean University

### ***Liu Chang***

Institute of electronics and information engineering  
of Guangdong Ocean University

### ***Song Shuli***

School of Economics and Management  
of Heilongjiang Bayi Agriculture University

### ***Mamonov K.A.***

O. M. Beketov National University of Urban Economy in Kharkiv

### ***Rybina O.I.***

Sumy National Agrarian University

## **DEVELOPMENT OF EDUCATIONAL DIRECTION TO ENSURE THE ENVIRONMENTAL USE OF LAND IN THE FORMATION SYSTEM OF MODELS AND INSTRUMENTS IMPLEMENTED IN THE EDUCATIONAL SYSTEM OF UKRAINE<sup>1</sup>**

*It is proved that in the conditions of transformation processes, permanent changes in external and internal environment, negative influence of factors on functioning of economic systems training of experts who can adequately react to the presented problems has special value. It is determined that the formation and application of models and tools implemented in the educational system of Ukraine, their characteristics are important and relevant.*

*The purpose of the study is to characterize the methods and models implemented in the educational system of Ukraine in the context of the development of the educational direction of environmental use of land. To achieve this goal the following tasks are solved: definition of models used in the educational system; description of methods for the implementation of educational services; highlighting the features of the implementation of methods and models used in the educational system; determine the ways of forming and developing the educational direction of environmental use of land.*

*The study identified tools for educational activities, which consists of methods and models that have a personality-oriented nature, taking into account the interests of different groups of stakeholders. It allows to increase the effectiveness of educational activities, but the problematic aspects that arise in educational activities reduce the effectiveness of its operation. Therefore, there is a need to address them through the use of modern methods and models of educational activities. The necessity of development of the educational direction of the environmental use of land as a modern way of training skilled specialists for the economy of the state and ensuring the efficiency of land use in compliance with environmental safety is determined.*

**Key words:** *ecological use of land, educational system, models, methods, tools, personality-oriented approach.*

---

<sup>1</sup> This article are supported by the project of En-hancing School with Innovation of Guangdong Ocean University's (230420023), by the program for scientific research start-up funds of Guangdong Ocean University, and planning project for Educational Science Planning of Heilongjiang Province (GJB1319104).

**Introduction.** In the conditions of transformation processes, permanent changes in the external and internal environment, the negative impact of factors on the functioning of economic systems, the training of specialists who can adequately respond to the presented problems is of special importance. To do this, there is a need to use modern models and tools implemented in the educational system. In addition, in the context of slowing demographic processes in Ukraine, reducing the level of innovation in the education system, slowing down the integration and interaction of educational institutions with international partners, reducing the effectiveness of relations between different groups of stakeholders, there are problematic aspects affecting the development of education systems. In modern conditions, special importance is to ensure the environmental use of lands, the use of which affects the development of territories and the life of the population. In this context, one of the ways of modern development of the educational system is the development and implementation of training of specialists on the educational direction of environmental use of land. Thus, the formation and application of models and tools implemented in the educational system of Ukraine, development and implementation of educational direction for the environmental use of land, their characteristics are important and relevant.

**The purpose and objectives of the study.** The purpose of the study is to characterize the methods and models implemented in the educational system of Ukraine in the context of forming and implementing the educational direction of the environmental use of land. To achieve this goal the following tasks are solved:

- definition of models used in the educational system;
- description of methods for the implementation of educational services;
- highlighting the features of the implementation of methods and models used in the educational system;
- determination of directions and peculiarities of formation and implementation of educational direction of environmental use of land.

**Analysis of existing publications.** Directions of formation and use of methods and models in educational processes are presented in developments [1–17].

Along with this, the issues of distinguishing the peculiarities of the application of methods and models, tools implemented in the educational system of Ukraine remain unresolved.

**Main part.** When defining models for the implementation of educational services, modeling processes are characterized. In particular, according to V. Maslov, modeling in pedagogy has always existed in the form of standards of personality, the content of its education and training, but began to develop actively in the middle of the last century [10].

As part of the provision of educational activities, the following models have been formed:

- prognostic: for optimal allocation of resources and specification of goals;
- conceptual: formed on the basis of information database and action program;
- instrumental: with which you can prepare the means of execution;
- monitoring models: to create feedback mechanisms and ways to correct possible deviations from the planned results;
- reflexive: which are created to make decisions in case of unexpected and unforeseen situations [18].

The educational system uses models focused on sustainable development with a change in the consciousness of teachers through the use of value-semantic approach.

It should be noted that recently systems of system analysis have been used, which consider the educational process as a holistic system, consisting of a set of interconnected elements, taking into account the personality-oriented approach.

The educational system uses mathematical models based on correlation-regression analysis to establish cause-and-effect relationships. For their construction and implementation the following directions are used:

1. Formation of information and analytical support for modeling.
2. Construction of a correlation matrix that determines the relationships of indicators.
3. Development of models that characterize the causal relationships between indicators.
4. Verification of the developed models for adequacy based on the application of appropriate criteria.
5. Interpretation of the established causal relationships between indicators [19].

To verify the models used in the education system for adequacy, the relevant criteria are applied:

1. Correlation coefficient ( $R$ ), which characterizes the level of influence of the independent indicator ( $x$ ) on the resulting component ( $y$ ). On the basis of values of a correlation coefficient the directions of communication (inverted, direct) are defined. Depending on the values of the correlation coefficient, the level of influence between the indicators is set:

- 0 – no connection;
- 0.01 – 0.25 – low level of influence;
- 0.251 – 0.5 – mediocre level;
- 0.501 – 0.75 – significant level;
- 0.751 – 0.99 – high level;
- 1 – absolute connection.

2. The coefficient of determination is defined as the square of the correlation coefficient and characterizes the relationship between the indicators.

3. Student's criterion ( $t$ ) determines the statistical significance of the indicators of the developed model. It is evaluated by the ratio:

$$t = \frac{V_1 - V_2}{\sqrt{v_1^2 + v_2^2}}, \quad (1)$$

where  $V_1$  – are the average values of the first arithmetic comparison set;

$V_2$  – average values of the second arithmetic comparative set;

$v_1$  – average errors of the first arithmetic comparison set;

$v_2$  – average errors of the second arithmetic comparison set.

Indicators are statistically significant if the actual value of the Student's criterion exceeds its normative value. Otherwise, the indicator is excluded from the model.

4. Fisher's test ( $F$ ) is determined to confirm the significance of the correlation coefficients, which shows the reliability of the established relationships. The reliability of the established relationships between indicators is confirmed if the actual value of the Fisher criterion exceeds its normative value. If on the contrary, the model is considered inadequate. The value of the Fisher criterion is determined by the ratio:

$$F = \frac{1 - \eta^2}{n - p}, \quad (2)$$

where  $\eta$  – is the correlation that characterizes the relationship between the integrated indicator of the formation and use of intellectual capital and the generalized criteria of competitiveness and investment attractiveness of construction companies;

$p$  – parameters of the regression model;

$n$  – is the number of observations used for modeling.

5. Homo or heteroskedasticity test criteria used to determine the homogeneity or branching of residues of a random variable. The Broysch-Pagan, White, Golffeld-Kwandt, Glaser, and Aitken methods are used.

6. The Darbin-Watson test ( $d$ ) is used to determine the autocorrelation of the residues and is determined by the ranges of values, where the respective zones are characterized in relation to its minimum and maximum values ( $d_L$  and  $d_U$ ):

– if  $d < d_L$ , positive autocorrelation – the model is considered inadequate;

– if  $d > d_U$ , the hypothesis is not rejected – negative autocorrelation – the model is adequate;

– if  $d_L < d < d_U$  is an uncertainty zone where it is not possible to clearly determine the level of autocorrelation, there is a need for additional research [19].

Criteria for testing for multicollinearity, which determines the degree of dependence between independent variables. The essence of this phenomenon is that a high level of dependence between independent indicators leads to a shift in the evaluation results and obtaining inaccurate values of the correlation coefficient. Multicollinearity testing is performed on the basis of correlation coefficients.

To implement the educational process, the tools of system analysis, modeling, comparison, dialectical development, legal and information-analytical support, expert and structural-substantive analysis are used.

The presented tools and the proposed models are implemented through a set of interconnected elements:

– formation of a theoretical and methodological platform for the implementation of the educational process;

– creation of information-analytical and normative-legal base of functioning and development of educational process;

– development of models for the implementation of the educational process, taking into account the personality-oriented approach, taking into account the interests of stakeholders;

– research of adequacy and reliability of models;

– application of models in the educational process;

– interpretation of the obtained results.

The education system uses general and special teaching methods. They are structured by:

– the level of information (verbal, visual, practical);

– by submitting educational material (methods of ready knowledge and research methods);

– taking into account the purpose of training (methods of acquiring new knowledge, formation of skills and abilities, application of knowledge in practice, creative activity, consolidation of knowledge, skills and abilities, testing and evaluation of knowledge, skills and abilities);

– by the nature of educational and cognitive activities, heuristic, research [20].

Implementation of the presented instrumentation of the educational system is aimed at using them in the educational process. In particular, for use in the training of specialists capable of solving complex integrated tasks and practical problems in the field of

environmental use of lands with the use of modern devices, software and the latest methods.

It should be noted that the educational program is designed to provide scientific integrated knowledge, necessary practical skills and research activities in the field of environmental use of land. It is based on well-known provisions and results of modern scientific research on geodesy, land management, environmental safety and provides compulsory study of modern methods, methods and acquisitions of skills to use modern geodetic instruments and software, environmental and land monitoring, takes into account the scientific and practical interests of the applicants for chosen disciplines.

Implementation of the educational program is carried out on the basis of a combination of lectures, practical classes, independent and research work, applying normative literature, tutorials, lecture abstracts and experimental research, consultations with teachers.

The formation and implementation of the educational program is carried out by combining competent characteristics aimed at obtaining results:

- to know directions and modern trends in the development of the presented sphere;
- to determine the methods of collecting, processing geospatial data, to offer and analytically substantiate the models of efficient use and monitoring of land;
- to determine the directions and peculiarities of the formation of information and analytical provision of environmental monitoring;

- to analyze, determine, solve comprehensive problems in the field of environmental use of lands;
- plan and permanently decide on the environmental use of land;
- to search and analyze the information resources of environmental use of lands;
- to apply modern geospatial and ecological tools on environmental use of lands;
- organize and interact with stakeholders in the field of environmental use of lands;
- apply the regulatory and regulatory provision of land use;
- to form and implement project solutions in the field of environmental use of land.

**Conclusions and suggestions.** Thus, the study identified tools for educational activities, which consists of methods and models that have a personality-oriented nature, taking into account the interests of different groups of stakeholders. It allows to increase the effectiveness of educational activities, but the problematic aspects that arise in educational activities reduce the effectiveness of its operation. Therefore, there is a need to address them through the use of modern methods and models of educational activities. Specific ways and features of formation and implementation of the educational program of environmental use of lands, as one of the modern areas of development of an educational system, taking into account innovative approaches, tools and interaction with stakeholders.

#### References:

1. Гнезділова К.М., Касярум С.О. Моделі та моделювання у професійній діяльності викладача вищої школи : навчальний посібник. Черкаси : Чабаненко Ю.А., 2011. 124 с.
2. Горбань Г.О. Модель системного аналізу психології прийняття управлінського рішення. *Науковий вісник Миколаївського державного університету ім. В.О. Сухомлинського*. 2009. Т. 2. Вип. 8. С. 65–71.
3. Гусинский Э.Н. Построение теории образования на основе междисциплинарного системного подхода. Москва : Школа, 1994. 269 с.
4. Калініна Л.М. Технологія інформаційного управління закладом освіти. Харків : Основа, 2005. С. 129–133.
5. Кузьмінський А.І., Гнезділова К.М. Моделювання професійної діяльності майбутнього фахівця в умовах інтеграції України в європейський освітній простір : навчальний посібник. Черкаси : ЧНУ, 2011. 84 с.
6. Маслов В.І. Моделювання у теоретичній і практичній діяльності в педагогіці. *Післядипломна освіта в Україні*. 2008. № 1. С. 3–9.
7. Матковський С.О., Гринькевич О.С. Статистична підготовка фахівців у вищій школі: актуальні питання ефективності та розвитку. *Статистика України*. 2012. № 2. С. 79–84.
8. Столяренко О.В., Столяренко О.В. Моделювання педагогічної діяльності у підготовці фахівця : навчально-методичний посібник. Вінниця : Нілан-ЛТД, 2015. 196 с.
9. Моделювання професійної підготовки фахівців в умовах євроінтеграційних процесів : монографія / за ред. С.С. Вітвицької. Житомир : О.О. Євенок, 2019. 304 с.
10. Острроверхова Н.І. Моделювання в управлінській діяльності директора. *Директор школи. Україна*. 1999. № 8–9. С. 28–34.
11. Педагогічні технології: теорія і практика. Курс лекцій : навчальний посібник / за ред. М.В. Гриньова. Полтава : АС МІ, 2004. 180 с.
12. Пікельна В.С. Управління школою : у 2-х ч. Харків : Основа, 2004. 180 с.

13. Педагогика : учебное пособие / В.А. Слостенин и др. ; 4-е изд. Москва : Школьная Пресса, 2002. 512 с.
14. Полат, Е.С., Моисеева М.В., Петров А.Е. Дистанционное обучение / под ред. Е.С. Полат ; 3-е изд., перераб. и доп. Москва : Владос, 2005. 192 с.
15. Слєпкань З.І. Наукові засади педагогічного процесу у вищій школі : навчальний посібник. Київ : Вища шк., 2005. 239 с.
16. Шахмаев Н.М. Технические средства дистанционного обучения. Москва : Знание, 2000. 276 с.
17. Ягупов В. Моделювання навчального процесу як педагогічна проблема. *Неперервна професійна освіта: теорія і практика*. 2003. № 1. С. 28–37.
18. Почуєва О.О. Моделювання в теорії управління освітніми процесами. URL: <https://virtkafedra.ucoz.ua/ik4/Pochueva.pdf>.
19. Пруненко Д.О. Теоретико-методологічні аспекти формування та реалізації стратегії управління інтелектуальним капіталом будівельних підприємств : дис. ... д-ра екон. наук : 08.00.04 ; ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, КНУБА. Харків. 604 с.
20. Методи навчання у школі та ЗДО. URL: <https://www.pedrada.com.ua/article/2361-metodi-navchannya>.

**Вень Мінмін, Лю Чан, Сонг Шулі, Мамонов К.А., Рибіна О.І. РОЗВИТОК ОСВІТНЬОГО НАПРЯМУ ІЗ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОЛОГІЧНОГО ВИКОРИСТАННЯ ЗЕМЕЛЬ У СИСТЕМІ ФОРМУВАННЯ МОДЕЛЕЙ ТА ІНСТРУМЕНТІВ, УПРОВАДЖЕНИХ У СИСТЕМІ ОСВІТИ УКРАЇНИ**

*Доведено, що в умовах трансформаційних процесів, перманентних змін у зовнішньому і внутрішньому середовищі, негативного впливу чинників на функціонування економічних систем особливе значення має підготовка спеціалістів, які можуть адекватно реагувати на представлені проблеми. Визначено, що формування та застосування моделей та інструментів, що реалізуються в освітній системі України, їх характеристика мають велике значення.*

*Метою дослідження є характеристика методів і моделей, що реалізуються в освітній системі України в контексті розвитку освітнього напрямку екологічного використання земель. Для досягнення поставленої мети вирішено такі завдання: визначення моделей, що використовуються у освітній системі; характеристика методів для реалізації освітніх послуг; виокремлення особливостей реалізації методів і моделей, що використовуються в освітній системі; визначення шляхів формування та розвитку освітнього напрямку екологічного використання земель.*

*У результаті дослідження визначено інструментарій здійснення освітньої діяльності, який складається з методів і моделей, що мають особистісно-орієнтований характер, ураховують інтереси різних груп стейкхолдерів. Він дає змогу забезпечити зростання результативності освітньої діяльності, проте проблемні аспекти, що виникають в освітній діяльності, знижують ефективність її функціонування, тому виникає необхідність їх вирішення шляхом застосування сучасних методів і моделей здійснення освітньої діяльності. Визначено необхідність розвитку освітнього напрямку екологічного використання земель як сучасного шляху підготовки кваліфікованих спеціалістів для економіки держави і забезпечення ефективності землекористування з дотриманням екологічної безпеки.*

**Ключові слова:** екологічне використання земель, освітня система, моделі, методи, інструментарій, особистісно-орієнтований підхід.

# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 543.06

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.3/43>**Павленко О.А.**Український науково-дослідний інститут спеціальної техніки та судових експертиз  
Служби безпеки України

## МЕТОДИ Й ЗАСОБИ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРОЛІТІВ, СПОСОБИ ЇХ КОРИГУВАННЯ

У статті розкрито методи і засоби аналізу електролітів та способи їх коригування. Окреслено сфери застосування електролітів, зазначено, що однією з найбільш розвинених та затребуваних є промислова сфера та електрохімічна індустрія. У промисловій сфері електроліти застосовуються для виробництва джерел струму, батарей (гальванічних елементів), акумуляторів, електролітичних конденсаторів. В електрохімічній індустрії електроліти – основа розчинів для гальванування металів: хромування, міднення, цинкування, золочення, фосфатування, нікелювання. Обґрунтована необхідність контролю та коригування електролітів. Визначено чинники впливу на кількісні та якісні показники електролітів, які поділяються на внутрішні та зовнішні. Підкреслено, що до внутрішніх чинників відносяться параметри процесу, сам електроліт і аноди, а до зовнішніх чинників відносяться фактори пов'язані як з продуктом, так і з виробничим середовищем. Наголошено, що правильна концентрація речовин електроліту має вирішальне значення для забезпечення ресурсоефективного і енергоефективного процесу гальваніки. Описано методи аналізу електролітів, такі як титрування, рентгенівська флуоресценція, високоефективна рідинна хроматографія та іонна хроматографія. Ураховуючи важливість контролю електролітів та важкість здійснення процесу, запропоновано використання виробничої системи для технологічного ланцюжка гальваніки з акцентом на коригування електроліту, що створює методологічну основу виробничого процесу. У роботі наведено структурну схему виробничої системи з відокремленням всіх компонентів та встановлених зв'язків. Наголошено, що моделі комп'ютерного моделювання дозволяють отримати уявлення про взаємозв'язок процесу, структури і властивостей технологічного процесу та всіх складових частин, задіяних у ньому.

**Ключові слова:** аналіз, метод, електроліт, метал, гальваніка, коригування, спосіб, технологічний процес.

**Постановка проблеми.** Сфери застосування електролітів доволі масштабні. У промисловості основне застосування – це виробництво джерел струму, батарей (гальванічних елементів), акумуляторів, електролітичних конденсаторів. В аналітичній практиці використовуються рН-метри та іонометри з електродами, заповненими сольовими електролітами. В електрохімічній індустрії електроліти – основа розчинів для гальванування металів: хромування, міднення, цинкування, золочення, фосфатування, нікелювання та ін. За допомогою електролітів проводять травлення металів. У медицині та біології – діагностика багатьох захворювань пов'язана з визначенням характеру водно-сольового і кислотно-лужного балансу в організмі. Аналіз та коригування електролітів має значну вагу та вимагає контролю. Аналітичні виміри, особливо для органічних речовин, складні

і зазвичай проводяться тільки один раз в місяць. Тим часом вміст органічних речовин в електроліті не визначено чітко, і тільки в разі виникнення проблем проводяться додаткові виміри. Однак час грає визначальну роль, оскільки проблеми вже виникли і вимагають великих витрат на переробку та ремонт. Отже, потрібно застосовувати підхід до профілактичного обслуговування, який контролює вміст речовин електроліту, докладаючи мінімальні зусилля і витрати. У зв'язку з новими розробками і зниженням витрат в області сенсорної техніки хімічні параметри, такі як рН або провідність, будуть все частіше реєструватися в режимі онлайн, а також використовуватися для автоматичного керування технологічним процесом [1]. Хоча пристрої онлайн-аналізу добре зарекомендували себе у виробництві друкованих плат, межі онлайн-вимірювання в даний час все ще

обмежуються аналітикою добавок органічних електролітів. Склад цих речовин в основному відомий тільки постачальнику технологічного процесу, і використання пристроїв для онлайн-аналізу не є максимально ефективним.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наукові дослідження щодо застосування електролітів на сучасному виробництві спираються на праці багатьох вчених. У своїй більшості авторами обґрунтовується необхідність та ефективність застосування електролітів у процесах гальванічного характеру. Описуються методи застосування у рамках різних промислових напрямлень. Так переваги та недоліки електролітів блискучого цинкування розкрили Я.Ф. Черевач та О.В. Кислова [2]. Авторами виділено методи контролю якості електролітів у застосуванні останніх у процесі блискучого цинкування.

Я.О. Сичікова [3] запропонувала висвітлення питання оцінювання якості й властивостей наноструктур на поверхні напівпровідників. Науковиця підійшла до проблеми застосування електролітів для нанесення покриття на поверхні напівпровідників та сформувала єдиний підхід до способу аналізу кількості та якості застосованого електроліту.

Аналіз технологічних підходів до електрохімічної поверхневої обробки сплавів алюмінію провели Г.В. Каракуркчі, М.Д. Сахненко, М.В. Ведь, М.В. Туленко та А.В. Дженюк [4]. Сферу гальваніки розкрили О.В. Лінючева, Л.А. Яцюк, Т.І. Мотронюк, О.І. Букет та С.В. Фроленкова [5]. Авторами досліджено питання особливостей проектування гальванічних виробництв. Відокремлено напрямки застосування електролітів та запропоновано схематично методи аналізу електролітів.

О.В. Матухно [6] навів обґрунтування економічної доцільності впровадження екологічно безпечних способів та пристроїв для електрохімічної регенерації електролітів. Автором запропоновано спосіб електрохімічної регенерації відпрацьованих кислотних електролітів та пристрій для його здійснення, що дозволить спростити конструкцію електролізера, підвищити продуктивність роботи устаткування та збільшити еколого-економічну ефективність процесу електрохімічної регенерації за рахунок відмови від використання мембран.

Із зарубіжних авторів варто відзначити таких, як Girase, K., Wang, Z., Kamimoto, T., Deguchi, Y., Jeon, M., Cui, M., Huang, E. [7], Zhu, L., Guo, Z., Zhang, Y., Li, Z., Sui, M. [8], Zhou, C., Tao, L., Yang, F., Wang, B., Wan, X., Jin, Y. et. al. [9], Tisza, M., Lukács, Z. [10], Kasalica, B., Petković-Benazzouz,

M., Sarvan, M., Belča, I., Maksimović, B., Misailović, B., Popović, Z. [11], Zhu, L., Guo, Z., Zhang, Y., Li, Z., Sui, M. [12], Md Jani, A. M., Losic, D., Voelcker, N. H. [13], Hartmann, S., Sachse, A., Galarneau, A [14], Keranidis, A. T. [15] та інші.

У сучасній літературі не розглянуто питання аналізу електролітів на сучасному виробництві. Основна увага науковців присвячена питанню вдосконалення ліній виробництва, коли розглядається сценарій масового застосування електролітів, саме тому питання розгляду методів і засобів аналізу електролітів та їх коригування є актуальним та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Дослідити методи і засоби аналізу електролітів, способи їх коригування.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Аналіз електролітів та їх коригування в процесі виробництва, зокрема догляд за хімічним складом і підтримка його хімічного складу, є постійною проблемою для операторів технологічних ліній. Зазвичай можливість процесу забезпечується за рахунок використання методів аналізу процесу [12] та їх результатів для догляду та обслуговування електролітів. Оскільки якість результату застосування електролітів (наприклад, гальваніка) зазвичай не піддається безпосередньому виміру в процесі, максимальний результат досягається за рахунок дотримання процедурних меж допуску. Передбачається, що покриття відповідає вимогам якості при дотриманні меж допуску [8]. Щоб відповідати допустимим межах, методи аналізу повинні бути обрані з урахуванням інструментальних витрат, витрат на персонал, якість та доступність [13].

Електроліти для електролітичного покриття являють собою складні розчини, що складаються з великої кількості компонентів. Компоненти є, з одного боку, неорганічними речовинами, такі як метали покриття, які розчинені в формі солі та кислоти або підстави, а з іншого боку, органічні речовини, такі як комплексоутворювачі, агенти для зволоження, буфери та відбілювачі [1]. Концентрації і межі допуску цих речовин вказуються організатором технологічного процесу. Концентрації речовин визначаються як кількість речовини на обсяг. Для твердих речовин концентрація дається як маса на обсяг (наприклад, г / л), а для рідин як обсяг на обсяг (наприклад, мл / л).

На процес реалізації гальванічного впливу діє ряд факторів. Внутрішні чинники – це параметри процесу, сам електроліт і аноди, а зовнішні чинники можна розділити на фактори, пов'язані з продуктом і виробничим середовищем.



Усі фактори (рис. 1) впливають на стратегію контролю і дозування та безпосередньо впливають на стан і концентрацію компонентів електроліту. У процесі осадження компоненти електроліту постійно витрачаються. Загальне споживання речовини зазвичай складається з декількох часткових обсягів споживання: електрохімічне розкладання (хімічне перетворення), осадження металу (металів) та включення речовини в покриття, наприклад, органічних речовин [8]. Крім того, електроліт переноситься на наступний етап процесу через залишки, які залишаються на деталях після осадження. Цей процес зазвичай називають затуванням.

Правильна концентрація речовин електроліту має вирішальне значення для забезпечення ресурсоефективного і енергоефективного процесу гальваніки [15]. В іншому випадку обробка не є ефективною та потрібне доопрацювання. Щоб дотримати допуски, зазначені замовником процесу, необхідно контролювати рівень електроліту та поповнювати його за потребою. Витрати можна розрахувати як різницю між виміряною концентрацією, визначеною хімічним аналізом, і конкретною цільовою концентрацією речовини.

Основну масу електролітів для гальваніки, попередньої та подальшої обробки зазвичай можна аналізувати титруванням в лабораторії компанії. Титрування – ефективний метод з високою доступністю і порівняно низькими витра-

тами. Іншим варіантом визначення вмісту металу в електроліті є рентгенівська флуоресценція, яка також підходить для автоматичного онлайн-моніторингу електролітів, але вимагає великих витрат [7]. Органічні речовини, зазвичай не аналізуються компанією з нанесення покриттів через їх невідомий склад який зазвичай є секретом компанії постачальника технологічного процесу. Тому аналіз виконується з великими інтервалами постачальником технологічного процесу, щомісяця.

Кількісний аналіз органічних інгредієнтів простими методами виконати неможливо. Тому необхідно використовувати інструментальний аналіз, наприклад високоефективну рідинну хроматографію та іонну хроматографію [15]. Ґрунтуючись на зворотному зв'язку від постачальника технологічного процесу, компанія з нанесення покриттів може внести відповідні доповнення або коригування в електроліт.

Ураховуючи високу вартість високоефективної рідинної хроматографії, сучасні компанії з нанесення покриттів не мають можливості мати її в своєму складі. Онлайн-пристрої високоефективної рідинної хроматографії доступні з технічної точки зору, але застосовуються лише у виробництві друкованих плат, оскільки більш висока вартість електроліту і процесу виправдовує ще більш високі інвестиції [7].

Зазвичай органічні добавки дозуються згодом у відповідності зі специфікаціями постачальника

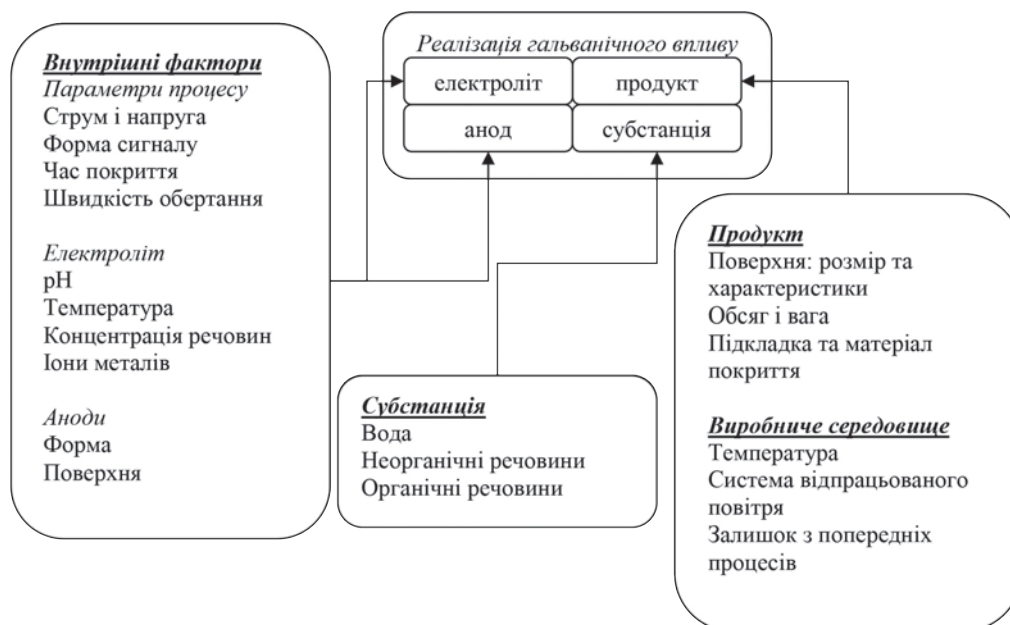


Рис. 1. Фактори впливу на реалізацію гальванічного процесу із застосуванням електролітів

технологічного процесу в проміжку між двома вимірами. Керуюча змінна для автоматичного поповнення зазвичай – ампер-години. Виходячи із цього, органічні добавки додаються в електроліт за допомогою дозуючих насосів. Між вимірами, отриманими від постачальника процесу, поточна концентрація агентів, відбілювачів або органічних комплексоутворювачів в електроліті невідома. Задля гарантування якості покриття використовуються якісні методи аналізу стану електроліту [13].

З певними зразками осадження, нанесеними в осередок Халла, можна визначити відхилення від очікуваного зовнішнього вигляду шару. Виходячи із цього, є можливість здійснювати поетапні додавання електроліту для коригування складу електроліту. Недоліком тесту Халла для управління технологічним процесом є той факт, що відхилення у складі електроліту помічаються тільки тоді, коли вони вже роблять видимий вплив на якість шару. Ця стратегія управління технологічним процесом зазвичай не дозволяє забезпечити постійну якість і підхід до профілактичного обслуговування.

У таблиці 1 наведені типові методи аналізу, що використовуються в компаніях малого і середнього бізнесу для різних складових частин електроліту. Властивості з точки зору зусиль і витрат оцінюються для порівняння та перевірки їх придатності для постійного моніторингу процесу в компаніях з нанесення покриттів.

Крім того, можна виміряти додаткові вторинні значення, такі як рН або питому вагу. Ці методи вимірювання показують не концентрацію інгредієнта, а властивості, які є результатом концентрацій певних інгредієнтів. Однак, наприклад, значення рН можна використовувати в якості контрольного показника, оскільки доступні недорогі методи вимірювання.

Ураховуючи чисельність методів аналізу електролітів, повні набори даних про стан електроліту не доступні. Найдовший інтервал часу між двома вимірами застосовують в аналізі органічних добавок, аналіз виконує постачальник процесу для компанії з нанесення покриттів. Добавки мають великий вплив на основні властивості покриття, такі як склад сплаву або блиск шару. Через великі інтервали часу між вимірами зміну концентрації інгредієнтів між аналізами органічних добавок в електроліті можна оцінити тільки якісно. Безперервне моделювання інгредієнтів електроліту як частина моделювання всієї лінії гальваніки могло б стати рішенням, щоб закрити цю прогалину в даних.

Моделювання описує уявлення системи з її динамічними процесами і розвитком в часі в експериментальному середовищі, що дозволяє досягти результатів, які можуть бути перенесені назад в реальність [9]. Основна класифікація імітаційних моделей – це поділ на статичні і динамічні моделі, а також поділ на детерміновані і стохастичні моделі [10], залежить від часу і події зміни інгредієнтів електроліту, моделювання електролітів в складі ліній гальваніки є завданням динамічного моделювання з, в основному, детермінованими властивостями.

Виробнича система для технологічного ланцюжка гальваніки з акцентом на коригування електроліту створює методологічну основу (рис. 2). Він містить чотири типових елемента: фізичну систему, збір даних, автоматизований програмний комплекс і підтримку прийняття рішень. Інтеграція імітаційних моделей в підході виробничої системи дозволяє використовувати дані моделювання для прогнозуючої системи контролю електроліту. Підхід повинен працювати без додаткових аналітичних вимірювань або даних датчиків і використовувати доступні дані з системи

Таблиця 1

Методи аналізу електролітів

| № | Компонент електроліту                              | Методи аналізу                        |                                 | Зовнішній, внутрішній | Зусилля | Витрати |
|---|--|---------------------------------------|---------------------------------|-----------------------|---------|---------|
| 1 | Солі металів                                       | Титрування                            | Кількісний                      | Внутрішній            | Середнє | Низькі  |
|   |  | Рентгенівська флуоресценція           | Кількісний                      | Внутрішній            | Низьке  | Високі  |
| 2 | Неорганічні речовини: кислоти, солі.               | Титрування                            | Кількісний                      | Внутрішній            | Середнє | Низькі  |
| 3 | Органічні речовини: комплексоутворювач, відбілювач | Високоєфективна рідинна хроматографія | Кількісний                      | Зовнішній             | Високе  | Високі  |
|   |  | А-лічильник                           | Прогнозування на основі досвіду | Внутрішній            | Низьке  | Низькі  |
|   |  | Корпусний осередок                    | Якісний                         | Внутрішній            | Середнє | Низькі  |

управління виробництвом і системи планування ресурсів підприємства.

Доступні і широко використовуються чотири парадигми моделювання: дискретна подія, динамічні системи, агентна і системна динаміка [11]. Сам електроліт можна змоделювати як динамічну систему, до якої застосовуються безперервні змінні. Тим не менш, деякі впливи на електроліт, наприклад затування, є дискретними подіями від всієї системи металізації.

Для поліпшення промислових виробничих процесів потрібне краще розуміння взаємозв'язку між процесом, структурою і властивістю. Моделі комп'ютерного моделювання дозволяють отримати уявлення про взаємозв'язок процесу, структури і властивостей. Перенесений на електроліт, чіткий взаємозв'язок між параметрами процесу гальваніки, досягнутими структурами і властивостями електроліту / покриття дозволяє розробити заходи щодо підвищення якості та стабільності процесу. Параметри процесу гальваніки безпосередньо впливають на структуру електроліту, зокрема на склад електроліту. Ця структура електроліту визначає електрохімічні властивості електроліту і, нарешті, процес нанесення покриття. Важливою основою для розробки структури електроліту є баланс матеріальних потоків. Отже, визначення та математичний опис відповідних матеріальних потоків є важливим елементом успішного моделювання.

Основним методом дослідження, внеском в моделювання та моделювання складу електроліту для гальваніки і поверхневих технологій є набір інструментів для електрохімічної інженерії. Цей набір інструментів дозволяє моделювати безперервно-дискретний характер електролітичних рідин і рідин для мокрого хімічного покриття на основі докладної фізичної моделі. Однак цей підхід валідовано тільки для процесу нанесення

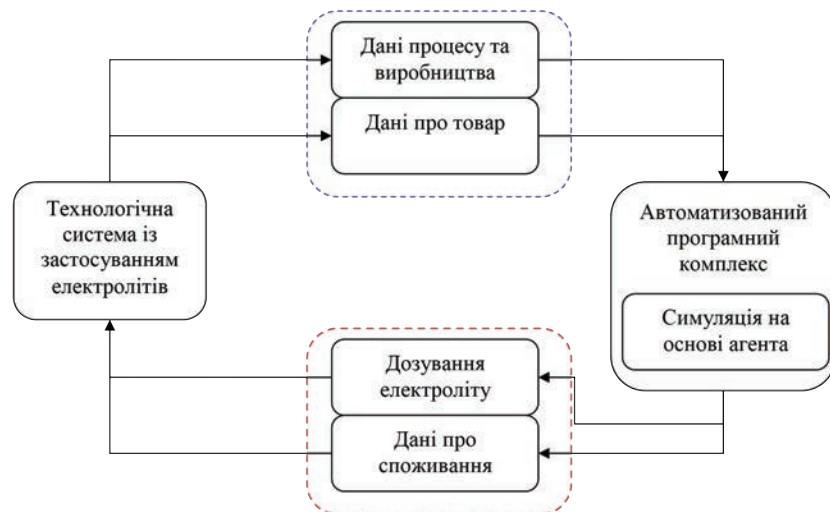


Рис. 2. Виробнича система для технологічного ланцюжка гальваніки з акцентом на коригування електроліту

покриття в лабораторних умовах, і через моделювання на рівні хімічних реакцій при моделюванні електроліту перенесення на промислові електроліти викликає труднощі.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** У роботі проведено дослідження методів і засобів аналізу електролітів та способи їх коригування. Моделювання дозволяє виконувати докладний і безперервний моніторинг електроліту, а також може використовуватися для апріорної оцінки потреби коригування. Майбутній попит на добавки можна розрахувати апріорі, і добавки можна замовити залежно від очікуваного попиту. Таким чином, можна зменшити збережені кількості, що зменшить необхідний простір для зберігання в цеху і ризики, пов'язані зі зберіганням великих кількостей небезпечних хімікатів.

Запропонований підхід повинен внести значний вклад в дослідження за допомогою перевіреного модельного аналізу, контролю і дозування електролітів. На відміну від аналітичних підходів, зусилля з моніторингу значно скорочуються, і можливий безперервний моніторинг. Від сучасних підходів до моделювання електролітів його можна відокремити від інтеграції виробничих систем, які дозволяють впроваджувати їх у промислові системи і перевіряти на промислових даних.

#### Список літератури:

1. Бодашко В.М., Філіппова М.В. Переваги реалізації АСК ТП механічної обробки деталей за допомогою SCADA – системи в порівнянні з DCS- та PLC – системами. *Погляд у майбутнє приладобудування: матеріали XI Всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та аспірантів* (м. Київ, 15-16 травня 2018 р.). Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського Україна, 2018. С. 95–98.
2. Черевач Я.Ф. Переваги та недоліки електролітів блискучого цинкування. *Наукові розробки молоді на сучасному етапі* : тези доповідей XVI Всеукраїнської наукової конференції молодих вчених та студентів

(27-28 квітня 2017 р., Київ). Київ : КНУТД, 2017. Т. 2 : Мехатронні системи і комп'ютерні технології. Ресурсозбереження та охорона навколишнього середовища. С. 530–531.

3. Сичікова Я.О. Науково-методологічні засади оцінювання якості й властивостей наноструктур на поверхні напівпровідників : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : 05.01.02 ; Укр. нац. наук. центр «Ін-т метрології». Харків, 2019. 40 с.

4. Karakurkchi, A., Sakhnenko, M., Ved', M., Tulenko, M., & Dzheniuk, A. Аналіз технологічних підходів до електрохімічної поверхневої обробки сплавів алюмінію. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. Vol. 3(12 (105)). P. 44–55. URL : <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.206014>.

5. Проектування гальванічних виробництв : навч. посіб. / О.В. Лінючева, Л.А. Яцюк, Т.І. Мотронюк та ін. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського», 2017. 147 с.

6. Матухно О.В. Обґрунтування економічної доцільності впровадження екологобезпечних способу та пристрою для електрохімічної регенерації електролітів. *Екологія і природокористування*. 2013. Вип. 17. С. 158–162.

7. Current density effects on plasma emission during plasma electrolytic oxidation (PEO) on AZ91D-magnesium alloy / K. Girase, et al. *Modern Physics Letters B*. 2020. Vol. 34. No. 07n09. P. 2040025. doi: <https://doi.org/10.1142/s0217984920400254>.

8. Zhu L., Guo Z., Zhang Y., Li Z., Sui M. A mechanism for the growth of a plasma electrolytic oxide coating on Al. *Electrochimica Acta*. 2016. Vol. 208. P. 296–303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.04.186>.

9. Application of electrochemical methods in heterogeneous catalysis / C. Zhou, et. al. *Current Opinion in Chemical Engineering*. 2019. Vol. 26. P. 88–95. doi: <https://doi.org/10.1016/j.coche.2019.09.00>.

10. Tisza M., Lukács Z. High strength aluminum alloys in car manufacturing. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2018. Vol. 418. No. 1. P. 012033. doi: <https://doi.org/10.1088/1757-899x/418/1/012033>.

11. Mechanisms of plasma electrolytic oxidation of aluminum at the multi-hour timescales / B. Kasalica, et al. *Surface and Coatings Technology*. 2020. No. 390. P. 125681. doi: <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2020.125681>.

12. A mechanism for the growth of a plasma electrolytic oxide coating on Al. / L. Zhu, et al. *Electrochimica Acta*. 2016. No. 208. P. 296–303. doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2016.04.186>.

13. Jani A. M. M., Losic D., & Voelcker N. H. Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications. *Progress in Materials Science*. 2013. Vol. 58(5). P. 636–704. doi: <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2013.01.002>.

14. Hartmann S., Sachse A., Galarneau A. Challenges and Strategies in the Synthesis of Mesoporous Alumina Powders and Hierarchical Alumina Monoliths. *Materials*. 2012. Vol. 5(12). P. 336–349. doi: <https://doi.org/10.3390/ma5020336>.

15. Kermanidis A. T. Aircraft Aluminum Alloys: Applications and Future Trends. *Revolutionizing Aircraft Materials and Processes*. 2020. P. 21–55. doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-35346-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-35346-9_2).

## **Pavlenko O.A. METHODS AND MEANS OF ELECTROLYTE ANALYSIS, METHODS OF THEIR ADJUSTMENT**

*The article describes the methods and means of analysis of electrolytes and methods of their correction. The spheres of application of electrolytes are outlined, it is noted that one of the most developed and demanded is the industrial sphere and the electrochemical industry. In the industrial sphere, electrolytes are used for the production of current sources, batteries (galvanic cells), batteries, electrolytic capacitors. In the electrochemical industry, electrolytes are the basis of solutions for galvanizing metals: chromium plating, copper plating, galvanizing, gilding, phosphating, nickel plating. The need for control and adjustment of electrolytes is substantiated. Factors influencing the quantitative and qualitative indicators of electrolytes, which are divided into internal and external. It is emphasized that the internal factors include process parameters, the electrolyte and anodes, and external factors include factors related to both the product and the production environment. It is emphasized that the correct concentration of electrolyte substances is crucial to ensure resource-efficient and energy-efficient electroplating process. Methods of electrolyte analysis such as titration, X-ray fluorescence, high performance liquid chromatography and ion chromatography are described. Given the importance of electrolyte control and the difficulty of the process, it is proposed to use a production system for the electroplating circuit with an emphasis on the adjustment of the electrolyte, which creates the methodological basis of the production process. The paper presents a block diagram of the production system with the separation of all components and connections. It is emphasized that computer modeling models allow to get an idea of the relationship of the process, structure and properties of the technological process and all components involved in it.*

**Key words:** analysis, method, electrolyte, metal, electroplating, adjustment, method, technological process.

**Рощенко О.М.**

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

## ПІДВИЩЕННЯ ПРОДУКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИБОРУ ЗА РАХУНОК ЗАСТОСУВАННЯ МОДУЛЬНОЇ СИСТЕМИ

*У статті досліджено принцип підвищення продуктивності роботи електронного пристрою за рахунок застосування модульної системи. Сформовано основний склад модульних керуючих систем для двох електронних систем: енергетичної та інформаційної. Підкреслено, що кожна модульна система базується на основних модулях, які взаємодіють між собою. Виділено три напрямки формування базових модулів: базові модулі (один або кілька), що забезпечують електроживлення системи, відносяться до категорії джерел і є, як правило, обов'язковими елементами модульної системи; базові модулі (один або кілька), які забезпечують функції управління (в разі потреби такої), зрозуміло, відносяться до категорії управління і є не завжди обов'язковими елементами модульної системи; базові модулі, що виконують роль виходу системи для виведення енергії або інформації, відносяться до категорії споживачів (передавачів) і є обов'язковими елементами будь-якої системи. Обґрунтовано та схематично підтверджено реалізацію взаємодії між загальним інтерфейсом та інтерфейсом модульної системи на базі електронних пристроїв. Зазначається, що передача даних здійснюється через інтелектуальну транспортну шину даних. Розроблено модульну електронну систему на прикладі навігаційної системи автомобільного транспорту, здатну керуватися людською мовою, що є актуальним в умовах сьогодення. Розроблена система є модульною, дає можливість змінювати та додавати нові елементи без шкоди для роботи. Наведено схематично структуру розробленої модульної системи та описано всі її складові частини. Також обґрунтовано напрямки взаємодії та модернізації. Наголошено, що модульна структура дозволяє максимально розширити можливість дослідження електронних пристроїв, підвищити їх продуктивність та сформуванню дієвий взаємозв'язок.*

**Ключові слова:** продуктивність, електронний пристрій, модульна система, управління, програмне забезпечення, вдосконалення, обладнання.

**Постановка проблеми.** Стрімкий розвиток технологій за останні кілька десятиліть справив великий вплив на сучасні електронні пристрої. Напрямки застосування електронних пристроїв мають широкий спектр, до якого можна віднести цифрові радіоприймачі, прилади GPS, комп'ютери, радары, ліхтарі, сирени і т.д. Модульна система реалізації електронного пристрою дозволяє використовувати пристрої, які легко інтегруються на мобільні засоби, наприклад автомобілі. Інтеграція потрібна за трьома напрямками. По-перше, пристрої повинні бути фізично підключені до системи. Це означає, що їх обладнання має взаємодіяти з авто і, можливо, з іншими пристроями транспортного засобу. Далі, електронні пристрої можуть вимагати програмного управління, або вони можуть мати вхідні і вихідні сигнали, які можуть управлятися програмним забезпеченням. Програмне забезпечення для електронного пристрою може працювати на центральному комп'ютері, і йому, можливо, доведеться взаємодіяти з програмним забезпеченням, керуючим іншими пристроями. Нарешті,

необхідно встановити інтерфейси пристроїв. Це необхідно робити з урахуванням вимог ергономіки. Одна з проблем, з якою стикаються користувачі, полягає в тому, що електронні пристрої, які вони встановлюють на транспортні засоби, в даний час не будуються з урахуванням інтеграції. Цю загальну проблему можна розділити на три взаємопов'язані підзадачі, які тісно пов'язані зі згаданими вище областями інтеграції: пристрої несумісні з обладнанням. Пристрої не побудовані з використанням стандарту для апаратних з'єднань. Деякими пристроями можна керувати тільки за допомогою кнопок. Інші мають складні апаратні інтерфейси (наприклад, послідовні або паралельні шини), які дозволяють користувачеві вводити і виводити дані. Деякі забезпечують зворотний зв'язок з користувачем через світлодіоди, інші використовують вбудовані дисплеї. У результаті для інтеграції пристроїв потрібне створення призначених для користувача апаратних інтерфейсів; пристрої несумісні з програмним забезпеченням. Як тільки проблема сумісності обладнання буде вирішена, електронними пристроями

можна буде керувати за допомогою програмного забезпечення, запущеного на комп'ютері. Однак не існує стандарту програмного забезпечення, що дозволяє писати програми для пристроїв, призначених для ринку автомобільних засобів. Це означає, що комп'ютерне управління пристроями, а також будь-яка взаємодія між пристроями повинна вирішуватися в індивідуальному порядку; кожен пристрій має власний користувальницький інтерфейс. Оскільки пристрої несумісні з апаратним або програмним забезпеченням, кожному з них потрібен власний користувальницький інтерфейс. Це призводить до безлічі індивідуальних інтерфейсів на базі встановлення. Основна проблема з великою кількістю інтерфейсів полягає в тому, що взаємодія з ними відволікає користувача, особливо, якщо це водій.

Безсумнівно, використання пристроїв само по собі дає когнітивне навантаження. Однак це когнітивне навантаження збільшується через розкид призначених для користувача інтерфейсів по авто. Додаткова проблема полягає в тому, що більшість інтерфейсів покладаються майже виключно на перемикачі або кнопки для введення від користувача і світлодіоди або дисплеї для виведення інформації користувачеві, що відволікає увагу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Модульна структура як інформаційних так і енергетичних систем на сьогодні є актуальним напрямком для проведення досліджень. Науковці формують уявлення щодо законів становлення модульної структури, їх принципів та основних складових. Застосування модульної структури розглядається у різних сферах, починаючи з промислових ліній та закінчуючи мобільними системами. Так, створення електронної системи моніторингу та управління в системі електропостачання локального об'єкту для досягнення ефективного співвідношення між генерацією та споживанням електричної енергії дослідили О.П. Кравченко, Е.Г. Манойлов, О.Г. Бабич, Я.С. Малий [1]. Авторами сформовано перелік необхідних законів успішної реалізації модульної системи. Визначено обов'язкові складові частини.

Є.В. Вербицький та А.В. Гарницький [2] визначили вимоги, яким мають відповідати двонаправлені перетворювачі електроенергії: широкий діапазон параметрів вхідної напруги, корекція коефіцієнта потужності вхідного струму, відбирання максимальної потужності від відновлювальних джерел енергії, висока енергетична ефективність. Авторами обґрунтована топологія двонаправленого ізолюваного перетворювача із двома актив-

ними мостами. Сформовано заходи по створенню модульної енергетичної системи.

Д.І. Кузнєцов [3] розробив інформаційну систему для визначення поточного стану та ідентифікації будь-якого енергетичного обладнання, головним елементом якого є асинхронний двигун, зокрема визначення несправностей та підвищеного енергоспоживання в енергетичних мережах типу Smart Grid. Науковець представив модель модульної інформаційної кіберфізичної системи із застосуванням Smart Box пристрою для ранньої технічної діагностики електрообладнання та його інформаційні потоки.

Принципи формування модульної структури електронного пристрою на прикладі MicroGrid навели Ю.С. Ямненко, А.В. Моргун та О.М. Комаревич [4]. У статті наведено модульну структуру та показано взаємозв'язки між модулями програмного забезпечення. Для кожного з основних модулів наведено опис та функціональне призначення. Окрему увагу приділено модулю представлення структури MicroGrid за допомогою математичного апарату структурних чисел.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи, як: Morkun, V., Tron, V., Goncharov, S. [5], Korel, B.T.; Koo, S.G. [6], RuEmann M., Lorenz M., Gerbert P., Waldner M., Justus J., Engel P., Harnisch M. [7], Breunig M., Kriegel H.-P., T. Ng R., Sander J. [8], Deutschmann B., Auinger B., Winkler G. [9], C. Wen, Z. Liu, Z. Li [10], Park Hyung-Min, Jin Hyun-Bae, Kang Jin-Ku [11], Monika Jain [12], Parzen, E. [13], Ivette S. [14] та інші.

У сучасній літературі не розглянуто питання принципу підвищення продуктивності роботи електронного пристрою. Основна увага науковців присвячена питанню вдосконалення роботи електронного пристрою на базі реальної системи, не враховуючи модульну складову частину, саме тому питання підвищення продуктивності роботи електронного пристрою за рахунок застосування модульної системи є актуальним та потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – дослідити принцип підвищення продуктивності роботи електронного пристрою за рахунок застосування модульної системи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Завдання модульної системи – вирішити проблему інтеграції електронних пристроїв для підвищення продуктивності. Із точки зору складання системи проект спрямований на створення модульної системи, яка легко встановлюється, модифікується, розширюється, перевіряється і ремонтується.

Із точки зору користувача, мета проекту – створити систему зі стандартним і безпечним для користувача інтерфейсом, яка дозволить керувати електронним пристроєм. Перелік мінімально необхідних складових частин для створення модульної системи наведено в таблиці 1.

Кожна модульна система базується на основних модулях, які взаємодіють між собою. Базові модулі електронної системи можна розділити на три основні категорії:

1) базові модулі (один або кілька), що забезпечують електроживлення системи, відносяться до категорії джерел і є, як правило, обов'язковими елементами модульної системи;

2) базові модулі (один або кілька), які забезпечують функції управління (в разі потреби такої), зрозуміло, відносяться до категорії управління і є не завжди обов'язковими елементами модульної системи;

3) базові модулі, що виконують роль виходу системи для виведення енергії або інформації, відносяться до категорії споживачів (передавачів) і є обов'язковими елементами будь-якої системи.

Реалізація модульної системи можлива за рахунок використання стандартів апаратних та програмних засобів. У випадку коли електронні пристрої побудовані з використанням цих стандартів, їх можна включити в мобільну систему з мінімальними зусиллями по інтеграції.

Наведемо принцип формування та застосування модульної електронної системи на прикладі навігаційного приладу авто Модульна система реалізує апаратну інтеграцію за допомогою інтелектуальної транспортної системи передачі даних (ІТСПД). Стандарт ІТСПД передбачає як апаратні компоненти, так і протокол, необхідний для виконання завдань управління та обміну інформацією між всіма складовими бази встановлення [8].

Загальний інтерфейс дозволяє передавати повідомлення ІТСПД на пристрій обслуговування,

а відповіді з пристрою розміщувати на ІТСПД. Низка пристроїв, призначених для автомобілів, не можуть підключитися до ІТСПД, однак більшість із них мають послідовні та / або паралельні входи та виходи. Тому модульна система передбачає вбудований пристрій, який може послідовно та паралельно взаємодіяти з електронними пристроями та може взаємодіяти з ІТСПД. За допомогою цього пристрою повідомлення з ІТСПД можуть бути перекладені та надіслані на підключений пристрій, а відповіді з цього пристрою можна помістити на ІТСПД, як показано на рисунку 1.

Загальний інтерфейс ІТСПД діє на протоколі Control Area Network (CAN) як методі передачі даних на ІТСПД. Протокол CAN, розроблений Robert Bosch GmbH, використовує диференціальну сигналізацію.

Як засіб підключення додаткових пристроїв до ІТСПД інтерфейс має два варіанти. Перший тип пропонуваного з'єднання – це послідовний порт, який використовує стандартну шину RS-232. Другий тип підключення – це порт, який пропонує п'ять паралельних сигналів рівня TTL, які можна використовувати для різноманітних програм, включаючи комутацію. Потік даних між додатковим пристроєм та ІТСПД обробляється мікроконтролером. Під час ініціалізації мікроконтролер встановлює унікальну адресу ІТСПД пристрою та встановлює послідовний та / або паралельний зв'язок із пристроєм.

Архітектура розроблена з урахуванням двох цілей. По-перше, створити відкриту та модульну архітектуру, яка б дозволяла додавати та обмінювати компоненти. Така система дозволить легко додавати програмні компоненти для управління новим обладнанням. Це також дозволить модернізувати існуючі програмні компоненти в міру появи більш досконалих. По-друге, створити таку архітектуру програмного забезпечення, щоб людську мову можна було легко використовувати як користувальницький інтерфейс для всіх програм.

Таблиця 1

Основний склад модульних керуючих систем

| Найменування електронної системи | Засоби вилучення   | Засоби управління                     | Внутрішньо системні зв'язки | Джерела застосування |
|----------------------------------|--------------------|---------------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| Енергетична                      | Джерело енергії    | Перетворювач енергії, що управляється | Канал отримання енергії     | Споживач енергії     |
|                                  | Приймач енергії    |                                       | Канал видачі енергії        | Передавач енергії    |
| Інформаційна                     | Джерело інформації | Обробник інформації, що управляється  | Канал отримання інформації  | Споживач інформації  |
|                                  | Приймач інформації |                                       | Канал видачі інформації     | Передавач інформації |



Рис. 1. Схема дії інтелектуальної транспортної системи передачі даних



Рис. 2. Архітектура програмної системи

На рисунку 2 представлений детальний вигляд програмної системи реалізації модульної системи об'єднання електронних пристроїв. У центрі системи – менеджер додатків. Менеджер надсилає контрольні повідомлення окремим програмам. Програми керують окремими функціями бази встановлення (наприклад, одна програма керує світловою панеллю, а інша – радіолокаційним блоком). Додатки взаємодіють з трьома модулями в системі. Перший – координатор повідомлень. Цей модуль отримує повідомлення про стан від програм. Ці повідомлення пересилаються менеджеру. Другий модуль – координатор реєстрації. Цей модуль забезпечує централізовані засоби для всіх додатків реєструвати події та помилки. Нарешті, координатор виводу мови відповідає за впорядкований вивід мовних повідомлень користувачеві.

Будь-яка система повинна прагнути до максимально швидкого проходження через неї якомога більшого обсягу інформації. Для ефективного функ-

ціонування системи потрібно повне узгодження роботи всіх її частин по проходженню потоку інформації. При цьому використовуються різні методи ритмічності або синхронізації, що забезпечують безперешкодне породження потоків інформації в елементах системи і через систему в цілому. При послідовній обробці інформації – послідовному способі рішення – доцільний динамічний режим почергового опитування функціональних модулів.

В умовах, коли неможливе послідовне опитування функціональних модулів системи або виявлена недостатня пропускну здатність її ядра, формується збільшення каналів обробки в модулі ядра, а при досягненні межі кількості каналів в модулі ядра, то в разі його перевантаження проводиться паралельне нарощування кількості модулів ядра. У цьому випадку відбувається перехід до паралельного методу рішення.

На базі модульних систем існує безліч методів синхронізації процесів, що відбуваються і потоків



регулювання, що протікають, також як критеріїв їх налаштування і видів їх контролю, але завдання тут одне – проходження через систему інформації без втрат та максимальне підвищення продуктивності роботи.

**Висновки і перспективи подальших досліджень.** У роботі розкрито принцип підвищення продуктивності роботи електронного пристрою за рахунок застосування модульної системи.

Представлена модульна масштабована система електронних пристроїв на базі автомобілю легко встановлюється, модифікується, розширюється,

перевіряється та ремонтується. Система використовує стандартний мовний інтерфейс користувача, який є безпечним, оскільки дозволяє вільно користуватися пристроями в автомобілі. Модульна структура дозволяє максимально розширити можливість дослідження електронних пристроїв, підвищити їх продуктивність та сформувані дієвий взаємозв'язок.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на модельній розробці модульного електронного пристрою для керування безпілотним літальним апаратом.

### Список літератури:

1. Засоби забезпечення оптимального функціонування електричної системи локального об'єкту / О.П. Кравченко, Е.Г. Манойлов, Г.О. Бабич, Я.С. Малий. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія Технічні науки*. 2020. № 4(148). С. 59–66.
2. Вербицький Є.В., Гарницький А.В. Модульний зарядний пристрій акумулятора електромобіля з двостороннім передаванням енергії. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. : Нові рішення в сучасних технологіях : зб. наук. пр. = Bulletin of the National Technical University «KhPI». Ser. : New solutions in modern technology : col. of sci. papers*. Харків : НТУ «ХПІ», 2020. № 4(6). С. 22–27.
3. Кузнєцов Д.І. Інформаційна система визначення поточного стану електрообладнання для Smart Grid мереж. *Вісник Криворізького національного університету* : зб. наук. праць. Кривий Ріг, 2019. Вип. 49. С. 30–36. DOI: 10.31721/2306-5451-2019-1-49-30-36.
4. Ямненко Ю.С., Моргун А.В., Комаревич О.М., Програмне забезпечення для макромодельовання системи керування MicroGrid. *Electronics and communications*. 2016. Т. 21, № 6. С. 61–66.
5. Morkun V., Tron V., Goncharov S. Automation of the ore varieties recognition process in the technological process streams based on the dynamic effects of high-energy ultrasound. *Metallurgical and Mining Industry*, 2015. № 2. P. 31–34.
6. Korel B.T., Koo S.G. Addressing context awareness techniques in body sensor networks. In Proceedings of the 21st International Conference on Advanced Information Networking and Applications Workshops (AINAW '07), Niagara Falls (ON, Canada, 21–23 May 2007). 2007. Vol. 2. P. 798–803.
7. Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries / M. Rüßmann, et al. Boston Consulting Group. 2015. Vol. 9. No. 1. С. 54–89.
8. Breunig M., Kriegel H.-P., T. Ng R., Sander J. LOF: Identifying Density-Based Local Outliers. *Proceedings of the ACM SIGMOD International Conference on Management of Data*. ACM Press. P. 93–104.
9. Deutschmann B., Auinger B., Winkler G. *Proceedings of the 2017 11th International Workshop on the Electromagnetic Compatibility of Integrated Circuits (EMCCompo)* (July 4-8, 2017, St. Petersburg, Russia). Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI». 2017. No. 7998078. P. 39–44.
10. Wen C., Liu Z., Li Z. Droop Control of Parallel Dual-Mode Inverters Used in Microgrid. *International Conference on Power Electronics and Energy Engineering*. 2015. URL : [http://www.atlantis-press.com/php/download\\_paper.php?id=2481](http://www.atlantis-press.com/php/download_paper.php?id=2481) (Last accessed: 17.03.2021).
11. Park H. M., Jin H. B., Kang J. K. SSCG with Hershey-Kiss modulation profile using Dual Sigma-Delta modulators. *IEICE Electronics Express*. 2010. Vol. 7. No. 18. P. 1349–1353.
12. Analysis of a microgrid under transient conditions using voltage and frequency controller / M. Jain, et al. *Advances in Power Electronics*. 2012. Vol. 2012. P. 18.
13. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. *The annals of mathematical statistics*. 1962. Vol. 33. No. 3. P. 1065–1076. doi:10.1214/aoms/1177704472. JSTOR 2237880.
14. Ivette S. Enabling Energy Reliability and Security – Opportunities in Campus. *Commercial & Industrial Communities*. 2012. P. 19.

### **Roschenko O.M. IMPROVING THE PRODUCTIVITY OF THE ELECTRONIC DEVICE THROUGH THE USE OF A MODULAR SYSTEM**

*The article investigates the principle of increasing the productivity of an electronic device through the use of a modular system. The basic structure of modular control systems for two electronic systems is formed: power and information. It is emphasized that each modular system is based on the main modules that interact*

*with each other. There are three directions of formation of basic modules: basic modules (one or more) that provide power to the system, belong to the category of sources and are, as a rule, mandatory elements of the modular system; basic modules (one or more) that provide control functions (if necessary), of course, belong to the category of control and are not always mandatory elements of the modular system; basic modules that act as a system output for energy or information output belong to the category of consumers (transmitters) and are mandatory elements of any system. The implementation of the interaction between the common interface and the interface of the modular system based on electronic devices is substantiated and schematically confirmed. It is noted that the data transmission is carried out through the intelligent data bus. A modular electronic system has been developed on the example of a road transport navigation system capable of being controlled by human language, which is relevant in today's conditions. The developed system is modular, allows you to change and add new elements without compromising performance. The structure of the developed modular system is given schematically and all its components are described. The directions of interaction and modernization are also substantiated. It is emphasized that the modular structure allows to maximize the possibility of researching electronic devices, increase their productivity and form an effective relationship.*

**Key words:** *performance, electronic device, modular system, control, software, improvement, equipment.*

**Відомості про авторів**

**Азарян В.А.** – доктор технічних наук, професор кафедри відкритих гірничих робіт Криворізького національного університету

**Альховик О.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Антіпова К.О.** – PhD, викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Арпентій С.П.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Багінський В.О.** – магістрант 2-го курсу кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Беглов К.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Державного університету «Одеська політехніка»

**Білевська О.С.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Бойко С.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

**Боровиков В.О.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник відділу електротехнічних виробів науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Брунеткін О.І.** – Державний університет «Одеська політехніка»

**Бутовський Л.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Вень Мінмін** – кандидат економічних наук, доцент, Школа управління, Океанський університет, Гуандун, Китай

**Воскресенський В.Б.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Горбань Г.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Грановська О.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Грішин М.В.** – аспірант Державного університету «Одеська політехніка»

**Гуйда О.Г.** – кандидат наук державного управління, старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Данилян А.Г.** – старший викладач кафедри судових енергетичних установок і систем Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Дьяконов О.С.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Єнчев С.В.** – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету

**Єсакова С.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

**Жуков О.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електромеханічних систем автоматизації в промисловості і на транспорті Вінницького національного технічного університету

**Завгородній В.В.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій та дизайну Державного університету інфраструктури та технологій

**Залюбовський М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Іванченко Л.В.** – викладач циклової комісії філологічних дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

**Іхсанов Ш.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Кандиба І.О.** – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Кирисов І.Г.** – аспірант кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

**Лазебний В.М.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Лежнін К.В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Ленчевський Є.А.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу прогнозування розвитку та управління функціонуванням електроенергетики Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Лучковський І.Я.** – доктор технічних наук, професор, почесний професор кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

**Лю Чан** – кандидат економічних наук, доцент, Інститут електроніки та інженерії, Океанський університет, Гуандун, Китай

**Лю Ян** – аспірант кафедри теоретичної та промислової теплотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Малишев В.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Інженерно-технологічного інституту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Маловичко В.К.** – Державний університет «Одеська політехніка»

**Мамонов К.А.** – доктор економічних наук, професор, професор кафедри земельного адміністрування та геоінформаційних систем Харківського національного університету міського господарства імені О.М. Бекетова

**Мануїлов Я.С.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Мінасва Ю.Ю.** – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Мороз О.С.** – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Морочко В.В.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту та галузевого машинобудування Національного університету «Чернігівська політехніка»

**Мулява О.М.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри вищої математики імені професора В.І. Можара Національного університету харчових технологій

**Новаківський Є.В.** – кандидат технічних наук, доцент Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Новіков В.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Овчарук В.Т.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

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

**Осадчук М.В.** – науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Павленко В.Д.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютеризованих систем управління Державного університету «Одеська політехніка»

**Павленко О.А.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Панасюк І.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

**Пеглінський І.І.** – бакалавр, студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Державного університету «Одеська політехніка»

**Пруський А.В.** – доктор технічних наук, доцент, начальник кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Рибіна О.І.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри геодезії та землеустрою Сумського національного аграрного університету

**Риков Г.Ю.** – старший викладач кафедри електричних машин та апаратів Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського

**Рощенко О.М.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Семичаєвський С.В.** – старший науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Середа В.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної та промислової теплотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Серт І.В.** – магістр, студент кафедри комп'ютерних технологій автоматизації Державного університету «Одеська політехніка»

**Сивобородько А.В.** – заступник начальника центру Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Сінчук О.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри автоматизованих електромеханічних систем в промисловості та транспорті Криворізького національного університету

**Скакун О.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Скоробагатько Т.М.** – кандидат технічних наук, т.в.о. заступника начальника кафедри профілактики пожеж та безпеки життєдіяльності населення Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Слуцька О.М.** – кандидат технічних наук, начальник сектору техногенної безпеки науково-дослідного центру цивільного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Сонг Шулі** – доцент, Школа економіки та управління, Хейлудзянський Бауі Аграрний Університет, Китай

**Старченко О.С.** – аспірант кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Степанець О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації теплоенергетичних процесів 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

**Сушин І.О.** – аспірант кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Татарченко О.Б.** – кандидат історичних наук, доцент, заступник завідувача кафедри філософії, політології та українознавства Херсонського національного технічного університету

**Тачиніна О.М.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

**Терлич С.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри суднобудування та ремонту суден Херсонської філії Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Тесленко О.І.** – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник відділу ефективності енерговикористання та оптимізації енергоспоживання Інституту загальної енергетики Національної академії наук України

**Тірон-Воробйова Н.Б.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Топчій Н.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Федоренко І.О.** – аспірант кафедри «Транспортних технологій» Національного транспортного університету

**Фісун М.Т.** – доктор технічних наук, професор кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Хабутдінов Р.А.** – доктор технічних наук, професор кафедри «Транспортних технологій» Національного транспортного університету

**Цибульська Т.П.** – аспірантка кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету

**Чайковський С.Ю.** – старший науковий співробітник випробувальної лабораторії Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Чепурний Д.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри геотехніки, підземних та гідротехнічних споруд Харківського національного університету будівництва та архітектури

**Черевик Ю.О.** – аспірантка кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

**Черноусенко О.Ю.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теплоенергетичних установок теплових та атомних електростанцій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Чернюк А.М.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри фізики, електротехніки та електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

**Шаманіна Т.В.** – вчитель математики, заступник директора Одеської спеціалізованої школи № 117

**Швець М.Ю.** – заступник начальника котлотурбінного цеху ТЕЦ6 СП «КИЇВСЬКІ ТЕЦ» КП «КИЇВТЕПЛОЕНЕРГО»

**Швець Н.О.** – магістрант кафедри теоретичної та промислової теплотехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шеремета М.М.** – доктор фізико-математичних наук, професор, завідувач кафедри теорії функції та теорії ймовірності Львівського національного університету

**Шорнікова С. В.** – начальник відділу Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Яворський О.В.** – бакалавр, студент кафедри «Комп'ютерні технології автоматизації» Державного університету «Одеська політехніка»

**Якіменко М.Л.** – науковий співробітник НВЦ Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту.

## НОТАТКИ

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 32 (71) № 3 2021**

Коректура • *Н. Пирог*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: [editor@tech.vernadskyjournals.in.ua](mailto:editor@tech.vernadskyjournals.in.ua)

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

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 28,29. Ум. друк. арк. 36,27. Зам. № 0721/254

Підписано до друку 10.06.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

Е-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.