

**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) № 4 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 № 1 від 14.09.2021 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

### ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

**Кірей К.О.**

ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ АКУСТИЧНОГО ВІДБИТКА  
ЩОДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕДІАКОНТЕНТУ.....1

### ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

**Панасюк І.В., Залюбовський М.Г.**

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ  
МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР (ЧАСТИНА 1: ВИЗНАЧЕННЯ  
ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ).....8

### КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

**Соков В.М.**

ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ СТІНКИ БАЛКИ ЗІ ЗЛАМОМ КРОМОК.....13

### ПРИЛАДИ

**Белашов Ю.О., Зозуля Б.М.**

ЗАЛЕЖНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ ВОГНЕВОГО ЗАВДАННЯ СНАЙПЕРОМ ВІД  
ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ПРИЦІЛУ.....24

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

ПИТАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ МУЛЬТИМЕТРА ЦИФРОВОГО ДЛЯ ПОТРЕБ  
ВИПРОБУВАЛЬНОГО ЦЕНТРУ (З ДОСВІДУ ПРАКТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ).....32

### РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

**Блаженний Н.В.**

ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ (КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ)  
НА ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ.....40

**Козюба М.М., Гребенюк А.М.**

ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЕЛЕКТРОННИХ ВИРОБІВ  
ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРСТАТА "PROTOMAT M60".....48

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

МЕТОД РОЗМІЩЕННЯ СЕНСОРІВ ЛІТАЮЧИМИ  
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ РОБОТАМИ ДИНАМІЧНИМИ ЧЕРГАМИ.....53

### ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

**Глухова Н.В.**

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНОГО СТАНУ РІДИНИ.....60

**Завгородній О.І., Левкін Д.А., Котко Я.М., Левкін А.В.**

ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙМОВІРНИХ  
РИЗИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ.....66

**Кандиба І.О.**

БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР КРАЩОГО СЦЕНАРІЮ  
ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ.....71

**Кишенько В.Д., Кучер А.Є., Крищенко Д.О., Білецький М.С.**

МЕТОДИ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ І ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ  
ПІД ЧАС ОЦІНКИ ПОВЕДІНКИ ПРОЦЕСІВ РЕКТИФІКАЦІЇ СПИРТУ.....78

**Козак Є.Б.**

ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИЩЕНОГО ІНТЕРФЕЙСУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ  
НА ОСНОВІ M-АРНОГО АЛГОРИТМУ «TREE-BASED ORAM».....84

<b>Коцун В.І.</b> НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ФІЗИКИ «МЕХАНІКА. ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ».....	90
<b>Кошель А.В.</b> МОДУЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ В УМОВАХ УПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ.....	96
<b>Макарова Л.М., Латанська Л.О., Пухалевич А.В., Приходько К.С.</b> НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ВИКОНАННЯ РОБІТ З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ AGILE.....	103
<b>Нікітенко Є.В., Омечинська Н.В., Медведєв М.Г., Гуйда О.Г., Юсипів Т.В.</b> ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА SMART-УНІВЕРСИТЕТУ.....	109
<b>Олещенко Л.М., Мовчан К.О., Замковий І.Т.</b> ПРОГРАМНИЙ МЕТОД ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ МЕРЕЖ SDN.....	116
<b>Петренко М.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЛЯ «ISBN» ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ОБРОБКИ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДАНИХ.....	122
<b>Петросян А.Р., Петросян Р.В., Підтиченко О.В.</b> ОПТИМІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА БАЗІ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ.....	129
<b>Петросян Р.В., Колос К.Р.</b> СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРА СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДНИКІВ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ.....	135
<b>Прачик В.В., Ляшенко О.М.</b> РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПРИРОДНИХ КАТАСТРОФ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ JAVA SE 11.....	142
<b>Сарнацький В.В., Баклан І.В.</b> ВПЛИВ СОЦІОДЕМОГРАФІЧНОЇ ГЕТЕРОГЕННОСТІ НА ОПТИМАЛЬНУ СТРАТЕГІЮ ВПРОВАДЖЕННЯ КАРАНТИННИХ ЗАХОДІВ.....	149
<b>Стаценко Д.В., Осипенко В.В., Злотенко Б.М., Кулік Т.І., Стаценко В.В.</b> СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ КІБЕРЗАГРОЗ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ТА МЕРЕЖАХ.....	156
<b>Ушкаренко О.О.</b> МЕТОД АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДАНИХ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ВУЗЛАХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ.....	162
<b>Shaptala R.V., Kyselov G.D.</b> VECTOR SPACE MODELS OF KYIV CITY PETITIONS.....	169

## **ЕНЕРГЕТИКА**

<b>Гламаздін П.М., Дяченко А.А.</b> ЗБАГАЧЕННЯ КИСНЕМ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ.....	178
--	-----

## **ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ**

<b>Гаврилова А.А., Суровицький С.В., Майзеліс А.О.</b> СПІВОСАДЖЕННЯ ЦИНКУ З НІКЕЛЕМ У ПРОФОСФАТНО-ЦИТРАТНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ.....	186
<b>Голуб Л.С., Левченко Є.П.</b> РОЗРОБКА ДОБАВОК БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ ОЛІЙНОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ.....	192
<b>Zabiiaka N.A., Kanunnikova N.A., Bukatenko N.O.</b> INFLUENCE OF KINETIC PARAMETERS ON HYDROGEN RELEASE BY INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-HALOGENIDE SOLUTION.....	199
<b>Миронюк О.В., Баклан Д.В.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ СТОХАСТИЧНИХ СУПЕРГІДРОФОБНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ.....	204

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

<b>Фролова Н.Е., Тищенко О.М., Губар Т.М., Когут Д.О., Овсяник А.Г.</b> РОЗШИРЕННЯ АСОРТИМЕНТУ СТРАВ ІЗ ПОЛІЗЕРНОВОЇ СУМІШІ ВЕГІТАРІАНСЬКОГО МЕНЮ ДЛЯ РЕСТОРАНІВ ТА АЮРВЕДИЧНИХ КАФЕ.....	210
---	-----

## ТРАНСПОРТ

<b>Волков Д.В.</b> ВПЛИВ ЗИМОВИХ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО РЕГІОНУ НА ОПІР РУХУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ.....	217
<b>Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Ліганенко В.В.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ Й ПАДІННЯ ТИСКУ ПРИ КИПІННІ ХОЛОДОАГЕНТІВ У ПЛАСКИХ ЗМІЙОВИКАХ.....	222
<b>Дакі О.А., Якусевич Ю.Г., Тришин В.В., Ліганенко В.В.</b> ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО КИПІННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ У ВИПАРНИКАХ.....	228
<b>Danylyan A.H., Tiron-Vorobiova N.B., Maslov I.Z., Kulahin E.O.</b> IDENTIFICATION OF OPTIMIZATION APPROACHES TO THE DEEP HEAT RECOVERY PROCESS OF MARINE DIESEL ENGINES.....	234
<b>Кужелович В.І., Мельніков С.М.</b> МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ УГРУПОВАНЬ ВІЙСЬК (СИЛ) ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ.....	241
<b>Ловська А.О., Фомін О.В., Рибін А.В., Лебідь Г.О.</b> ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НАПІВВАГОНА ІЗ ЗАМКНЕНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ, ЗАПОВНЕНОЮ НАПОВНЮВАЧЕМ.....	247
<b>Мельник О.М., Бичковський Ю.В.</b> УРАХУВАННЯ ФАКТОРА СТРЕСУ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ МОРЕПЛАВСТВА.....	252
<b>Урум Н.С., Федунів В.М., Бажак О.В.</b> МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ НА МОРІ.....	257
<b>Шевченко Ю.В., Акмалдінова В.Є., Волковська Г.Г.</b> ОЦІНКА ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ НА ТРАНСПОРТНУ ГАЛУЗЬ.....	262

## БУДІВНИЦТВО

<b>Азізов Т.Н., Срібняк Н.М., Циганенко Л.А.</b> ВИЗНАЧЕННЯ КРУТИЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА В НОРМАЛЬНІЙ ТРІЩИНІ.....	269
<b>Нікулін О.Ф., Добряк Д.О., Крикун О.М., Кравченко Н.В., Савченко О.В., Луценко Ю.В.</b> ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІКАРБОНАТУ АБО ІНШОГО ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ЛЕГКОСКИДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ У ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ.....	275

## ГЕОДЕЗІЯ

<b>Тимошевська Т.І.</b> ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ КАДАСТРОВИХ РОБІТ У НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ.....	283
--	-----

## ЕЛЕКТРОНІКА

<b>Осадчук О.В., Крилик Л.В., Звягін О.С., Осадчук Я.О.</b> МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ.....	289
--	-----

<b>ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....</b>	297
-----------------------------------	-----

## CONTENTS

### APPLIED GEOMETRY, ENGINEERING GRAPHICS AND ERGONOMICS

**Kirei K.O.**

PROBLEMS OF USING ACOUSTIC FINGERPRINT ON MEDIA CONTENT IDENTIFICATION.....1

### MACHINE SCIENCE

**Panasyuk I.V.**

ZALYUBOVSKIY M.G. EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL  
AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS IN A LOW TEMPERATURE  
ENVIRONMENT (PART 1: DETERMINATION OF THE BRITTLE TEMPERATURE).....8

### SHIPBUILDING

**Sokov V.M.**

ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF BEAM'S WEB WITH BREK OF EDGES.....13

### EQUIPMENT

**Bielashov Yu.O., Zozulya B.M.**

DEPENDENCE OF RESULTS OF PERFORMANCE  
OF FIRE TASK BY A SNIPER ON CHARACTERISTICS OF OPTICAL SCOPE.....24

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

THE QUESTION OF THE OPTIMAL CHOICE OF A DIGITAL MULTIMETER FOR THE NEEDS  
OF THE TEST CENTER (FROM PRACTICAL EXPERIENCE).....32

### RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

**Blazhennyi N.V.**

INFLUENCE OF SOLAR RADIATION (COSMIC RADIATION)  
ON OPTICAL COMMUNICATION LINE: SOURCES' REVIEW.....40

**Hrebenuk A.M., Kozyuba M.M.**

REDUCING FEATURES OF PROTOTYPING PRINTED CIRCUIT BOARDS  
OF ELECTRONIC PRODUCTS USING THE "PROTOMAT M60" MACHINE.....48

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

METHOD OF PLACEMENT OF SENSORS BY FLYING INFORMATION  
AND TELECOMMUNICATIONS WORKS BY DYNAMIC QUEUES.....53

### INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

**Glukhova N.V.**

INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE STUDY  
OF THE COHERENT STATE OF THE LIQUID.....60

**Zavgorodniy A.I., Levkin D.A., Kotko Ya.M., Levkin A.V.**

ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF PROBABILITY RISK FORECASTING  
OF TECHNOLOGICAL PROCESSES.....66

**Kandyba I.O.**

MULTI-CRITERIA SELECTION OF THE BEST SCENARIO FOR A UNIVERSITY ENTRANCE CAMPAIGN...71

**Kyshenko V.D., Kucher A.E., Kryshchenko D.O., Biletskiy M.S.**

METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS AND DETERMINATED CHAOS WHEN ESTIMATING  
THE BEHAVIOR OF ALCOHOL RECTIFICATION PROCESSES.....78

**Kozak Ye.B.**

ORGANIZATION OF A SECURE DATA TRANSMISSION INTERFACE BASED  
ON THE M-AR ALGORITHM "TREE-BASED ORAM".....84

<b>Kotsun V.I.</b> CURRICULUM FOR THE STUDY OF PHYSICS “MECHANICS. FUNDAMENTALS OF KINEMATICS”.....	90
<b>Koshel A.V.</b> MODULAR ELECTRONIC SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF INTRODUCTION OF INNOVATIVE MACHINE LEARNING.....	96
<b>Makarova L.M., Latanska L.O., Pukhalevych A.V., Prykhodko K.S.</b> NON-LINEAR REGRESSION MODEL FOR DURATION ESTIMATING EXECUTION OF WORKS FOR SOFTWARE DEVELOPMENT USING AGILE METHODOLOGY.....	103
<b>Nikitenko Ye.V., Ometsynska N.V., Medvedev M.H., Guida O.G., Yusypiv T.V.</b> SMART UNIVERSITY INFORMATION SYSTEM.....	109
<b>Oleshchenko L.M., Movchan K.O., Zamkovyi I.T.</b> SOFTWARE METHOD FOR TESTING AND ADMINISTRATION OF SDN NETWORKS.....	116
<b>Petrenko M.V.</b> RESEARCH OF FEATURES OF THE “ISBN” FIELD AND THEIR INFLUENCE ON USE IN THE PROCESSES OF BIBLIOGRAPHICAL DATA PROCESSING.....	122
<b>Petrosian A.R., Petrosian R.V., Pidtychenko O.V.</b> OPTIMIZATION OF THE PID CONTROLLER MODEL BASED ON A DIGITAL FILTER.....	129
<b>Petrosian R.V., Kolos K.R.</b> SYNTHESIS OF A DIGITAL FILTER OF SYMMETRIC COMPONENTS BASED ON A GENETIC ALGORITHM.....	135
<b>Prachyk V.V., Liashenko O.M.</b> DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING NATURAL DISASTERS USING OBJECT-ORIENTED METHODOLOGY AND JAVA SE 11 TECHNOLOGY.....	142
<b>Sarnatskyi V.V., Baklan I.V.</b> THE INFLUENCE OF SOCIODEMOGRAPHIC HETEROGENEITY ON THE OPTIMAL LOCKDOWN POLICY.....	149
<b>Statsenko D.V., Osypenko V.V., Zlotenko B.M., Kulik T.I., Statsenko V.V.</b> CURRENT CYBER THREATS TRENDS ANALYSIS IN COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS.....	156
<b>Ushkarenko O.O.</b> THE TECHNIQUE OF ANALYSIS OF DATA TRANSFORMATION PROCESSES IN COMPUTING UNITS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS.....	162
<b>Shaptala R.V., Kyselov G.D.</b> VECTOR SPACE MODELS OF KYIV CITY PETITIONS.....	169
 <b>POWER ENGINEERING</b>	
<b>Glamazdin P.M., Diachenko A.A.</b> OXYGEN ENRICHMENT OF BLOWING AIR OXYGEN TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF ENERGY STEAM GENERATORS.....	178
 <b>CHEMICAL TECHNOLOGY</b>	
<b>Havrylova A.A., Surovitskiy S.V., Maizelis A.O.</b> ZINC AND NICKEL CODEPOSITION IN PYROPHOSPHATE-CITRATE ELECTROLYTE.....	186
<b>Holub L.S., Levchenko Ye.P.</b> DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL ADDITIVES FOR POLYMERIC MATERIALS USING WASTES OF OIL PROCESSING INDUSTRY.....	192
<b>Zabiiaka N.A., Kanunnikova N.A., Bukatenko N.O.</b> INFLUENCE OF KINETIC PARAMETERS ON HYDROGEN RELEASE BY INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-HALOGENIDE SOLUTION.....	199
<b>Myronyuk O.V., Baklan D.V.</b> DETERMINATION OF STOCHASTIC SUPERHYDROPHOBIC STRUCTURES SURFACE ENERGY BASED ON CALCIUM CARBONATE.....	204

## TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

**Frolova N.E., Tishchenko O.M., Gubar T.M., Kohut D.O., Oatmeal A.G.**

EXPANSION OF ASSORTMENT OF DISHES OF POLYGRAIN MIXTURE OF VEGETARIAN MENU FOR RESTAURANTS AND AYURVEDIC CAFES..... 210

## TRANSPORT

**Volkov D.V.**

THE INFLUENCE OF WINTER CLIMATIC FACTORS OF THE EASTERN UKRAINIAN REGION ON THE RESISTANCE OF MOTION OF AUTOMOTIVE TRANSPORT..... 217

**Daki O.A., Yakusevich Yu.G., Trishin V.V., Liganenko V.V.**

RESEARCH OF METHODS OF CALCULATION OF HEAT RELEASE COEFFICIENTS AND PRESSURE DROPPING AT BOILING OF REFRIGERATORS IN FLAT COILS..... 222

**Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Liganenko V.V.**

INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF MARINE REFRIGERATING MACHINES BY IMPROVING THE PROCESSES OF IN-PIPE BOILING OF REFRIGERANT IN THE EVAPORATOR..... 228

**Danylyan A.H., Tiron-Vorobiova N.B., Maslov I.Z., Kulahin E.O.**

IDENTIFICATION OF OPTIMIZATION APPROACHES TO THE DEEP HEAT RECOVERY PROCESS OF MARINE DIESEL ENGINES..... 234

**Kuzhelovich V.I., Melnikov S.M.**

METHODOLOGY FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM OF RESTORATION OF AUTO-ARMORED TECHNIQUE OF GROUPING OF TROOPS (FORCES) OF THE NATIONAL GUARDS OF UKRAINE..... 241

**Lovska A.O., Fomin O.V., Rybin A.V., Lebid H.O.**

DETERMINATION OF DYNAMIC LOAD OF A WALKWAY WITH A CLOSED SPINE BEAM FILLED WITH FILLER..... 247

**Melnyk O.M., Bychkovskiy Yu.V.**

STRESS FACTOR IN THE SYSTEM OF THE SHIPPING SAFETY..... 252

**Urum N.S., Fedunov V.M., Bajak O.V.**

MODELS OF FORECASTING THE MOVEMENT OF SEARCH AND RESCUE OPERATIONS AT SEA... 257

**Shevchenko Yu.V., Akmaldinova V.Ye., Volkovska H.H.**

ASSESSMENT OF THE IMPACT OF DIGITAL MOBILE APPLICATIONS ON THE TRANSPORT INDUSTRY..... 262

## CONSTRUCTION

**Azizov T.N., Sribniak N.M., Tsyhanenko L.A.**

DETERMINATION OF THE TORSIONAL STIFFNESS OF A REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN A NORMAL CRACK..... 269

**Nikulin O.F., Dobriak D.O., Krikun O.M., Kravchenko N.V., Savchenko O.V., Lutsenko Yu.V.**

ABOUT USE OF POLYCARBONATE OR OTHER POLYMER MATERIAL AS LIGHT REMOVABLE CONSTRUCTIONS IN EXPLOSIVE INDUSTRIAL PREMISES..... 275

## GEODESY

**Tymoshevska T.I.**

APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES DURING THE PERFORMANCE OF CADASTRAL WORKS IN SETTLEMENTS..... 283

## ELECTRONICS

**Osadchuk A.V., Krylik L.V., Zviahin O.S., Osadchuk I.A.**

MATHEMATICAL MODEL OF A MICROELECTRONIC GENERATING MEAN FOR MEASURING HUMIDITY..... 289

**INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 297**



# ПРИКЛАДНА ГЕОМЕТРІЯ, ІНЖЕНЕРНА ГРАФІКА ТА ЕРГОНОМІКА

УДК 004.6

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/01>**Кірей К.О.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

## ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ АКУСТИЧНОГО ВІДБИТКА ЩОДО ІДЕНТИФІКАЦІЇ МЕДІАКОНТЕНТУ

У статті розглядається дослідження алгоритмів аудіофінгерпринтингу щодо розв'язку проблеми ідентифікації невідомого аудіо за допомогою відчинених і вільно доступних програмних компонентів, вебсервісів і баз медіаданих. Збільшення інформації, зокрема медіаінформації, приводить до потреби в пошуку нових і вдосконаленню наявних засобів ідентифікації медіаконтенту. Нині спостерігається розвиток відповідних технологій, проте проблема ідентифікації медіаконтенту, зокрема музичного контенту, ще не набула остаточного розв'язання. Для ідентифікації музичного контенту застосовується концепція акустичного фінгерпринту (акустичного відбитка). Надійний алгоритм акустичного відбитка має враховувати перцептивні характеристики аудіо, бути стійким до деградації якості аудіо (радіопереешкоди, артефакти, шуми тощо). Також він має брати до уваги особливості різних форматів кодування аудіо. Зокрема, це сімейство lossy-форматів, які вносять значні зміни до цифрового кодування звукового файлу для максимального зменшення його розміру, водночас без значного впливу на те, як закодовані звуки сприйматиме людина. Надалі автоматизація ідентифікації аудіо розвивається в напрямі автоматизації аналізу спектрограм, що показують інтенсивність деяких частот упродовж часу. З першої половини 2000-х років дослідники почали застосовувати до цих зображень техніку комп'ютерного бачення. У 2010 році словацький програміст Л. Лалинський, базуючись на численних академічних дослідженнях, почав розроблення нового алгоритму аудіофінгерпринтингу – Chromaprint. Ключовою відмінністю алгоритму стала подальша обробка спектрограми для визначення деяких музичних нот. Це дало змогу зберігати дані зі спектрограми більш компактно, а також зробити їх стійкішими до пошкоджень аудіосигналу, спричиненого lossy-кодеками. Отже, головна проблема індексації музичного контенту полягає в одержанні розумного балансу між якістю ідентифікації, швидкістю цього процесу й обсягом сгенерованої вихідної інформації. Ми вважаємо, що зараз найкраще себе показав алгоритм фінгерпринтингу Chromaprint, стійкий до зазначених проблем ідентифікації аудіо, який зберігає результуючі акустичні відбитки в компактному форматі, водночас підтримуючи високу швидкість індексації та пошуку.

**Ключові слова:** ідентифікація аудіо, формат аудіофайлу, спектрограма, хромаграма, алгоритми аудіофінгерпринтингу.

**Постановка проблеми.** Бурхливий розвиток технологій упродовж останніх двох століть призвів до того, що кількість інформації, доступної кожній людині зростає експоненційно. Від численних цифрованих копій книг, газет, журналів, кінофільмів, музичних та художніх творів, до створеного вже в цифровому форматі різноманітного контенту – до всього цього можна отримати доступ завдяки інтернет технологіям. Така загальнодоступність інформації дала змогу ще більше пришвидшити розвиток освіти та технологій, а також дати змогу невідомим раніше авторам здобути заслужену аудиторію, не обмежену

бажаннями та цілями наукових журналів, літературних видавництв чи музичних студій. І хоча беззаперечно, це є черговим кроком людства в напрямку суспільного розвитку, проте таке збільшення інформації спричиняє певні проблеми. Коли інформації забагато, знайти потрібну часто нетривіальна, а інколи й майже неможлива задача.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Інформаційні технології пошуку інформації, зокрема текстової, набули значного розвитку. Про це свідчить чимало праць вітчизняних і зарубіжних вчених у сфері інформаційних технологій (А. Бродера, Е. Большакової,

А. Вавіленкової, О. Іванова, Дж. Лакоффа, Д. Ланде, Д. Люгера, Д. Маккарти, А. Ньюелла, У. Питтса, Е. Попова, Д. Поспелова, Л. Шеченко, Дж. Гопкрофта та інших) [1–5]. Такі провідні IT-компанії, як Microsoft, Google, Amazon, Facebook та інші успішно використовують технології аналізу текстів із метою подальшої автоматизації процесів обробки даних. Зокрема, індексація гіпертексту займає значно менше обчислювальних ресурсів і місця в пам'яті ЕОМ ніж індексація інших типів інформації. Тому, наприклад, донедавна пошук додаткової інформації про медіафайли в Інтернеті, залежав від наявності пов'язаної з ними текстової інформації. Проте така інформація не завжди є доступною й це перетворює пошук метаданих цих медіафайлів у довгий і складний процес. Особливо пошук ускладнюється у випадку наявності достатньо великої медіатеки, де ручний пошук часто не є здійсненним. Отже, процес пошуку медіаконтенту потребує автоматизованого вирішення саме за вмістом аудіо. Розвиток систем штучного інтелекту, комп'ютерного бачення та слухання дав змогу машинам сприймати медіаінформацію схожим чином до того, як її сприймають люди. І, завдяки набагато кращим (та швидшим) здібностям до пошуку інформації, ніж у людей, комп'ютери, нарешті, можуть розв'язати проблему ідентифікації майже будь-якої інформації та пошуку її метаданих.

Дослідження засноване на працях видатних авторів в області розробки програмного забезпечення, таких як Х. Грегорі, Т. Калкер, Ю. Ке, Л. Лалінський, А. Лерч, А. Марк, Р. Суктханкар, Дж. Хайтсм, Д. Хойем, Т. Цай, Д. Чан та ін. [7; 8; 10; 11; 13–15]. Принцип роботи бази даних акустичних відбитків описано в роботах [11; 12].

**Постановка завдання.** Проте виявилось, що проблема ідентифікації медіаконтенту, зокрема, музичного контенту ще не набула остаточного вирішення. Отже, метою цієї статті є дослідження алгоритмів аудіофінгерпринтингу щодо розв'язання проблеми ідентифікації невідомого аудіо з допомогою відкритих та вільно доступних програмних компонентів, вебсервісів і баз медіаданих.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Акустичний фінгерпринт або акустичний відбиток (англ. Acoustic Fingerprint) – це представлення аудіосигналу у вигляді набору значень, що описують його фізичні властивості [6]. Практичне використання акустичного фінгерпринтингу полягає в ідентифікації пісень, мелодій чи певних звуків. Ідентифікація застосовується до аудіо з радіо трансляцій, CD-дисків, сервісів потокової пере-

дачі медіа чи мереж типу peer-to-peer. Метою ідентифікації аудіо може бути як моніторинг забезпечення збереження авторських прав, ліцензування чи інших схем монетизації, так і для особистого використання, наприклад, для визначення автора та назви невідомої композиції.

Надійний алгоритм акустичного відбитка має враховувати перцептивні характеристики аудіо [7, с. 7]. Тобто, якщо два звукових файли звучать однаково для людського вуха, їхні акустичні відбитки мають збігатись, навіть якщо їхні цифрові представлення є досить різними. Акустичні відбитки не є хеш-функціями, які мають бути чутливими до найменших змін вхідних даних. Вони дійсно схожі на людські відбитки пальців, для яких мінімальні зміни не є важливими. Відомо багато випадків, коли неякісний відбиток людського пальця був правильно зіставлений із відбитком у базі даних. Акустичні відбитки мають працювати схожим чином.

Найбільш часто використовуваними у сфері аудіофінгерпринтингу звуковими характеристиками є точки перетину нуля звуковою функцією, музичний темп, гармонічні ряди звуків, коефіцієнт тональності, частотний інтервал та пропусканна смуга аудіо [8]. Для визначення цих характеристик більшість інструментів користується спектрограмами. Спектрограма є представленням аудіочастоти в часі. Вона дає змогу ідентифікувати частотний вміст аудіо щодо часу, упродовж якого це аудіо триває, а також наскільки тихою чи гучною є кожна частота. Проте необроблені спектрограми не є дуже корисними для визначення акустичних відбитків. По-перше, вони містять багато інформації, яка не потрібна для аудіофінгерпринтингу. По-друге, вони не є стійкими до деградації якості аудіо [8]. На рис. 2 зображено той самий аудіо файл, що й на спектрограмі рис. 1, але зіграний у шумному середовищі.

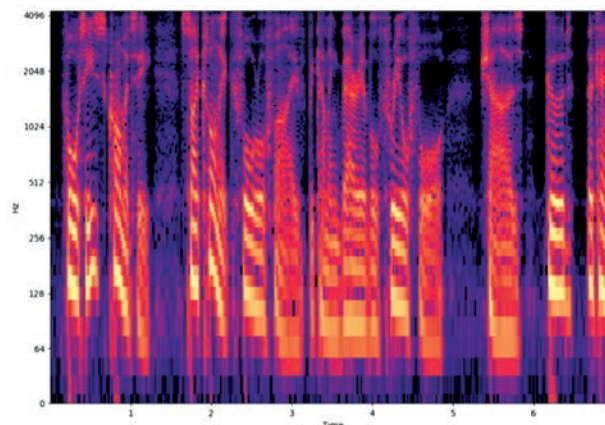


Рис. 1. Спектрограма аудіо

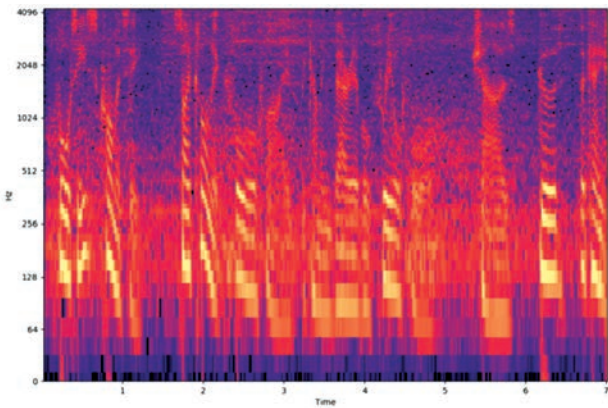


Рис. 2. Спектрограма з великою кількістю фонового шуму

Можна побачити, що фоновий шум призвів до появи зовсім іншої спектрограми. Незважаючи на це майже всі пікові рівні, аудіо залишилися легко пізнаваними. Тобто пікові рівні спектрограми є хорошим початком для генерації надійного акустичного відбитка.

Також, причиною змін спектрограми та, інколи, відчутних на слух змін звуку можуть стати формати кодування аудіо. Найпоширенішими форматами аудіофайлів є lossy-формати (MP3, AAC, Vorbis, Opus тощо). Ці формати вносять значні зміни до цифрового кодування звукового файлу для максимального зменшення його розміру, водночас без значного впливу на те, як закодовані звуки сприйматиме людина. Надійна система аудіофінгерпринтингу має ідентифікувати музичний запис, навіть після такого стиснення, якщо якість аудіо була сильно зменшена. Для використання в ідентифікації радіопередач, системи акустичного фінгерпринтингу має бути ще і стійкими до радіоперешкод та артефактів, спричинених аналоговою передачею.

Традиційно двовимірні репрезентації аудіочасот у часі, такі як спектрограми, сприймалися як зображення лише для цілей візуалізації. Але, починаючи з першої половини 2000-х років дослідники почали застосовувати техніки комп'ютерного бачення до цих зображень. Алгоритм генерації акустичних відбитків, розроблений компанією Shazam ([www.shazam.com](http://www.shazam.com)) був одним із перших [9]. Він використовує пошук пікових рівнів на спектрограмі, але водночас він об'єднує найближчі пікові точки, утворюючи своєрідну павутину із точок та ліній. Окрім того, що таке представлення займає набагато менше місця, утворена павутина з'єднань між піками надає системі додаткової стійкості щодо фонових шумів. Приблизно водночас, дослідницький відділ у сфері аудіо компанії Phillips запропонував інший алгоритм [10].

На відміну від алгоритму компанії Shazam, який вибірково запам'ятовує найважливіші частини спектрограми, алгоритм Phillips намагається якомога більше стиснути всю спектрограму. Це досягається завдяки збереженню лише змін частот у часі. Ключовою відмінністю цього алгоритму від попереднього є значно більша стійкість до різких спалахів фонового шуму, адже алгоритм зберігає всі дані, а не лише ті, що виділяються найбільше. Так само такий алгоритм має меншу стійкість до постійного фонового шуму.

У 2010 році словацький програміст Л. Лалинський, базуючись на численних академічних дослідженнях, почав розроблення нового алгоритму аудіофінгерпринтингу – Chromaprint [11]. Ключовою відмінністю алгоритму стала подальша обробка спектрограми для визначення музичних нот. Це дало змогу зберігати дані зі спектрограми більш компактно, а також зробити їх більш стійкими до пошкоджень аудіосигналу, викликаних lossy-кодеками. Оскільки алгоритм націлений на розпізнавання аудіофайлів, не потрібно вживати багатьох заходів для зменшення впливу фонових шумів як у алгоритмах, спрямованих на розпізнавання музики з навколишнього середовища. Натомість, алгоритм включає оптимізацію розміру відбитка, що дало змогу побудувати на його основі найбільшу відкриту базу даних акустичних відбитків – AcoustID [12]. База даних, на сьогодні, зберігає більше ніж 75 мільйонів акустичних відбитків і тисячі додаються туди щодня ([acoustid.org/stats](http://acoustid.org/stats)). Алгоритм Chromaprint є найширше використовуваним Open Source-алгоритмом акустичного фінгерпринтингу і є вільним для використання на умовах MIT-ліцензії.

Алгоритм Chromaprint базується на комп'ютерному баченні щодо ідентифікації музики, підґрунтя якого описано в роботі науковців Ян Ке, Д. Хойема й Р. Суктханкара [13]. З першого погляду, проблеми сфери аудіо мають небагато спільного з комп'ютерним баченням. Алгоритми, що працюють з аудіо, зазвичай займаються обробкою одновимірних сигналів у часі, тоді як комп'ютерне бачення найчастіше працює з інтерпретаціями одного чи більше двовимірних зображень (зазвичай знятих із тривимірної сцени). Науковці вважають, що певні проблеми у сфері аудіо легко трансформуються у форму, придатну для ефективної обробки з допомогою комп'ютерного бачення. Така думка підкріплюється тим, що науковці досить часто користуються двовимірними репрезентаціями аудіо в цілях візуалізації.

Коли люди розглядають аудіозапис, вони зазвичай дивляться на форму звукової хвилі. Таку форму показує більшість програм для роботи з аудіо, але вона не є дуже корисною для аналізу. Більш корисною репрезентацією є спектрограма, яка показує інтенсивність певних частот упродовж часу (рис. 3).

Таке зображення можна здобути розділивши оригінальне аудіо на багато кадрів, що частково перекривають один одного й застосувавши алгоритм перетворення Фур'є (а саме – віконне перетворення Фур'є). У випадку Chromaprint, віконне перетворення Фур'є виконується на вхідному аудіо, конвертованому в частоту дискретизації 11025 Гц із коефіцієнтом перекриття кадрів 2/3, кожен із яких має розмір 4096 байт.

Багато алгоритмів ідентифікації аудіо працюють із такою репрезентацією вхідного аудіо. Деякі порівнюють різниці частот упродовж часу, деякі виділяють пікові рівні в зображенні тощо. Зі свого боку Chromaprint обробляє інформацію перетворюючи частоти в музичні ноти. Алгоритм працює з нотами, а не з октавами, тому результат складається з 12 секцій, по одній для кожної ноти. Така інформація називається хромаграмою (англ. Chromagram, Chroma Features) [14]. Після незначного фільтрування та нормалізації зображення буде виглядати так (рис. 4).

Тепер ми маємо репрезентацію аудіо, що є стійкою до змін, викликаних lossy-кодеками чи іншими схожими процесами. До того ж, такі зображення можна досить легко порівнювати між собою для перевірки того наскільки вони схожі, тобто наскільки схоже звучить оригінальне аудіо. Але для зберігання таких результатів у базі даних, з можливістю їхнього швидкого пошуку необхідна більш компактна форма. Ідея методу, який дає змогу перетворити дані в таку форму спирається на комп'ютерне бачення щодо ідентифікації

музики з деякими модифікаціями, ґрунтованими на положеннях попарно прискореного акустичного відбитка [15]. Роботу результуючого алгоритму стиснення можна уявити як вікно розміром 16 на 12 пікселів, що переміщується по зображенню поступово, по пікселю за один раз. Цей процес генерує багато субзображень. До кожного з них застосовується визначений наперед набір з 16 фільтрів, що захоплює різниці інтенсивностей серед музичних нот у часі. Робота фільтрів полягає у визначенні суми специфічних частин субзображення, представлених у вигляді відтінків сірого (англ. Grayscale), і порівнянні двох отриманих сум.

Кожен фільтр має три коефіцієнти, асоційовані з ним, що показують як необхідно квантизувати дійсне число так, щоб у результаті здобути ціле число від 0 до 3. Фільтри й коефіцієнти можна обрати алгоритмом машинного навчання на основі тренувального набору аудіофайлів під час розроблення алгоритму.

Є шістнадцять фільтрів і кожен із них створює ціле число, яке може бути закодовано двома бітами (а допомогою коду Грея – системи кодування інформації, у якій два послідовні коди відрізняються значенням лише одного біта). Отже, скомбінувавши отримані результати на виході дістаємо 32-бітне ціле число. Якщо виконати вищеприказані дії для кожного субзображення, генерованого вікном 16x12, що рухається по зображенню, у результаті буде отримано повний акустичний відбиток вхідного аудіо.

Далі необхідно виконати порівняння отриманих відбитків. Тут найбільш влучним способом, на нашу думку, є порівняння на основі визначення коефіцієнту бітових помилок. Отже, для порівняння отриманих відбитків нами обрано два випадкових lossless-стиснутих аудіофайлів (у форматі FLAC). Композиції з файлу 1 і файлу 2 виконуються одним і тим же співаком і містяться

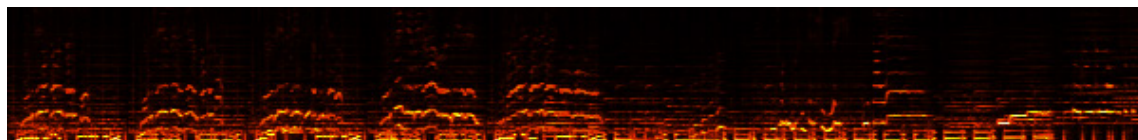


Рис. 3. Спектрограма інтенсивності частот

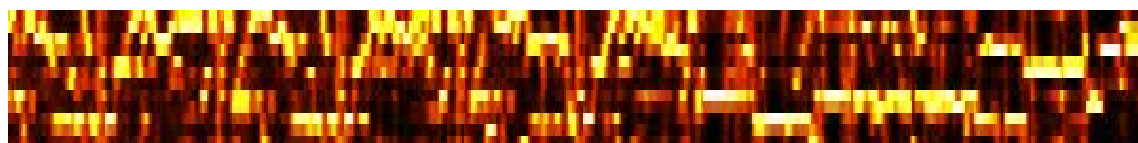


Рис. 4. Спектрограма аудіо після трансформацій, фільтрування та нормалізації

в одному альбомі, тобто мають схожий стиль. Потім їх конвертовано в сильно стиснутий lossy-формат (MP3 32 Кбіт/сек) та згенеровано відбитки для чотирьох отриманих файлів. Сгенеровані відбитки наведено на рис. 5–8.

Для демонстрації можливостей алгоритму Chromaprint, порівнюємо різницю відбитків оригінальних FLAC-файлів і стиснутих MP3-файлів (рис. 9-10).

Як бачимо, хоча різниця між FLAC та MP3 версіями є, вона не є значною. Тим паче, що неозброєним оком вона майже непомітна. Також нами виконано аналогічне порівняння між FLAC-

версіями файлу 1 та файлу 2. Кількість шуму у разі порівнянні акустичних відбитків двох різних аудіо файлів є набагато більшою, ніж під час порівняння двох версій одного й того ж файлу, де один із них стиснуто агресивним lossy-алгоритмом. З цього можна зробити висновок, що алгоритм Chromaprint є стійким до пошкоджень файлу, викликаних lossy-кодуванням та іншими схожими процесами.

Для глибшого аналізу можливостей алгоритму Chromaprint, ми порівняли оригінальну й інструментальну версію двох інших файлів, файлу 3 та файлу 4 (рис. 11, 12).



Рис. 5. Акустичний відбиток файлу 1 у lossless-форматі



Рис. 6. Акустичний відбиток файлу 1 у lossy-форматі



Рис. 7. Акустичний відбиток файлу 2 у lossless-форматі



Рис. 8. Акустичний відбиток файлу 2 у lossy-форматі



Рис. 9. Різниця відбитків lossless- та lossy-версій файлу 1

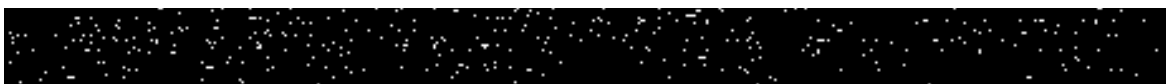


Рис. 10. Різниця відбитків lossless- та lossy-версій файлу 2



Рис. 11. Різниця між оригінальною та інструментальною версіями файлу 3



Рис. 12. Різниця між оригінальною та інструментальною версіями файлу 4

Як бачимо, різниця залежить від конкретної композиції й може бути як досить незначною, так і вельми помітною на рівні двох різних версій однієї й тієї ж композиції. Але, навіть незначна різниця між оригінальною та інструментальною версіями композиції є помітно більшою, ніж різниця між lossy та lossless кодуваннями однієї й тієї ж композиції.

**Висновки.** Проведенні дослідження дали змогу виявити проблеми ідентифікації аудіо, такі як різне виконання однієї й тієї ж композиції (музичні інструменти, співаки, місце виконання тощо), деградація якості аудіо (радіоперешкоди, артефакти, шуми та ін.), особливості кодування аудіо в різних форматах. Усе це значно ускладнює автоматизацію процесу ідентифікації аудіо, де

головна проблема полягає в одержанні розумного балансу між якістю ідентифікації, швидкістю цього процесу та обсягом сгенерованої вихідної інформації. Ми вважаємо, що зараз найкраще себе показав алгоритм фінгерпринтингу – Chromaprint, стійкий до зазначених проблем ідентифікації аудіо, який зберігає результуючі акустичні відбитки в компактному форматі, водночас підтримує високу швидкість індексації та пошуку. Це дає змогу створити велику базу даних акустичних відбитків силами однієї людини. Так, уся база даних акустичних відбитків AcoustID з відбитками та пов'язаними з ними даними про виконавців та назву композиції в стиснутому вигляді, займає менше одного гігабайта завдяки вищеприписаному алгоритму стиснення.

### Список літератури:

1. Вавіленкова А.І. Теоретичні основи аналізу електронних текстів : монографія. Київ : ТОВ «СІК ГРУП УКРАЇНА», 2016. 192 с.
2. Автоматическая обработка текстов на естественном языке и анализ данных : учебное пособие / Е.И. Большакова и др. Москва : НИУ ВШЭ, 2017. 269 с.
3. Иванов О.В. Класичний контент-аналіз та аналіз тексту: термінологічні та методологічні відмінності. *Вісник ХНУ ім. В.Н. Каразіна*. 2013. № 1045. Вип. 30. С. 69–74.
4. Шевченко Л.І., Дергач Д.В., Сизонов Д.Ю. Медіалінгвістика : словник термінів і понять / За ред. Л.І. Шевченко. Київ : ВПЦ Київський університет, 2014. 380 с.
5. Гопкрофт Дж. *Вікіпедія: вільна енциклопедія*. URL: [https://uk.wikipedia.org/wiki/Джон\\_Гопкрофт#Бібліографія](https://uk.wikipedia.org/wiki/Джон_Гопкрофт#Бібліографія) (дата звернення: 11.01.2021).
6. Acoustic fingerprint. *Wikipedia: The Free Encyclopedia*. 2020. URL: [https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic\\_fingerprint#cite\\_ref-1](https://en.wikipedia.org/wiki/Acoustic_fingerprint#cite_ref-1) (дата звернення: 11.01.2021).
7. Lerch A. An Introduction to Audio Content Analysis: Applications in Signal Processing and Music Informatics. The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2012. 248 p.
8. Audio Hashprints: Theory & Application. Electrical Engineering and Computer Sciences, University of California at Berkeley / T. Tsai. Tech. Report. UCB/EECS-2016-185, 1 Dec. 2016.
9. A. Li-Chun Wang. An Industrial-Strength Audio Search Algorithm. *Shazam Entertainment, Ltd.* 2003. URL: <https://www.ee.columbia.edu/~dpwe/papers/Wang03-shazam.pdf>. (дата звернення: 11.01.2021).
10. Haitsma J., Kalker T. A Highly Robust Audio Fingerprinting System. *Ismir*. 2002. Vol. 2002, Nov. P. 107–115.
11. Chromaprint 1.4 released. *Lukáš Lalinský*. URL: <https://oxygene.sk/> (дата звернення: 11.01.2021).
12. Welcome to AcoustID! *AcoustID: open source audio identification*. URL: <https://acoustid.org/> (дата звернення: 11.01.2021).
13. Ke Y., Hoiem D., Sukthankar R. Computer vision for music identification: Video demonstration. *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2005. P. 1184.
14. Mark A., Gregory H. AudioThumbnails of Popular Music Using Chroma-Based Representations. *IEEE Transactions On Multimedia*. 2005. Vol. 7. No. 1. P. 96–104.
15. Jang D., Yoo C., Lee S., Kim S., Kalker T. Pairwise Boosted Audio Fingerprint. *IEEE Transactions On Information Forensics And Security*. 2009. Vol. 4. No. 4. P. 995–1004.

### Kirei K.O. PROBLEMS OF USING ACOUSTIC FINGERPRINT ON MEDIA CONTENT IDENTIFICATION

*The article is considered the study of audio fingerprinting algorithms to solve the problem of identifying unknown audio using open and freely available software components, web services and media databases. The increase in information, in particular, media information leads to the need to find new and improve existing means of identifying media content. Today there is the development of appropriate technologies; however, the problem of identification of media content, including music content has not yet entered the final decision. The concept of acoustic fingerprint (acoustic imprint) is used to identify music content. A reliable acoustic imprint algorithm*

*must take into account the perceptual characteristics of audio, be resistant to degradation of audio quality (radio interference, artifacts, noise, etc.). It should also take into account the features of different audio encoding formats. In particular, it is a family of lossy codecs that make significant changes to the digital encoding of an audio file to minimize its size, without significantly affecting how the encoded sounds will be perceived by humans. Automation of audio identification is developing in the direction of automating the analysis of spectrograms showing the intensity of individual frequencies over time. Since the first half of the 2000s, researchers began to apply computer vision techniques to these images. In 2010, the Slovakian programmer L. Lalinski, based on numerous academic studies, began the development of a new audio fingerprinting algorithm, Chromaprint. The key difference of the algorithm was the further processing of the spectrogram to determine individual musical notes. This allowed the data from the spectrogram to be kept more compact, and also made more resistant to audio signal damage caused by lossy codecs. So the main problem of indexing music content is to achieve a reasonable balance between the quality of identification, the speed of this process and the amount of generated source information. We believe that Chromaprint, the fingerprinting algorithm, has proved to be the best tool. It is resistant to these audio identification problems and keeps the resulting acoustic prints in a compact format, while maintaining a high speed of indexing and search.*

**Key words:** *audio identification, audio file format, spectrogram, chromagram, fingerprinting algorithms.*

## ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 678.059

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/02>

**Панасюк І.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Залюбовський М.Г.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

### ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ У СЕРЕДОВИЩІ НИЗЬКИХ ТЕМПЕРАТУР (ЧАСТИНА 1: ВИЗНАЧЕННЯ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ)

*Значна частина формованих деталей різних галузей промисловості, в тому числі легкої промисловості, виробляється з еластичних полімерних матеріалів способом лиття. Після чого такі типи деталей потребують виконання трудомісткої фінішної галтувальної обробки, у ході виконання якої реалізується відділення відлитих деталей від їх ливників. Однак обробка деталей в ємкостях з різним характером руху (обертальні барабани, ємкості, котрі здійснюють планетарний або складний просторовий рух тощо) за допомогою ударного впливу за кімнатної температури неможлива через високу еластичність матеріалів. У разі зниження температури еластичність полімерів зменшується, а у разі досягнення температури крихкості вони поведуться як крихкі матеріали і руйнуються за величини відносної деформації менше 10%. Ударна дія на охолоджені деталі призводить до руйнування найменш міцних їх елементів – облоя, ливників. Охолодження деталей здійснюється різними способами: введенням у зону обробки холодоагенту у вигляді двоокису вуглецю (рідкого або твердого), рідкого азоту або шляхом охолодження камери з робочим середовищем за допомогою холодильної установки. Значні переваги має рідкий азот. Він забезпечує охолодження до температури  $-195,8^{\circ}\text{C}$ , подача його в зону обробки не являє складнощів, він нешкідливий для навколишнього середовища. Застосування рідкого азоту дозволяє скоротити час обробки, підвищити якість та одночасно знизити вартість обробки. Для можливості успішного застосування в легкій промисловості цього методу обробки деталей були проведені експериментальні дослідження крихкості найбільш часто використовуваних полімерних матеріалів, а також експериментальні дослідження визначення енергії удару, необхідної для руйнування облоя. Результати досліджень можуть бути використані на стадії проєктування відповідних технологічних процесів обробки полімерних деталей.*

**Ключові слова:** полімер, температура крихкості, рідкий азот, робоча ємкість.

**Постановка проблеми.** Відділення деталей від ливників у галтувальному обладнанні [1, с. 8–10] (галтувальні барабани, планетарно-відцентрові машини, машини зі складним просторовим рухом ємкостей тощо) реалізується за рахунок зіткнення рухомих деталей між собою, зі стінками ємкості та з частками наповнювача (якщо він використовується) [2, с. 19–22; 3 с. 48–54]. Така обробка ефективна, коли деталі виготовлені з крихких матеріалів, які легко руйнуються у разі ударної взаємодії.

Деталі, виготовлені з полімерних матеріалів, також можуть успішно оброблятися в галтувальному обладнанні за умови охолодження до стану

крихкого руйнування [4, с. 20–100]. Стан крихкого руйнування полімери досягають у разі охолодження до температури крихкості. Зниження до температури крихкості полімерів призводить до унеможливлення виникнення високоеластичних деформацій, полімер руйнується як крихке тіло за відносно незначної величини деформації ( $<10\%$ ) [5, с. 5–85].

Товщина та маса облоя, задирок, ливників незначні порівняно із самим виробом, тому у разі охолодження ці елементи найкраще промерзають та досягають крихкого стану за більш короткий проміжок часу ніж сам виріб і у разі подальшої механічної обробки в галтувальних барабанах



легко видаляються з поверхні деталей, не пошкоджуючи їх. Для успішного застосування цього методу обробки в легкій промисловості необхідно володіти інформацією щодо ряду фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів у середовищі низьких температур, зокрема знати: температуру крихкості матеріалу; енергію удару, необхідну для руйнування облоя; тривалість промерзання облоя і деталі до заданої температури.

**Постановка задачі.** Мета цієї роботи – експериментальне дослідження визначення температури крихкості та енергії руйнування еластичних полімерних матеріалів у середовищі низьких температур.

**Виклад основного матеріалу досліджень.**

**Визначення температури крихкості.** Дослідження проводили на експериментальній установці, кінематична схема якої представлена на рис. 1. Установка складається зі столу 1, на якому встановлено посудину Дьюара 2 з рідким азотом, механізм опускання зразка, що складається з опори, що містить направляючу втулку 3, штока 4 із затискачем. Шток підпружинений та утримується в піднятому стані фіксатором 5, з'єднаним з мікроривимикачем 6. На столі встановлено ударний механізм, який включає ударник 7 з бойком, корпус 8, ударну пружину 9, фіксатор 10 та електромагніт 11. Ударний механізм змонтований на столі за допомогою регульованої опори 12.

Під час проведення досліджень температуру в зоні охолодження виміряли за допомогою спеціально виготовлених термопар мідь-константан. Градування термопар виконували відомими методами [6, с. 58–225]. Вимірювання здійснювали мілівольтметром з цифровою індикацією.

Досліджували такі полімерні матеріали: гуму стироніп ОСТ 17-226-73; пористий поліуретан фірми “Hansman” (рідке формування); монолітний поліуретан “Avalon” фірми “Hansman” (рідке формування); термопластичний монолітний поліуретан “Elastolan” фірми “Elastogran” (BASF) (лиття під тиском); 50% -ву суміш первинного і вторинного поліетилену високого тиску ТУ 6-05-1853-78; поліамід вторинний ТУ 6-13-88.

Температуру крихкості зразків визначали за стандартною методикою [7, с. 5–270]. Розміри зразків: довжина –  $25 \pm 0,5$  мм, ширина –  $6,5 \pm 0,3$  мм, товщина –  $2 \pm 0,3$  мм. Для однієї серії дослідів відбирали 10–15 однакових зразків. Дослідження проводилися в такій послідовності: посудину Дьюара заповнювали рідким азотом, зразок закріплювався в затискачі установки так, щоб забезпечувалася його нерухомість, але не створювалася надмірна концентрація напружень

сильним стисненням. Потім він опускався в посудину з рідким азотом до рівня, на якому досягалася необхідна температура. Охолодження тривало 7 хвилин. При цьому коливання температури не перевищували  $\pm 1^\circ$  С. Регулювання температури досягалося шляхом переміщення вгору або вниз штока із закріпленим зразком і термопарою, яка реєструвала температуру в зоні охолодження. Через 7 хвилин зразок піднімався в крайнє верхнє положення, після чого по ньому виконувався механічний удар бойком. Якщо зразок зберігав цілісність, його заміняли та наступний досліджували аналогічним шляхом за температури на  $10^\circ$ С нижче за первинну. У разі руйнування зразка температуру підвищували приблизно на  $10^\circ$ С. Тим самим встановлювали інтервал температури крихкості. Потім визначали шукане значення температури, досліджуючи кожен раз нові зразки, послідовно зменшуючи на  $3^\circ$ – $5^\circ$ С інтервал температур. Температуру крихкості встановлювали з точністю  $\pm 1^\circ$ С. За температури, рівної температурі крихкості, досліджували ще два зразки. Результатом випробування вважали найвищу температуру, за якої обидва зразки ставали крихкими. Результати випробувань полімерних матеріалів з визначення температури крихкості представлені в таблиці 1.

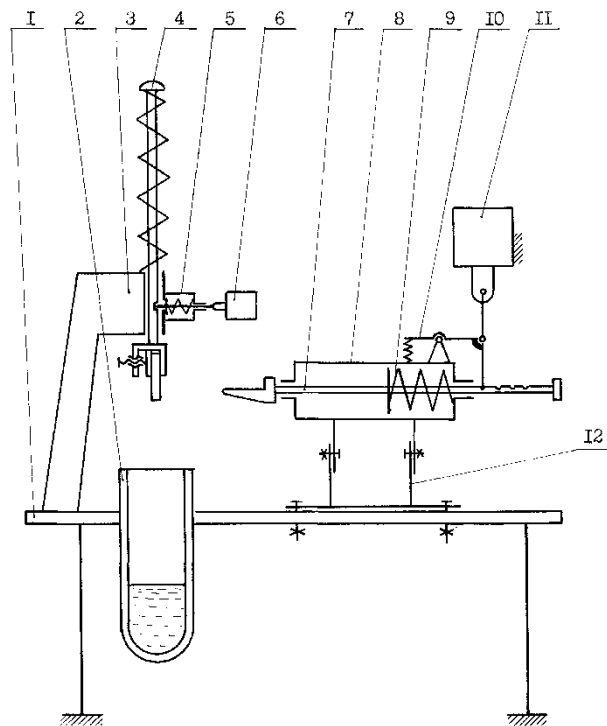


Рис. 1. Кінематична схема експериментальної установки для дослідження фізико-механічних властивостей полімерних матеріалів у середовищі низьких температур

Таблиця 1

**Результати випробувань полімерних матеріалів з визначення температури крихкості**

№	Матеріал	Тем-ра кр-сті, °
1	Гума стироніп ОСТ 17-226-73	-110
2	Пористий поліуретан (рідке формування)	-55
3	Монолітний поліуретан (рідке формування)	-105
4	Термопластичний монолітний поліуретан (лиття під тиском)	-105
5	50%-ва суміш первинного і вторинного поліетилену високого тиску ТУ 6-05-1853-78	-113
6	Поліамід вторинний ТУ 6-13-3-88	-43

**Визначення енергії руйнування.** Для виявлення енергії руйнування заморожених зразків було проведено калібрування ударного механізму установки. Пружина ударного механізму мала 14 положень у зведеному (стисненому) стані, які відповідають різним енергіям руйнування. Деформація могла змінюватися в діапазоні  $X_{np} = (1...14) \cdot 10^{-2}$  м з інтервалом в  $1 \cdot 10^{-2}$  м. Енергію деформованої пружини розраховували за допомогою виразу:

$$E = \int_{X_0}^{X_k} k_{np} X dX, \quad (1)$$

де  $k_{np}$  – жорсткість пружини;  $X$  – величина деформації пружини.

Величина деформації пружини у зведеному стані:

$$X_k = X_0 + X_{np}, \quad (2)$$

де  $X_{np}$  – величина деформації у разі зведення пружини;  $X_0 = 15 \cdot 10^{-3}$  м – величина попередньої деформації пружини.

Енергія деформованої пружини ударного механізму змінювалася в межах  $E_{np} = 0,04 \dots 2,3$  Дж. Швидкість деформації пружини визначається за формулою [8, с. 250]:

$$V_n = \sqrt{\frac{2E_{np}}{m_0}} \quad (3)$$

де  $m_0 = 0,237$  кг – маса бойка.

Калібрувальні параметри ударного механізму експериментальної установки представлені в таблиці 2.

Випробування проводили зі зразками різної товщини. Були підготовлені пластинки (з усіх досліджуваних матеріалів) таких геометричних розмірів: товщина  $\delta_{00} = (1; 2; 3; 5) \cdot 10^{-3}$  м, ширина  $b_{00} = 4 \cdot 10^{-3}$  м.

Для різних зразків у процесі експерименту було визначено енергію їх руйнування у разі охолодження до температури крихкості за мінімальної деформації ударної пружини, достатньої для руйнування зразка.

Таблиця 2

**Калібрувальні параметри ударного механізму експериментальної установки**

$X_{np} 10^2$ м	$X_k 10^2$ м	$E_{np2}$ Дж	$V_{n2}$ м/с
1	2,5	0,038	0,5
2	3,5	0,095	0,90
3	4,5	0,171	1,20
4	5,5	0,266	1,50
5	6,5	0,380	1,79
6	7,5	0,513	2,08
7	8,5	0,665	2,37
8	9,5	0,836	2,66
9	10,5	1,026	2,94
10	11,5	1,235	3,23
11	12,5	1,436	3,51
12	13,5	1,710	3,80
13	14,5	1,976	4,08
14	15,5	2,26	4,36

Випробування проводилися таким чином: зразок закріплювали в затискачі установки, забезпечуючи його нерухомість, але не створюючи надмірної концентрації напружень сильним стисненням. Потім його опускали в посудину з рідким азотом до досягнення температури, що відповідає температурі крихкості матеріалу зразка. Охолоджували упродовж 7 хвилин. При цьому коливання температури не перевищували  $\pm 1^\circ\text{C}$ . Ударний механізм зводився до середнього положення. Регулювання температури охолодження досягалося переміщенням штока вгору або вниз. Після закінчення 7 хвилин зразок піднімали в крайнє верхнє положення, спрацьовував ударний механізм, здійснюючи удар по зразках. Якщо зразок зберігав цілісність, його заміняли на наступний і випробування повторювали, збільшивши стиснення ударної пружини. Таким чином, визначали мінімальний ступінь стиснення ударної пружини, за якого енергії було досить для руйнування зразка. Результатом випробувань вважали найменше значення стиснення ударної пружини, за якого відбувалося руйнування зразка.

Розкид механічних властивостей зразків полімерів виявився досить значний (наприклад, для зразків поліаміду товщиною  $1,0 \cdot 10^{-3}$  м енергія руйнування коливалася в межах  $0,84 \dots 1,24$  Дж, для зразків поліетилену товщиною  $2 \cdot 10^{-3}$  м –  $0,50 \dots 0,84$  Дж), тому була проведена статистична

обробка та апроксимація отриманих результатів досліджень. Залежність енергії руйнування зразків від їх товщини для різних полімерних матеріалів описується такими емпіричними рівняннями:

– поліамід вторинний:

$$E_{np} = 78,75 \delta_{об}; \quad (4)$$

– термопластичний монолітний поліуретан (лиття під тиском):

$$E_{np} = 56,19 \delta_{об}; \quad (5)$$

– монолітний поліуретан (рідке формування):

$$E_{np} = 46,15 \delta_{об}; \quad (6)$$

– суміш первинного і вторинного поліетилену високого тиску:

$$E_{np} = 35,92 \delta_{об}; \quad (7)$$

– пористий поліуретан (рідке формування):

$$E_{np} = 17,12 \delta_{об}; \quad (8)$$

– гума «стироніп»:

$$E_{np} = 15,42 \delta_{об}. \quad (9)$$

У результаті побудовані графічні залежності енергії руйнування зразків від їх товщини для різних полімерних матеріалів (рис. 2). На рис. 2: 1 – поліамід вторинний; 2 – термопластичний монолітний поліуретан (лиття під тиском); 3 – монолітний поліуретан (рідке формування); 4 – суміш первинного і вторинного поліетилену високого тиску; 5 – пористий поліуретан (рідке формування); 6 – гума «стироніп».

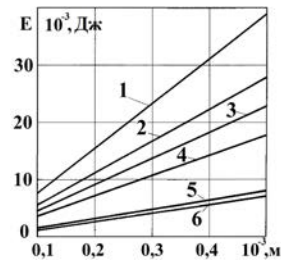


Рис. 2. Залежність енергії руйнування  $E_{np}$  полімерних матеріалів від їх товщини  $\delta_{об}$

Таким чином, отримані дані будуть корисні для виконання оздоблювально-зачисної обробки у середовищі низьких температур деталей, відформованих з полімерів, які широко застосовуються у легкій промисловості.

**Висновки.** Експериментально визначена температура крихкості досліджуваних матеріалів легкої промисловості (гума «стироніп», пористий та монолітний поліуретани, поліетилен високого тиску, вторинний поліамід). Температура крихкості перебуває в діапазоні  $-43$ — $113^{\circ}\text{C}$  та визначає температурний режим обробки деталей, виготовлених з цих полімерних матеріалів.

Доведено, що енергія ударної дії на облой, що забезпечує його видалення, повинна бути в межах  $5 \cdot 10^{-3}$ – $39 \cdot 10^{-3}$  Дж і залежить від матеріалу та товщини ділянок, які підлягають видаленню.

Визначено час охолодження деталей до повного промерзання облой, який становить 1...1,5 хв.

#### Список літератури:

1. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Перспективні технології обробки деталей і змішування сипких речовин у рухомих робочих ємкостях (частина 2: типи обладнання з рухомими ємкостями). *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2020. № 3, том 31 (70). С. 7–13.
2. Залюбовський М.Г., Панасюк І.В., Малишев В.В. Експериментальне визначення енергії, необхідної для відділення металевих деталей від ливників. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 5 (138). С. 17–26.
3. 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.
4. Копин В.А., Макаров В.Л., Ростовцев А.М. *Обработка изделий из пластмасс*. Москва: Химия, 1988. 176 с.
5. Бурмістенков О.П. *Виробництво литих деталей та виробів з полімерних матеріалів у взуттєвій та шкіргалантерейній промисловості*. Хмельницький: ХНУ, 2007. 255 с.
6. Орлова М.П., Погорелова О.Ф., Улыбин С.А. *Низкотемпературная термометрия*. Москва: Энергоатомиздат, 1987. 280 с.
7. Тернер С. *Механические испытания пластмасс*. Москва: Машиностроение, 1979. 278 с.
8. Пономарев С.Д., Андреева Л.Е. *Расчет упругих элементов машин и приборов*. Москва: Машиностроение, 1980. 326 с.

#### **Panasyuk I.V., Zalyubovskiy M.G. EXPERIMENTAL STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF POLYMER MATERIALS IN A LOW TEMPERATURE ENVIRONMENT (PART 1: DETERMINATION OF THE BRITTLE TEMPERATURE)**

*A significant part of the molded parts of various industries, including light industry, are made from elastic polymer materials by casting. In the future, these types of parts need to perform labor-intensive finishing*

tumbling, during the execution of which the separation of the cast parts from their sprues is realized. The processing of parts in containers with different patterns of motion (rotary drums, containers performing planetary or complex spatial motion, and others) using impact action at room temperature is impossible due to the high elasticity of materials. With a decrease in temperature, the elasticity of polymers decreases, and when the brittleness temperature is reached, they behave like brittle materials and are destroyed at a relative deformation of less than 10%. Impact on cooled parts leads to the destruction of their least durable elements – flash, sprues. Parts are cooled in various ways: by introducing a refrigerant into the treatment zone in the form of carbon dioxide (liquid or solid), liquid nitrogen, or by cooling the chamber with the working medium using a refrigeration unit. Liquid nitrogen has significant advantages. It provides cooling down to a temperature of  $-195.8^{\circ}\text{C}$ , its supply to the processing zone is not difficult, it is harmless to the environment. The use of liquid nitrogen allows for shorter processing times, higher quality and lower processing costs. For the possibility of successful application in light industry of this method of processing parts, experimental studies of the fragility of the most commonly used polymeric materials were carried out, as well as experimental studies of determining the impact energy required to destroy the flash. The research results can be used at the design stage of the corresponding technological processes for processing polymer parts.

**Key words:** polymer, brittleness temperature, liquid nitrogen, working capacity.

# КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 629.5:624.04

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/03>

Соков В.М.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНЕ ДЕФОРМУВАННЯ СТІНКИ БАЛКИ ЗІ ЗЛАМОМ КРОМОК

Наведено методику визначення інтенсивності пружно-пластичних та пластичних деформацій в осередку концентрації напружень типової суднової балки зі зломом стінки/осі/кромки залежно від її геометричних параметрів та величини прикладеного зовнішнього навантаження. Матеріал балки прийнято ідеально пружно-пластичним. Балка складається з двох призматичних частин різних висот, що поєднані плавним переходом із похилою прямолінійною кромкою від меншої висоти стінки до більшої. Вільний фланець, що може кріпитися до ламаної кромки, відсутній. Максимальне навантаження, прикладене до торця балки меншої стінки, становило 0,9 від границі плинності. Напружено-деформований стан аналізувався методом скінченних елементів (МСЕ) з використанням теорії пластичної течії. Доведено необхідність використання об'ємної задачі для розрахунку пластики. Обрана товщина балки при проведенні серійних досліджень забезпечує реалізацію переважно плоского напруженого стану відносно розмірів пластичної зони. Плоска деформація практично не реалізується. Додатково проведено аналіз розвитку пластичних зон залежно від зростаючого зовнішнього навантаження та геометричних параметрів балки. Наведено контури пластичних зон та ліній рівня інтенсивності деформацій для обраних варіантів. На основі даних величин пружно-пластичних деформацій було проведено аналіз формули Нейбера в залежності від геометричних параметрів балки і величини навантаження. Було доведено, що для випадків, коли навантаження не перевищує 0,6 від границі плинності, формула Нейбера дає задовільні безпечні результати і не потребує коригування. Це дає змогу застосувати відомі методику розрахунку втомної міцності (наприклад S-N кривих) і механіки руйнування до досліджуваної балки в концентраторі, де неявно задіяна класична формула Нейбера. Запропоновані методику визначення пружно-пластичних та пластичних деформацій можуть бути застосовані в методах розрахунку мало- та середньо-циклової втоми та механіки руйнування, де явно задіяні значення цих деформацій.

**Ключові слова:** пластика, пружно-пластичне деформування, балка зі зломом стінки/осі/кромки, пластичні зони, ідеально-пластичне тіло, формула Нейбера.

**Постановка проблеми.** У суднокорпусних конструкціях має місце балка зі зломом кромки/осі/стінки (рис. 1), яка нижньою прямолінійною кромкою приєднана до обшивки, а верхня ламана кромка є вільною.

Такі балки зазнають осьових навантажень  $p_1$ , викликаних загальним згином корпусу судна, і згинальних навантажень  $p_2$ , викликаних місцевим згином перекриття. До верхньої ламаної кромки може кріпитися вільний фланець. В рамках даного дослідження вільний фланець відсутній. Нині не існує систематичних методик для оцінки міцності балок зі зломом кромки (рис. 1) і відповідно рекомендацій щодо їх проектування. Тому для оцінки міцності подібних балок доводиться кожен раз використовувати програмні комплекси. Це призводить до збільшення трудомісткості про-

ектування суднокорпусних конструкцій та судна загалом на початкових етапах. Балки такого типу можуть працювати як в умовах пружного, так і в умовах пружно-пластичного деформування, коли в осередку концентрації напружень  $\sigma$  (рис. 1)

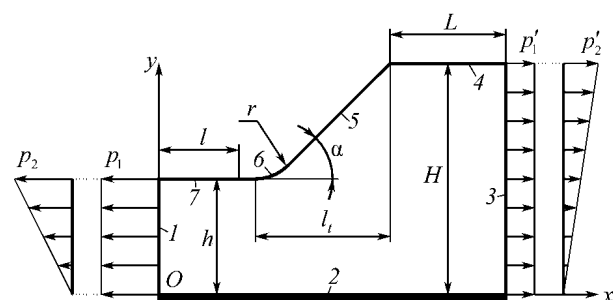


Рис. 1. Загальний вигляд балки зі зломом кромки

виникають пружно-пластичні деформації. Під час роботи в пружно-пластичному режимі конструкція більш вичерпно несе свою несучу здатність. Необхідно дослідити саме пружно-пластичне деформування стінки балки зі зломом кромки в осередку концентрації  $\sigma$  (рис. 1), щоб мати змогу більш якісно прогнозувати втомну міцність, розвиток тріщин, механізм і характер руйнування в цьому концентраторі. Надалі будемо найменувати балку на рис. 1 «балкою-стінкою».

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботах [1, 2] було досліджено НДС балок-стінок при відповідно розтяганні-стисканні і згині та запропоновано залежності для визначення коефіцієнтів концентрації напружень в залежності від геометричних параметрів.

Величина пружно-пластичних та пластичних деформацій і характеристики пластичних зон необхідні для оцінки втомної міцності, прогнозування розвитку тріщин тощо. Особливості і деталі пластичної плинності/течії в концентраторі визначають умови перетворення його в тріщину і закони її подальшого розвитку. Тому дуже важливо мати правильне представлення про форму і розміри пластичної зони, про інтенсивності деформацій і напружень в ній і про еволюції цих величин в процесі росту зовнішнього навантаження і розповсюдження тріщини. Дослідження пластичних зон необхідно для розуміння умов, що супроводжують початок росту тріщин і правильного розсуду про критеріальні характеристики матеріалу [3, 4, 5].

У публікації [6] було досліджено пружний та пружно-пластичний НДС пластини в концентраторі напружень аналітичними методами. Перевірки аналітичних рішень проведені МСЕ з використанням програмного комплексу ANSYS показали високу відповідність результатів. Проте аналітичні підходи, що були реалізовані в [6], не можна застосувати до досліджуваної балки-стінки.

Цікавою роботою є [7], де досліджено початковий розвиток тріщин у рамках механіки пружно-пластичного руйнування (МППР). У цій роботі поєднано деформаційні критерії втомної міцності і механіку пружно-пластичного руйнування, де широко задіяні пружно-пластичні та пластичні деформації; показана залежність розмірів тріщини від величини деформацій. В [7] можливість застосування методу отриманого в рамках МППР була доведена так званним методом нерозповсюдження тріщини.

Для оцінки втомної міцності задіяні також накоплені пластичні деформації. Розвиток тріщини в умовах малоциклової втоми досліджу-

ється в роботах [8, 9], де приділено увагу врахуванню накоплених пластичних деформацій. В цих роботах проведено експериментальні дослідження зразків, проведено аналіз і представлено залежності зокрема накопленої пластичної деформації та інших параметрів тріщини в залежності від кількості циклів. Ці дані можуть бути дуже корисними для подальших досліджень.

Метою огляду робіт [7, 8, 9] є не критика методів, що там використовуються, а доведення необхідності самостійного визначення величини пружно-пластичних та пластичних деформацій в залежності від параметрів конструкцій для подальшого їх використання в рамках теорії втомної міцності, руйнування тощо. Це аналогічно визначенню геометричних характеристик поперечних перерізів, які можна визначати незалежно від розрахунку міцності самих стержнів.

Цікавим є підхід для наближеного визначення параметрів пластичних зон представлено в монографії [10], заснованого на методі Зарка. А в [11] запропоновано напіваналітичний метод для визначення параметрів пластичних зон. Запропоновані в [10, 11] методи та підходи для пластичних зон дозволяють проводити відносно прості розрахунки з отриманням задовільних результатів в безпечну сторону без застосування теорії плинності. Проте ці методи можна використовувати лише для випадку простого (або наближеного до простого) навантаження для відносно простих типів геометрії. Для випадків складного навантаження і/або складної геометрії точність передбачити не можна. Це доводить необхідність все таки проведення більш точних розрахунків пластики для типових конструкцій.

Для оцінки пружно-пластичних деформацій в інженерних розрахунках широко застосовуються ті чи інші формули, що пов'язують пружні та пружно-пластичні параметри в осередку концентрації напружень. Серед цих залежностей найбільш простою і відносно точною є формула Нейбера (див. наприклад [12]), що зумовило її широке застосування в інженерній практиці. Проте ця формула може давати незадовільні результати, що відзначено в багатьох публікаціях. Пропонуються покращення цієї формули.

Паралельно ведуться спроби розроблення більш точних залежностей для оцінки пружно-пластичних деформацій. Серед помітних робіт стосовно цього питання слід відзначити [12, 13].

У публікації [12] представлено так звану узагальнену криву відгуку концентратора, по якій можна визначати пружно-пластичні деформації.

Ця крива залежить від кривої деформування матеріалу та від параметрів геометрії концентратора. Визначена один раз, ця крива дозволяє визначати пружно-пластичні деформації залежно від величини прикладеного навантаження. Метод розроблений тільки для двовимірних задач. Перевірки проведені чисельними методами показали доволі прийнятні результати.

Прості залежності для оцінки пружно-пластичних деформацій представлено в [13], які було отримано на базі локальних ефектів, послаблення робочого перерізу і еталонних напружень. Цей метод враховує зміцнення і може застосовуватися як для двовимірних так і для тривимірних задач. Чисельні розрахунки показали задовільні результати для запропонованого методу.

Проте запропоновані в [12, 13] методи все-таки отримані на основі спрощених гіпотез, які не враховують ті чи інші фактори. А тому визначені деформації можуть відрізнятися від істинних, що призводить до того, що для певного типу конструкцій для обраних варіантів геометрії доводиться проводити перевірки, використовуючи чисельні методи розрахунку пластики.

Короткий огляд літератури показав, що в критеріях втомної міцності і руйнування таким чи іншим чином задіяні параметри пластичних зон концентратора: пружно-пластичні, пластичні деформації та напруження і їх приведені значення; розміри і площа пластичних зон; рідше переміщення в околі концентратора тощо. Невирішеною проблемою є відсутність залежностей для визначення вищевказаних параметрів пластичних зон в залежності від параметрів балки-стілки (рис. 1), щоб надалі мати можливість проводити розрахунки її втомної міцності та руйнування.

**Постановка завдання.** Метою даного дослідження є розробка залежностей для визначення інтенсивності пружно-пластичних і пластичних деформацій в осередку концентрації напружень балки-стілки в залежності від її геометричних параметрів та величини прикладеного зовнішнього навантаження для ідеального пружно-пластичного тіла; короткий аналіз пластичних зон; аналіз формули Нейбера для балки-стілки.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) обґрунтувати розрахункову схему та методику проведення досліджень;

2) для кожного з варіантів балки-стілки визначити мінімальні навантаження, при яких починається пластичне деформування в осередку концентрації напружень;

3) для кожного з варіантів балки-стілки встановити залежність пружно-пластичної та пластичної інтенсивності деформацій в осередку концентрації напружень залежно від зростаючого зовнішнього навантаження.

4) використовуючи дані про величини пружно-пластичних деформацій в залежності від параметрів, провести аналіз формули Нейбера.

Характеристики руйнування розглядатися не будуть.

**Методи, об'єкт та предмет дослідження.** *Методом* дослідження є МСЕ, розроблений автором на мові програмування C++ для вирішення пружної та пружно-пластичної задачі. Пружно-пластична задача вирішувалася з використанням теорії пластичної плинності. Для серійних розрахунків пружно-пластичної задачі використовувалися об'ємні скінченні елементи (СЕ), що представляють собою тетраедри з 10 вузлами. *Об'єктом* дослідження є концентратор напружень б балки-стілки (рис. 1). *Предметом* дослідження є пружно-пластичні, пластичні деформації і характеристики пластичних зон в околі цього концентратора.

**Теоретичні коефіцієнти концентрації напружень балки-стілки.** Окрім залежностей теоретичних коефіцієнтів концентрації напружень, наведених в [1, 2], пропонуються додаткові залежності для їх визначення в більш вузьких діапазонах геометричних параметрів в рамках цієї роботи.

Для визначення теоретичного коефіцієнту концентрації  $k_1$  при пружному розтягненні-стисненні для типового осередку б (рис. 1) при широкому варіюванні геометричних параметрів пропонується формула [1]

$$k_1 = 1 + 0,55 \operatorname{th} \left( 1,7 \frac{H}{h} - 1,2 \right) \left( \frac{r}{h} \right)^\gamma \operatorname{th} \left( 0,06\alpha \operatorname{cth} \left( 1,2 \frac{H}{h} - 0,5 \right) \left( \frac{r}{h} \right)^\beta \right); \quad (1)$$

$$\gamma = 0,16 \left( \frac{H}{h} \right)^{-1} - 0,7; \quad \beta = 0,04 \frac{H}{h} + 0,25; \quad \alpha^\circ,$$

де кут зламу  $\alpha$  в цій та інших формулах для коефіцієнтів концентрації виражено в градусах.

Формула (1) дозволяє обчислити величину  $k_1$  з відхиленням, що не перевищує  $\pm 5\%$  при  $1,2 \leq H/h \leq 3$ ;  $0,05 \leq r/h \leq 1$ ;  $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  відносно результатів, отриманих по МСЕ.

Також були отримані інші, менш точні формули. Одна з них має вигляд

$$k_1 = 1 + 0,55 \operatorname{th} \left( 0,06\alpha \right) \operatorname{th} \left[ \frac{0,65 \left( H/h \right)^2}{\operatorname{th} \left( 0,01\alpha^{1,5} \right)} \right] \left( \frac{r}{h} \right)^\omega; \quad (2)$$

$$\omega = \frac{0,003\alpha - 0,05}{H/h} - 0,18 \ln \alpha + 0,12; \quad \alpha^\circ,$$

Формула (2) дозволяє обчислити величину  $k_1$  з похибкою  $\pm 10\%$  при  $1,1 \leq H/h \leq 3$ ;  $0,05 \leq r/h \leq 1$ ;  $5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  відносно даних, отриманих по МСЕ.

Інша формула має вигляд

$$k_1 = 1 + \frac{0,36 \operatorname{th} \left[ \left( \frac{40}{\alpha} + 0,8 \right) \frac{H}{h} - 1 \right]}{(r/h) + 7\alpha^{-1,1}} + 0,22 \operatorname{th} (0,05\alpha); \quad \alpha^\circ, \quad (3)$$

Формула (3) визначає значення  $k_1$  при  $1,2 \leq H/h \leq 3; 0,05 \leq r/h \leq 1$  та

$5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  з похибкою не більше  $\pm 10\%$  відносно розрахункових даних по МСЕ.

Для більш вузького діапазону кутів зламу  $\alpha$  рекомендується більш проста наближена формула розрахунку коефіцієнту концентрації  $k_1$  в осередку

$$k_1 = 1 + 0,19 \frac{r}{h} + \alpha \left( 0,01 - 0,018 \ln \left( \frac{r}{h} \right) \right); \quad \alpha^\circ. \quad (4)$$

Формула (4) визначає значення  $k_1$  при  $1,1 \leq H/h \leq 3; 0,05 \leq r/h \leq 1; 5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$  з похибкою не більш ніж  $\pm 5\%$ .

Найбільш точна універсальна формула для визначення величини теоретичного коефіцієнту концентрації  $k_2$  при пружному згині має вигляд [2]

$$k_2 = 1 + 0,32 \operatorname{th} \left( 1,8 \frac{H}{h} - 1,2 \right) \left( \frac{r}{h} \right)^\gamma \operatorname{th} \left( 0,055\alpha \operatorname{cth} \left( \frac{H}{h} - 0,5 \right) \left( \frac{r}{h} \right)^\beta \right); \quad (5)$$

$$\gamma = 0,06 \left( \frac{H}{h} \right)^{-1} - 0,7; \quad \beta = 0,006 \frac{H}{h} + 0,26; \quad \alpha^\circ;$$

де кут зламу  $\alpha$  виражено в градусах.

Формула (5) дозволяє обчислити величину  $k_2$  з похибкою, яка не перевищує  $\pm 5\%$  при  $1,1 \leq H/h \leq 3; 0,05 \leq r/h \leq 1; 5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$  у порівнянні з результатами отриманими по МСЕ.

Розрахунок  $k_2$  з більшою похибкою можна здійснити по нижченаведеній універсальній формулі

$$k_2 = 1 + \frac{0,22 \operatorname{th} \left[ \left( \frac{50}{\alpha} + 1 \right) \frac{H}{h} - 1 \right]}{(r/h) + 3,5\alpha^{-1}}; \quad \alpha^\circ, \quad (6)$$

використовуючи яку, значення  $k_2$  можна визначити з похибкою не більше  $\pm 10\%$  відносно розрахованих по МСЕ даних для  $1,1 \leq H/h \leq 3; 0,05 \leq r/h \leq 1; 5^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ$ .

Для більш вузького діапазону кутів зламу  $\alpha$  може бути запропонована більш проста наближена формула розрахунку коефіцієнту концентрації  $k_2$  в осередку

$$k_2 = 1 + 0,15 \frac{r}{h} + \alpha \left( 0,002 - 0,02 \ln \left( \frac{r}{h} \right) \right); \quad \alpha^\circ, \quad (7)$$

Значення  $k_2$  за формулою (7) визначається з похибкою не більш ніж  $\pm 6\%$  відносно розрахованих даних по МСЕ при  $1,1 \leq H/h \leq 3; 0,05 \leq r/h \leq 1; 5^\circ \leq \alpha \leq 15^\circ$ .

**Обґрунтування розрахункової схеми, методики досліджень та параметричні дослідження.** Розрахункова схема при проведенні пружно-пластичного аналізу така сама як і при

пружному деформуванню, яка описана в [1] і показана на рис. 2.

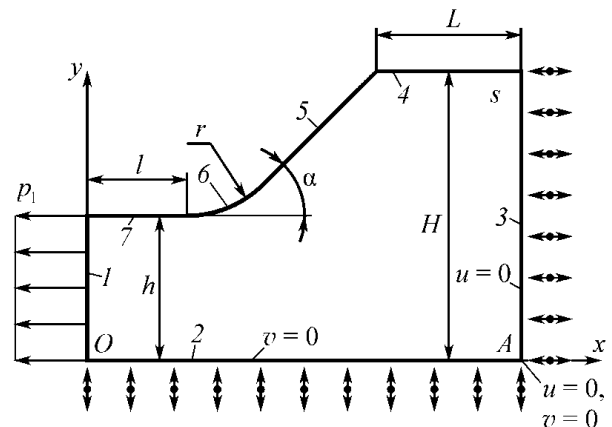


Рис. 2. Розрахункова схема досліджуваної балки-стілки

Наведена розрахункова схема може бути обґрунтована наступним чином. Наявність приєднаного пояса/фланця обшивки 2 (рис. 1) призводить до того, що нейтральний шар завжди зсунутий вниз до обшивки, і ми вважаємо в крайньому випадку, що він збігається з шаром  $u = 0$ , тобто збігається з кромкою 2. Протягом експлуатації досліджувана балка здебільшого працює на згин та розтяг-стиск, так що верхні кромки стінок призматичних частин на достатньому віддаленні від місць зламу завжди знаходяться в лінійному НДС. Наведені схеми забезпечують отримання найбільш безпечних результатів порівняно з іншими розрахунковими схемами.

Пружно-пластичні розрахунки проводилися тільки для розтягання-стискання, тому що при цьому значення інтенсивності деформацій отримуються більшими ніж при згині, що є безпечною оцінкою. Для серійних розрахунків пружно-пластичної задачі використовувалися об'ємні СЕ, що представляють собою тетраедри з 10 вузлами. Використання об'ємних СЕ пов'язано з тим, що плоска задача не враховує всі компоненти НДС, т.я. має місце звуження стінки в осередку концентрації та складні процеси розвитку пластичних зон, пов'язані з переходом від плоскої деформації до плоского напруженого стану. Зі зменшенням товщини стінки  $s$  зростають значення інтенсивності пружно-пластичних деформацій в осередку концентрації. В результаті числових експериментів було виявлено, що при  $s \leq h/20$  відбувається стабілізація значень інтенсивності деформацій в контрольних точках осередку. Товщина стінки  $s = h/20$  була прийнята для серійних розрахунків. Така товщина забезпечує реалізацію плоского напруженого стану у вузлі відносно розмірів



пластичних зон. Пробні розрахунки проведені з використанням СЕ у вигляді тетраєдрів з 20 вузлами показали, що отримані результати практично не відрізнялися від результатів отриманих для СЕ з 10 вузлами. Це підтверджує висновки, отримані в [14], що результати розрахунку пружно-пластичного деформування залежать більше від якості обробки інформації в характерних точках (інтегральних і вузлових точках), ніж від типу СЕ.

Розрахунок досліджуваної балки-стілки в умовах пружно-пластичного деформування для одного варіанту проводився наступним чином. При фіксованих геометричних параметрах в осередку/зоні концентрації на кромці *b* (рис. 2) визначався коефіцієнт концентрації *k*<sub>1</sub> за (1). Потім визначалося мінімальне навантаження  $p_{\min} = \sigma_s / k_1$ , (де  $\sigma_s$  – границя плинності), при яких починається пластичне деформування у зоні концентрації. Пружно-пластична робота для кожного досліджуваного варіанту розраховувалась для трьох значень зовнішнього навантаження *p*<sub>*i*</sub>, які визначалися за формулами

$$\left. \begin{aligned} p_i &= p_{\min} + i \cdot \Delta p, \quad i = 1, 2, 3, \quad \Delta p = \frac{[\sigma] - p_{\min}}{n}, \quad n = 3, \\ p_{\min} &= \frac{\sigma_s}{k_1}, \quad [\sigma] = 0,9\sigma_s. \end{aligned} \right\} (8)$$

Позначення *p*<sub>1</sub>, *p*<sub>2</sub>, *p*<sub>3</sub> в цьому розділі не стосуються позначень *p*<sub>1</sub>, *p*<sub>2</sub> для рис. 1, 2.

Геометричні параметри балки-стілки при серійних розрахунках пластики варіювалися в наступних межах

$$H/h \in [1,6; 2,4], \quad r/h \in [0,05; 0,2], \quad \alpha \in [20^\circ; 75^\circ]. \quad (9)$$

Попередні числові дослідження показали, що якщо довжина *l*<sub>*i*</sub> похилої частини виміряна вздовж осі *x*, що включає скруглення *b* і похилу кромку 5 (рис. 2) більша, ніж 5,5*h*, то відношення *H/h* практично не впливає на НДС в зоні скруглення *b*.

Отримане ствердження можна записати так

$$\frac{l_i}{h} \leq 5,5; \quad l_i = r \sin \alpha + \frac{H - h - r(1 - \cos \alpha)}{\tan \alpha}. \quad (10)$$

Умова (10) дозволила не створювати занадто довгих моделей, якщо мають місце малі кути  $\alpha$ . Також здійснювався контроль радіуса *r*, щоб вертикальна складова зони заокруглення  $r(1 - \cos \alpha)$ , не перевищувала значення *H* – *h*.

При поступовому зростанні зовнішнього навантаження пластичне деформування починається в осередку концентрації напружень *b* (рис. 2), а потім пластична зона поступово зростає.

На рис. 3 показано зразки пластичних зон для різних значень зовнішнього навантаження *p*<sub>*i*</sub>, *i* = 1, 2, 3, прикладеного до кромки *I* (рис. 2) для обраних типів геометрії осередку концентрації, де пояснення наведені в табл. 1.

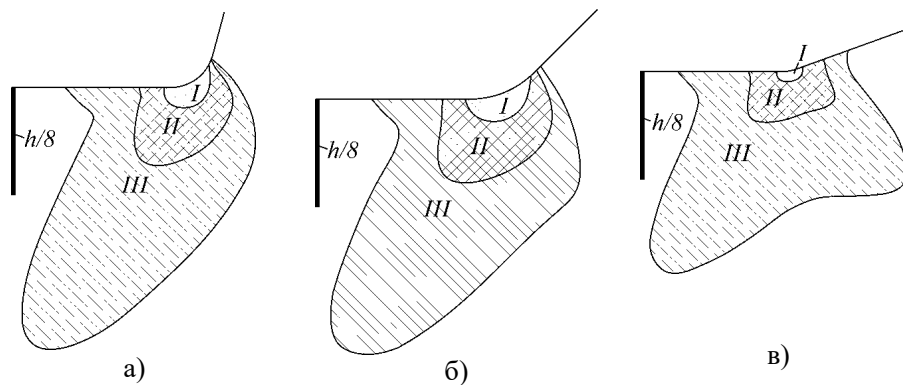


Рис. 3. Пластичні зони балки-стілки

Таблиця 1

Параметри для рисунку 3

№ п/п	Рис.	Геометричні параметри балки-стілки	Теоретичний коефіцієнт концентрації напружень <i>k</i> <sub>1</sub>	№ пластичної зони і відповідне <i>p</i> <sub><i>i</i></sub> / $\sigma_s$		
				I, <i>p</i> <sub>1</sub> / $\sigma_s$	II, <i>p</i> <sub>2</sub> / $\sigma_s$	III, <i>p</i> <sub>3</sub> / $\sigma_s$
1	3, а	$H/h = 0,16; r/h = 0,05; \alpha = 75^\circ$	3,89	0,471342	0,685671	0,9
2	3, б	$H/h = 0,16; r/h = 0,1; \alpha = 45^\circ$	2,93	0,527759	0,713879	0,9
3	3, в	$H/h = 0,16; r/h = 0,05; \alpha = 20^\circ$	2,48	0,569221	0,73461	0,9

На рис. 4 показано ізолінії інтенсивності пружно-пластичних деформацій  $\epsilon_i$  для сталі 3 з границею плинності  $\sigma_s = 235$  МПа, де пояснення до цього рисунку наведені в табл. 2.

В цілому з рис. 3, 4 і табл. 1, 2 можна зробити наступний висновок. Форма пластичної зони дуже залежить від кута нахилу  $\alpha$  похилої кромки 5 і менше залежить від радіуса скруглення  $r$  кромки 6 (рис. 1, 2). Для великих кутів нахилу (рис. 3, а) при поступовому збільшенні навантаження спостерігається ріст пластичної зони в сторону меншої стінки. Зі зменшенням кута нахилу при поступовому зростанні навантаженні пластична зона розгалужується і утворюється так званий другий «горб», який росте в сторону більшої стінки (рис. 3, в). Цей горб починається десь при  $\alpha = 45^\circ$  (рис. 3, б) і вже добре виражений при  $\alpha = 20^\circ$  (рис. 3, в). Зона III завжди відповідає навантаженню  $p_3/\sigma_s = 0,9$ . Форма пластичних зон практично не залежить від відношення висот стінок  $H/h$ .

**Інтенсивність пластичних та пружно-пластичних деформацій при максимальному навантаженні.** Після проведення серійних роз-

рахунків була накоплена статистична інформація для подальшої її обробки. Для ідеально пластичних матеріалів без зміцнення значення відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій  $\bar{\epsilon}_i$ , і значення відносної інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$ , що визначаються залежностями

$$\bar{\epsilon}_i = \frac{\epsilon_i}{\epsilon_{iey}}, \quad \bar{\epsilon}_{ip} = \frac{\epsilon_{ip}}{\epsilon_{iey}}. \quad (11)$$

не залежать від границі плинності.

В (11)  $\epsilon_i$  – абсолютне значення інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій;  $\epsilon_{ip}$  – абсолютне значення інтенсивності пластичних деформацій;  $\epsilon_{iey}$  – інтенсивність пружних деформацій, при яких починається пластичне деформування в осередку концентрації, що визначається залежністю

$$\epsilon_{iey} = \frac{\sigma_s}{3G}, \quad (12)$$

де  $G$  – модуль зсуву. Для ідеально пластичного матеріалу величина  $\epsilon_{iey}$  завжди постійна і не залежить від зовнішнього навантаження.

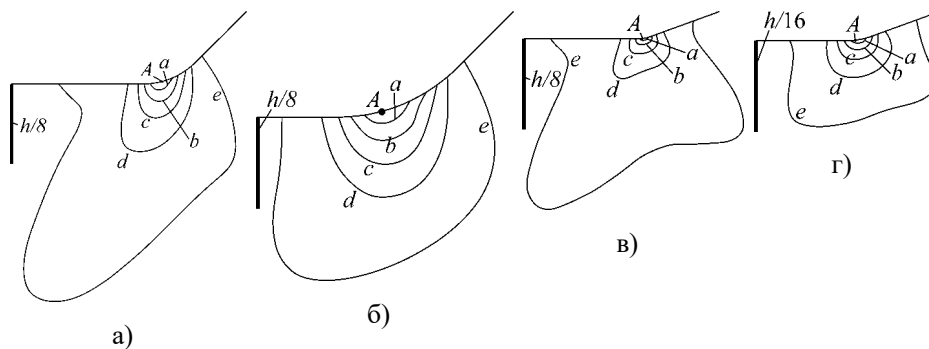


Рис. 4. Ізолінії інтенсивності пружно-пластичних деформацій  $\epsilon$ , балки-стілки

Таблиця 2

№ п/п	Параметри	Параметри для рисунку 4			
		Рисунок			
		4, а	4, б	4, в	4, г
1	Геометричні параметри	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,1;$ $\alpha = 45^\circ$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,1;$ $\alpha = 45^\circ$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,05;$ $\alpha = 20^\circ$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,05;$ $\alpha = 20^\circ$
2	Зовн. навант. $p/\sigma_s$	0,9	0,713879	0,9	0,73461
3	$\epsilon_i$ для лінії e	0,00101833	0,00101833	0,00101833	0,00101833
4	$\epsilon_i$ для лінії d	0,00254282	0,00174366	0,00220343	0,0015457
5	$\epsilon_i$ для лінії c	0,00406732	0,00246897	0,00338851	0,00207306
6	$\epsilon_i$ для лінії b	0,00559181	0,00319427	0,0045736	0,00260042
7	$\epsilon_i$ для лінії a	0,00711631	0,00391958	0,00575868	0,00312778
8	Максимальне значення пружно-пластичних деформацій $\epsilon_i$ в точці A.	0,0086408	0,00464488	0,00694377	0,00365514

На рис. 5 показані обрані залежності відносної інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від геометричних параметрів при  $p/\sigma_s=0,9$ . Пояснення до цього рисунку наведено в табл. 3.

Як видно з рис. 5 величина інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$  найбільше залежить від радіуса скруглення  $r$ , менше залежить від кута нахилу похилої кромки  $\delta$  (рис. 2) і найменше залежить від відношення висот стінок  $H/h$ . Зі збільшенням радіуса  $r$  величина  $\bar{\epsilon}_{ip}$  зменшується, і в найбільш несприятливому випадку при зміні  $r/h$  від 0,05 до 0,2 зменшення становить практично в 3,5 рази. Зі збільшенням кута нахилу  $\alpha$  похилої кромки  $\delta$  величина  $\bar{\epsilon}_{ip}$  збільшується, і для найбільш несприятливого випадку при зміні кута  $\alpha$  від  $20^\circ$  до  $75^\circ$  збільшення  $\bar{\epsilon}_{ip}$  становить практично в 3 рази. При кутах нахилу похилої кромки починаючи від  $45^\circ$  і більше спостерігається стабілізація величини  $\bar{\epsilon}_{ip}$ . Зі збільшенням відношення  $H/h$  величина  $\bar{\epsilon}_{ip}$  зростає, і в найбільш несприятливому випадку при зміні  $H/h$  від 1,6 до 2,4 зростання  $\bar{\epsilon}_{ip}$  становить лише на 40%.

Для відносного навантаження  $p/\sigma_s=0,9$  величина відносної інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip0,9}$  в залежності від геометричних параметрів може бути визначена наступною емпіричною залежністю

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_{ip0,9} &= a_0 r_h^{\beta}; \\ b_0 &= 0,12H_h + 0,65; \quad b_1 = -0,44H_h + 2,84; \\ \beta &= -b_0 \cdot \tanh(\alpha \cdot b_1); \\ a_0 &= 1,4 \cdot \tanh(H_h) - 0,14 \cdot \alpha; \\ r_h &= r/h, \quad H_h = H/h, \quad \alpha, \text{ rad.} \end{aligned} \right\} (13)$$

Розходження між  $\bar{\epsilon}_{ip0,9}$ , отриманими за формулою (13) відносно результатів МСЕ у діапазоні параметрів (9) становить  $\pm 9\%$ .

Значення (повної) пружно-пластичної деформації  $\epsilon_i$  в осередку концентрації для ідеально пластичного матеріалу визначається залежністю

$$\epsilon_i = \epsilon_{ip} + \epsilon_{iey}, \quad (14)$$

що підтверджується числовими розрахунками МСЕ. Для вузла з параметрами  $H/h = 2,0$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $r/h = 0,1$  значення  $\bar{\epsilon}_{ip0,9}$  розраховане за (13) становить 8,738, що на 0,5% більше за значення розраховане по МСЕ.

Перед використанням формули (13) слід впевнитись, що вузол знаходиться в умовах пружно-пластичного деформування. Для цього потрібно забезпечити виконання умови

$$p_{\min}^{rel} \leq p^{rel}; \quad p_{\min}^{rel} = 1/k_1; \quad p^{rel} = p/\sigma_s, \quad (15)$$

де коефіцієнт концентрації  $k_1$  визначається за (1), (2), (3) або (4);  $p_{\min}^{rel}$  – мінімальне відносне навантаження, при якому починається пружно-пластичне деформування в концентраторі;  $p^{rel}$  – відносне навантаження.

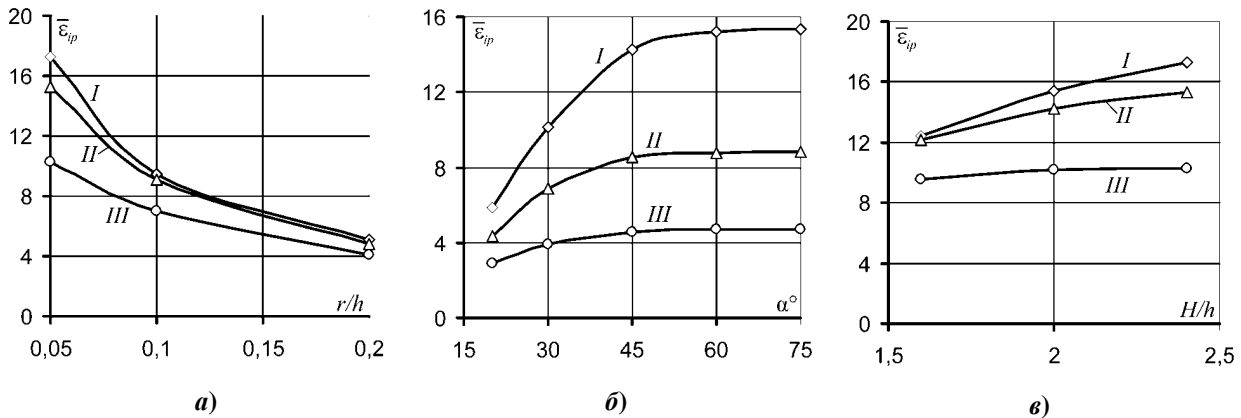


Рис. 5. Залежності відносної інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від геометричних параметрів при  $p/\sigma_s=0,9$ : а –  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від  $r/h$ ; б –  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від  $\alpha$ ; в –  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від  $H/h$

Таблиця 3

Параметри для рисунку 5

№ п/п	Рис.	Геометричні параметри для відповідних ліній		
		I	II	III
1	5, а	$H/h = 2,4; \alpha = 75^\circ$	$H/h = 2,4; \alpha = 45^\circ$	$H/h = 2,4; \alpha = 30^\circ$
2	5, б	$H/h = 2,0; r/h = 0,05$	$H/h = 2,0; r/h = 0,1$	$H/h = 2,0; r/h = 0,2$
3	5, в	$r/h = 0,05; \alpha = 75^\circ$	$r/h = 0,05; \alpha = 45^\circ$	$r/h = 0,05; \alpha = 30^\circ$

Наприклад, для вже вищезгаданих параметрів  $H/h=2,0; \alpha=60^\circ; r/h=0,1$ , пластичне деформування в небезпечному перерізі починається при відносному навантаженні  $p_{\min}^{rel} = 1/k_1 = 1/3,25 = 0,31$ , що дає змогу застосувати (13), спираючись на (15).

**Інтенсивність пластичних деформацій при зростаючому навантаженні.** На рис. 6 показано обрані залежності відносної інтенсивності (чисто) пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від прикладеного зовнішнього навантаження  $p/\sigma_s$  до кромки  $l$  (рис. 2). Пояснення до цього рисунку наведено в табл. 4.

Залежності відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій  $\bar{\epsilon}_i$  аналогічні таким, що представлені на рис. 6, але всі графіки будуть зсунуті вгору на одиницю.

Як видно з рис. 6 залежності інтенсивності пластичних  $\bar{\epsilon}_{ip}$ ,  $\epsilon_{ip}$  або пружно-пластичних  $\bar{\epsilon}_i$ ,  $\epsilon_i$  деформацій від прикладеного зовнішнього навантаження однотипні, які добре апроксимуються експоненціальною, показниковою і/або степеневою залежностями.

Одним з підходів апроксимації залежностей  $\bar{\epsilon}_{ip}$  або  $\bar{\epsilon}_i$  від навантаження (рис. 6) є заміна їх прямими лініями, які з'єднують кінці кривих, як це наприклад показано для лінії  $d$  на рис. 6,  $a$ . В такому випадку будемо мати дуже безпечну, але завжди

завищену оцінку пластичних деформацій, апроксимоване значення яких може бути завищеним більш ніж в два рази за дійсне. Тому для апроксимації залежності  $\bar{\epsilon}_i$  від прикладеного навантаження  $p/\sigma_s$ , приймаємо експоненціальний закон.

Для визначення відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій  $\bar{\epsilon}_i$  при пружно-пластичному деформуванні в залежності від відносного прикладеного зовнішнього навантаження  $p^{rel} = p/\sigma_s$  в рамках запропонованого підходу можна використовувати наступну залежність

$$\left. \begin{aligned} \bar{\epsilon}_i(p^{rel}) &= a \cdot \exp(b \cdot \sin(p^{rel})), \\ a &= \left(\frac{1}{c}\right)^\beta, \quad b = \frac{\ln\left(\frac{1}{c}\right)}{p_{\min}^{rel} - 0,9}, \quad c = 1,8 \cdot \bar{\epsilon}_{ip0,9} + 1, \\ \beta &= -\frac{p_{\min}^{rel}}{p_{\min}^{rel} - 0,9}. \end{aligned} \right\} (16)$$

де всі величини були пояснені вище. Ця залежність визначає величину  $\bar{\epsilon}_i$  з похибкою  $\pm 12\%$  відносно результатів отриманих за МСЕ у діапазоні параметрів (9). При цьому додаткову поправку для  $\bar{\epsilon}_{ip0,9}$ , пов'язану з похибкою формули (13) враховувати не потрібно. Для вузла з параметрами  $H/h = 2,0; \alpha = 60^\circ; r/h = 0,1$  значення  $\bar{\epsilon}_i$  розраховане за (16) становить 2,312, що майже на 5% менше за значення 2,426 розраховане по

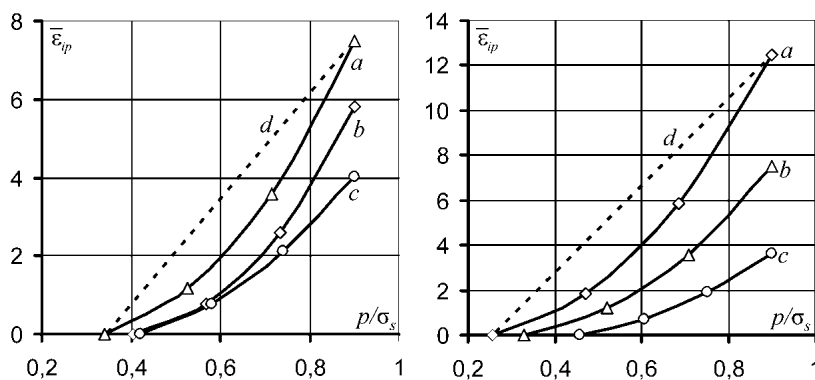


Рис. 6. Залежність відносної інтенсивності пластичних деформацій  $\bar{\epsilon}_{ip}$  від навантаження  $p/\sigma_s$

Таблиця 4

Параметри для рисунку 6

№ п/п	Рис.	Геометричні параметри для відповідних ліній та теоретичні коефіцієнти концентрації $k_1$ при розтяганні		
		a	b	c
1	6, a	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,1; \alpha = 45^\circ;$ $k_1 = 2,927$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,05; \alpha = 20^\circ;$ $k_1 = 2,477$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,2; \alpha = 75^\circ;$ $k_1 = 2,373$
2	6, б	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,05; \alpha = 75^\circ;$ $k_1 = 3,891$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,1; \alpha = 60^\circ;$ $k_1 = 3,027$	$H/h = 0,16;$ $r/h = 0,2; \alpha = 30^\circ;$ $k_1 = 2,180$

МСЕ. Для визначення відносної інтенсивності чисто пластичних деформацій  $\bar{\varepsilon}_{ip}$  необхідно скористатись формулою

$$\bar{\varepsilon}_{ip} = \bar{\varepsilon}_i - 1, \quad (17)$$

але при цьому слід покласти  $c = 1,6$  в (16), що пов'язано з проблемою малих різниць при малих  $p^{rel}$  при відніманні одиниці. Похибка визначення  $\bar{\varepsilon}_{ip}$  за (17) при цьому становить не більше  $\pm 21\%$  (при  $c = 1,6$ ) відносно результатів отриманих за МСЕ у діапазоні параметрів (9).

Таким чином, методика обчислення інтенсивності пружно-пластичних (повних)  $\varepsilon_i$ , пластичних  $\varepsilon_{ip}$  та пружних  $\varepsilon_{ie}$  деформацій в умовах пружно-пластичного деформування балки-стілки в осередку концентрації напружень  $\sigma$  (рис. 2) може бути представлена наступним чином:

1) для обраних/завданих геометричних параметрів досліджуваного вузла на рис. 1, 2 визначається коефіцієнт концентрації  $k_1$  за однією з формул (1), (2), (3) або (4);

2) визначається відносне навантаження  $p^{rel}$  за 3-м виразом (15) для завданого зовнішнього навантаження  $p$ ;

3) визначається мінімальне відносне навантаження  $p_{min}^{rel}$  за 2-м виразом (15), при якому починається пружно-пластичне деформування;

4) перевіряється 1-ша умова (15). Якщо 1-ша умова виконана, то балка-стілка перебуває в стані пружно-пластичного деформування і слід перейти до наступного п. 5. Якщо 1-ша умова (15) не виконана, то балка-стілка перебуває в стані тільки пружного деформування; інтенсивність пластичних деформацій дорівнює нулю, тобто  $\varepsilon_{ip} = 0$ , а інтенсивність пружних деформацій  $\varepsilon_{ie}$  дорівнює

$$\varepsilon_{ie} = \frac{p \cdot \sigma_s}{3G \cdot p_{min}}, \quad \varepsilon_{ip} = \frac{p \cdot \varepsilon_{iey}}{p_{min}}; \quad (18)$$

на цьому слід зупинитися;

5) обчислити  $\bar{\varepsilon}_{ip,0,9}$  за (13), що відповідає відносному навантаженню  $p^{rel}=0,9$  для пружно-пластичного деформування;

6) застосувати формулу (16) для визначення відносної інтенсивності пружно-пластичних (повних) деформацій  $\bar{\varepsilon}_i$  в залежності від прикладеного відносного навантаження  $p^{rel}$ , а потім застосувати формулу  $\varepsilon_i = \bar{\varepsilon}_i \cdot \varepsilon_{iey}$ , що виводиться з (11);

7) обчислити за потребою значення інтенсивності повних пластичних деформацій  $\varepsilon_{ip}$  за формулою

$$\varepsilon_{ip} = \varepsilon_{iey}(\bar{\varepsilon}_i - 1), \quad \varepsilon_{ie} = \varepsilon_i - \varepsilon_{iey}. \quad (19)$$

Вищенаведена методика представлена нижче на рис. 7 у вигляді блок-схеми алгоритму.

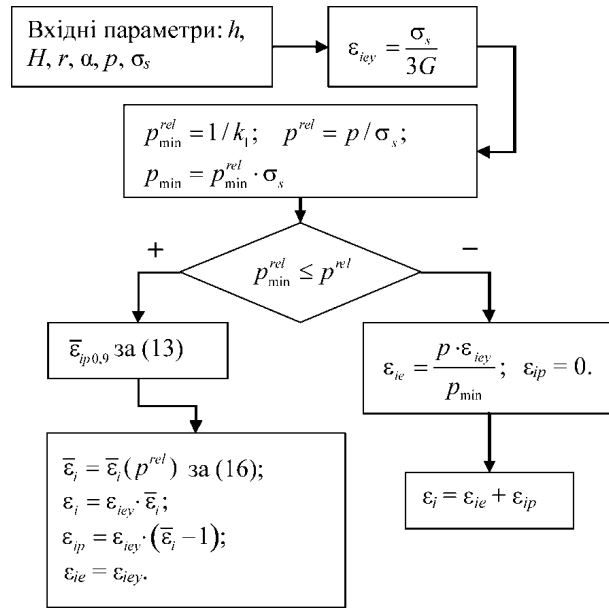


Рис. 7. Блок-схема алгоритму визначення інтенсивності пружних, пластичних та пружно-пластичних деформацій при пружно-пластичному деформуванні балки-стілки

Для врахування погрішності емпіричних формул необхідно значення інтенсивності розрахованих пружно-пластичних деформацій  $\bar{\varepsilon}_i$  помножити на 1,12 (для 12 % відхилення в найгіршому випадку).

**Оцінка формули Нейбера.** Проведемо оцінку формули Нейбера, яка часто буває задіяна в інженерних методиках розрахунку міцності в пружно-пластичній області. Як відомо класична формула Нейбера має вигляд

$$\left. \begin{aligned} \frac{K_\varepsilon \cdot K_\sigma}{K_t^2} = 1, \quad K_\varepsilon = \frac{\varepsilon_{i \max}}{\varepsilon_{i \text{ nom}}}, \quad K_\sigma = \frac{\sigma_{i \max}}{\sigma_{i \text{ nom}}}, \\ \sigma_{i \max} = \sigma_s, \quad \sigma_{i \text{ nom}} = p, \quad \varepsilon_{i \text{ nom}} = \frac{\sigma_{i \text{ nom}}}{3G}, \end{aligned} \right\} \quad (20)$$

де  $\varepsilon_{i \max}$  – інтенсивність пружно-пластичних деформацій в концентраторі;  $\varepsilon_{i \text{ nom}}$  – інтенсивність номінальних пружно-пластичних деформацій;  $\sigma_{i \max}$  – інтенсивність пружно-пластичних напружень в концентраторі;  $\sigma_{i \text{ nom}}$  – інтенсивність номінальних пружно-пластичних напружень.

Пояснення будемо вести для абсолютних величин, як більш зрозумілих, для сталі 3, з границею плинності  $\sigma_s = 235$  МПа. Для вузла з параметрами  $H/h = 2,0$ ;  $\alpha = 60^\circ$ ;  $r/h = 0,1$  для відносного навантаження  $p/\sigma_s = 0,505$  розраховані по МСЕ величини становлять: теоретичний коефіцієнт концентрації  $K_t = 3,249$ ; інтенсивність повної пружно-пластичної деформації в осередку  $\varepsilon_{i \max} = 2,471 \cdot 10^{-3}$ ; інтенсивність пластичної деформації  $\varepsilon_{ip} = 1,453 \cdot 10^{-3}$ ; інтенсивність пружних деформацій, при яких виникає текучість в осередку концентрації

$\varepsilon_{iey} = 1,018 \cdot 10^{-3}$ ; модуль зсуву  $G = 7,7 \cdot 10^{10}$  Па. Тоді дійсне навантаження  $\sigma_{i \text{ nom}} = 0,505 \cdot 235 \cdot 10^6 = 119$  МПа;  $\varepsilon_{i \text{ nom}} = 119 \cdot 10^6 / (3 \cdot 7,7 \cdot 10^{10}) = 5,143 \cdot 10^{-4}$ .  $K_\varepsilon = 2,471 \cdot 10^{-3} / 5,143 \cdot 10^{-4} = 4,805$ ;  $K_\sigma = 235 \cdot 10^6 / 119 \cdot 10^6 = 1,980$ ;  $K_\varepsilon \cdot K_\sigma / K_t^2 = 0,901$ . Як бачимо результат дуже хороший.

Аналогічно був проведений аналіз варіантів (9) геометрії вузла на основі пружно-пластичних деформацій розрахованих за МСЕ. Найбільше значення  $K_\varepsilon \cdot K_\sigma / K_t^2 = 1,47$  має місце для вузла з параметрами  $H/h = 0,24$ ;  $r/h = 0,05$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $k_1 = K_t = 3,08$  при  $p/\sigma_s = 0,9$ . Найменше значення  $K_\varepsilon \cdot K_\sigma / K_t^2 = 0,82$  має місце для вузла з параметрами  $H/h = 0,24$ ;  $r/h = 0,05$ ;  $\alpha = 75^\circ$ ;  $k_1 = K_t = 4,5$  при  $p/\sigma_s = 0,448$ . Якщо відфільтрувати результати для навантаження  $p/\sigma_s \leq 0,6$ , то відношення  $K_\varepsilon \cdot K_\sigma / K_t^2$  лежить в межах  $[0,82; 0,97]$ . Висновком з цього всього є те, що формулу Нейбера для балки-стілки при  $p/\sigma_s \leq 0,6$  в залежності від геометричних параметрів і навантаження коректувати немає сенсу, і відношення  $K_\varepsilon \cdot K_\sigma / K_t^2 = 1$  для нашого випадку буде завжди давати безпечну оцінку.

**Обговорення отриманих результатів.** Слід зауважити, що для ідеального пружно-пластичного матеріалу величини пластичних деформацій будуть завжди найбільшими ніж для матеріалів з будь-яким зміцненням. Проте реальні пластичні матеріали мають скінченну ділянку текучості, довжина якої для різних матеріалів становить декілька  $\varepsilon_{iey}$ . При відносному навантаженні  $p/\sigma_s = 0,9$  гарантовано виникає текучість в зоні концентрації напружень для всіх варіантів геометрії вузла, що дозволило провести розрахунки пластичності для всього діапазону геометричних параметрів. Проте для вузлів з високою концентрацією напружень при  $p/\sigma_s = 0,9$  виникають великі значення пластичних деформацій, інтенсивність яких становить десятки  $\varepsilon_{iey}$ , що означає, що площадка текучості має аналогічну довжину. В дійсності таких матеріалів з такою довгою площадкою текучості може не існувати. Але при такому підході отримується найбільш без-

печна оцінка розвитку пластичних деформацій, що важливо при оцінці втомної міцності в малота середньо-циклових областях. Тому що величини розмаху пружно-пластичних деформацій є завищеними, а кількість циклів згідно деформаційних критеріїв втомної міцності отримується заниженою. При зниженні відносного зовнішнього навантаження  $p/\sigma_s$  значення пластичних деформацій зменшується, і вже при  $(0,4 \div 0,6)$   $p/\sigma_s$  отримується прийнятні результати.

**Висновки.** У наведеній роботі були вирішені всі поставлені завдання згідно з метою дослідження.

1) обґрунтовано найбільш «сувору» розрахункову схему, яка забезпечує отримання найбільш безпечних результатів; обґрунтовано вибір типу СЕ та об'ємної задачі замість плоскої;

2) визначено мінімальні навантаження при яких починається пружно-пластичне деформування в концентраторі, які залежать від теоретичного коефіцієнту концентрації напружень; представлено додаткові залежності теоретичного коефіцієнту концентрації напружень;

3) розроблено залежності для визначення величини інтенсивності пружно-пластичних та пластичних деформацій в залежності від геометричних параметрів конструкції та зовнішнього навантаження в осередку концентрації напружень для ідеально пластичного матеріалу. Точність залежностей становить відповідно  $\pm 12\%$  та  $\pm 21\%$ ;

4) використовуючи отримані дані величин пружно-пластичних деформацій, було проведено аналіз формули Нейбера і показано, що для відносних навантажень  $p/\sigma_s \leq 0,6$  ця формула дає задовільні результати. Це дає змогу застосовувати в подальшому для аналізу втомної міцності балок-стінок в осередку концентрації напружень методики так званих S-N кривих, які неявно використовують класичну формулу Нейбера.

У подальшому планується врахування зміцнення.

#### Список літератури:

1. Коростильов Л.І., Соков В.М. Оценка концентрации напряжений в типовых очагах конструктивных узлов корпуса судна. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2008. № 5 (422). С. 11–17.
2. Соков В.М., Коростильов Л.І. Концентрация напряжений в типовом очаге тонкостенных конструкций. *Збірник наукових праць НУК*. Миколаїв: НУК, 2010. № 1 (430), С. 10–16.
3. Партон В.З., Морозов Е.М. *Механика упругопластического разрушения*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Наука, Главная редакция физико-математической литературы, 1985. 504 с.
4. Махутов Н.А. *Деформационные критерии разрушения и расчет элементов конструкции на прочность*. М.: Машиностроение, 1981. 272 с.
5. *Вычислительные методы в механике разрушения*: пер. с англ./ Под ред. С. Алтури. М.: Мир, 1990. 392 с.
6. P. Lazzarin, M. Zappalorto And F. Berto. Three-dimensional stress fields due to notches in plates under linear elastic and elastic-plastic conditions. *Fatigue Fract Engng Mater Struct*. Wiley Publishing Ltd, 2015. pp. 140–153.

7. Haijie Wang, Xintian Liu, Xiaolan Wang, Yansong Wang. Numerical method for estimating fatigue crack initiation size using elastic–plastic fracture mechanics method. *Applied Mathematical Modelling*. Elsevier, 2019. no. 73, pp. 365–377.
8. Wei Jiang, Ping Yang. Experimental studies on crack propagation and accumulative mean strain of cracked stiffened plates under low-cycle fatigue loads. *Ocean Engineering*. Elsevier, 2020. no. 214. pp. 1–12.
9. Junlin Deng, Ping Yang, Qin Dong, Dan Wang. Research on CTOD for low-cycle fatigue analysis of central-through cracked plates considering accumulative plastic strain. *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier, 2016. no. 154. pp. 128–139.
10. Hubel, H. Simplified Theory of Plastic Zones: Based on Zarka's Method. Springer, 2016. 317p.
11. Torabi, A.R., Shahbazian B. Semi-analytical estimation of the effective plastic zone size at U-notch neighborhood in thin sheets under mixed mode I/II loading. *Engineering Fracture Mechanics*. Elsevier, 2020. no. 239. pp. 1–18.
12. Ball DL. Estimation of elastic-plastic strain response at two-dimensional notches. *Fatigue Fract Eng Mater Struct*. Wiley Publishing Ltd., 2020. pp. 1–22.
13. Adibi-Asl, R., Seshadri, R. Improved Prediction Method for Estimating Notch Elastic-Plastic Strain. *Journal of Pressure Vessel Technology*. ASME, 2010. Vol. 132, february. pp. 1–8.
14. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. *The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics*. 6-th edition. Barcelona, Spain: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005. 631 p.

### Sokov V.M. ELASTIC-PLASTIC DEFORMATION OF BEAM'S WEB WITH BREAK OF EDGES

*There is presented the methodology of definition of the intensity of elastic-plastic and plastic strains in the stress concentration seat of the typical ship beam with bend/break of web/axis/edges in dependence on its geometrical parameters and magnitude of applied external loading. The material of the beam is ideal plastic. The beam consists on two prismatic parts of different heights, amalgamated by smooth transition with inclined direct edge from little web height to high one. Free flange that may restrain itself to broken line is absent. The maximum loading applied to butch of beam of little web is 0.9 of yield limit. Strain-stress state was analyzed by the finite element method (FEM) using incremental plastic flow theory. It's proved the necessity of application of the volume problem for calculation of plastic. Accepted thickness of the beam at serial calculations provides realization of mainly plane stress state relatively plastic's zone sizes. Plane strain is not valid in practice. In addition there is conducted an analysis of development of plastic zones in dependence of increasing external load and geometrical beam's parameters. There are presented contours of plastic zones and tessellation lines of strains intensity for chosen variants. On data basis of magnitudes of elastic-plastic strains it was analyzed Neuber's formula in dependence on geometrical beam's parameters and magnitude of loading. It was proved that for occasions when loading don't exceed 0.6 from yield limit the Neuber's formula provide satisfactory safe results and don't need correction. It enables to apply well known methods of calculation of fatigue (for example S-N curves) and fracture mechanics to investigated beam in the concentrator where implicitly classical Neuber's formula is used. Offered methodologies of definition of elastic-plastic and plastic strains can be used in methods of calculation of low- and middle- cycle fatigue and fracture mechanics where these strains are used explicitly.*

**Key words:** *plasticity, elastic-plastic deformation, beam with break of web/axis/edges, plastic zones, ideal plastic body, Neuber's formula.*

## ПРИЛАДИ

УДК 623.44

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/04>

**Бєлашов Ю.О.**

Національна академія Національної гвардії України

**Зозуля Б.М.**

Національна академія Національної гвардії України

### ЗАЛЕЖНІСТЬ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИКОНАННЯ ВОГНЕВОГО ЗАВДАННЯ СНАЙПЕРОМ ВІД ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧНОГО ПРИЦІЛУ

*Останнім часом у світі спостерігаються підвищення загроз безпеці держави, а саме: розвідувально-підбивна діяльність іноземних спеціальних служб; загроза посягань з боку окремих груп та осіб на державний суверенітет, територіальну цілісність, економічний, науково-технічний і оборонний потенціал України, права і свободи громадян; злочинна діяльність проти миру й безпеки людства, насамперед поширення міжнародного тероризму; прояви сепаратизму, намагання автономізації за етнічною ознакою окремих регіонів України тощо.*

*З метою запобігання загрозам і ліквідації цих загроз силами безпеки проводяться спеціальні операції, до яких залучаються снайпери.*

*Особливостями вогневих завдань снайпера сил безпеки є потреба у високих значеннях показників точності стрільби й оперативності виконання цих завдань. Важливим є одночасне забезпечення цих значень, бо в іншому випадку виникає загроза невиконання завдання в цілому.*

*Аналіз показників ефективності стрільби та чинників, від яких вони залежать, показав, що можливими шляхами підвищення точності стрільби є використання оптичних прицілів з достатньою кратністю, які забезпечують потрібну точність прицілювання.*

*Надійність у виконанні вогневого завдання повинна бути максимальною: невлучення в ціль може спричинити втрати серед заручників, сторонніх цивільних осіб або дружніх сил.*

*У статті досліджено вплив кратності оптичного прицілу на оперативність виконання вогневого завдання снайпером. Отримано емпіричні залежності часу відновлення зображення в прицілі та захват цілі в поле зору й часу прицілювання від кратності для деяких моделей оптичних прицілів. Одержані результати можуть використовуватися для вибору оптимальної кратності прицілу при виконанні вогневих завдань снайпером і формування вимог до технічних характеристик снайперської зброї.*

**Ключові слова:** снайпер, вогневе завдання, оптичний приціл, кратність, оперативність виконання вогневого завдання, ефективність стрільби.

**Постановка проблеми.** Сьогодні важливість і необхідність застосування снайперів силами безпеки держави не викликають сумніву. Про це свідчать як причини введення снайперів у підрозділи сил охорони правопорядку різних країн, так і практика застосування цих підрозділів протягом останніх п'яти десятиріч [1–6].

Завданнями снайпера сил безпеки є звільнення заручників, знешкодження злочинця, який забарикадувався, боротьба з повітряним тероризмом, боротьба із захопленням потягів, автобусів та інших транспортних засобів, затримання особливо небезпечних злочинців, контрснайперська боротьба, захист високопоставлених осіб і важливих свідків тощо [7; 8].

Більшість із наведених завдань пов'язані з необхідністю збереження життя осіб, що знаходяться біля цілі, тому відповідні вогневі завдання повинні виконуватися з максимальною оперативністю, що унеможливить застосування злочинцем зброї, вибухових пристроїв або будь-які інші небезпечні дії.

Варто зазначити, що для максимально швидкого виведення цілі з ладу необхідно влучити в певні зони тіла. Відповідно до праць [1; 9–11], такими зонами є верхня ділянка хребта й центральна ділянка черепної коробки. Руйнування частини мозку, що відповідає за координацію рухів (мозочка), частини, що з'єднує головний мозок зі



спинним (довгастим мозком) або верхньою частиною стовбура спинного мозку, по якому проходять сигнали до кінцівок, дає змогу досягти бажаного результату. Але найменші розміри вказаних ділянок становлять 3...5 см. В окремих випадках, коли злочинець прикривається заручником, постріл здійснюється в руку, яка утримує зброю [12; 13], або навіть у палець [14]. Розміри цілей при цьому становлять близько  $5 \times 7$  см і  $1,5 \times 3$  см відповідно.

Окремою проблемою для снайпера сил безпеки є влучення в ціль, яка розташована за склом вікна будівлі, вітрини або транспортного засобу. При стрільбі під кутом до поверхні скла, що має місце в переважній кількості випадків, відбувається зміна траєкторії кулі [9]. Відхилення кулі від первинної траєкторії зростає зі збільшенням відстані між цілью та склом і з урахуванням зазначених вище розмірів цілей нерідко стає неприпустимо великим. У таких випадках снайпер змушений вдаватися до здвоєного пострілу: першим пострілом руйнується перешкода, яким є скло, а другим – уражається ціль. Здвоєний постріл використовується також для підвищення надійності виконання вогневого завдання. Так, відомий випадок, коли група захоплення Національної жандармерії Франції знищила чотирьох терористів силами чотирьох снайперів протягом декількох секунд. При цьому кожна ціль була уражена не менше як двома кулями [5]. У серпні 2001 року бійці спецпідрозділу «Альфа» при звільненні заручників застосували снайперський вогонь через скло. У результаті подвійного пострілу терорист був знешкоджений, а заручники визволені. Лише два заручники отримали легкі поранення осколками розбитого скла [15]. Проте відомі й випадки невдалого виконання подібних завдань [16].

Опитування професійних снайперів показало відсутність єдиних підходів до визначення кратності оптичного прицілу (далі – ОП) при виконанні конкретного вогневого завдання. Так, при стрільбі на 100 м по цілі  $0,05 \times 0,05$  м ними пропонувалося використовувати оптичні приціли ОП з кратністю від  $4 \times$  до  $12 \times$ . Позаштатні снайпери виявили схильність до максимальних значень кратності ОП. При цьому жоден із респондентів не зацікавився, з якою зброєю приціл буде використовуватися, а це є суттєвим, бо визначає величину кута вильоту.

Відомо, що при пострілі в результаті утворення кута вильоту снайпер може втрачати ціль із поля зору ОП, що призводить до зайвих витрат часу на візуальне захоплення цілі [8; 17; 18]. Причинами цієї несприятливої події є співвідношення

величин кута вильоту й кута поля зору ОП: чим менший перший і більший другий, тим нижча ймовірність утрати цілі з поля зору. Крім того, чим більше кут поля зору ОП, тим менший час витрачається на пошук цілі та її захват у поле зору у випадку втрати.

Водночас підвищення кратності ОП призводить до збільшення уявних кутових розмірів цілі та зменшення часу на прицілювання. Але кратність ОП та величина кута поля зору перебувають у зворотній залежності, тому необхідно визначити таке їх сполучення, яке відповідатиме найменшому часові виконання вогневого завдання.

Необхідність скорочення часу на виконання вогневого завдання снайпером сил безпеки та неоднозначність впливу на нього характеристик ОП зумовлюють актуальність вивчення впливу характеристик оптичного прицілу на оперативність виконання вогневого завдання снайпером.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз тактико-технічних характеристик снайперських гвинтівок, які перебувають на озброєнні силових структур, зокрема сил безпеки, провідних країн світу [23–24], свідчить про практичну відсутність зв'язку між прицільною відстанню гвинтівки та кратністю її оптичного прицілу.

Основними характеристиками ОП є кратність  $V$  та кут поля зору  $\gamma$ , але ці характеристики впливають на ефективність стрільби суперечливо [1; 17]. Підвищення кратності прицілу сприяє точності наведення зброї на ціль, але при цьому звужується кут поля зору, що утруднює спостереження за обстановкою, розвідку цілей, перенесення вогню з однієї цілі на іншу, ведення вогню по цілі, що рухається, і, врешті, негативно відбивається на оперативності виконання вогневого завдання.

Особливо актуальним питанням визначення раціональної кратності оптичного прицілу стало з упровадженням панкратичних прицілів, які дають змогу змінювати їх характеристики в досить широких межах.

Таким чином, дослідження впливу кратності оптичного прицілу на ймовірність ураження цілі снайпером є актуальним завданням.

**Постановка завдання.** Мета статті – установлення закономірностей впливу характеристик оптичного прицілу на оперативність виконання вогневого завдання снайпером сил безпеки.

**Виклад основного матеріалу.** Показником ефективності стрільби, що визначає її оперативність, є середній очікуваний час на виконання вогневого завдання  $T$  [10; 20]. Чисельне значення

цього показника для снайпера сил безпеки може бути розрахованим за формулою [21]:

$$T = T_1 + T_8 + (n - 1) \sum_{i=3}^9 T_i, \quad (1)$$

де  $T_1$  – час підготовки першого пострілу, с;  
 $T_3$  – час, що витрачається на зсув картинки в прицілі внаслідок віддачі, с;  
 $T_4$  – час на відновлення зображення в прицілі та захват цілі в поле зору, с;  
 $T_5$  – час на спостереження за результатами пострілу та їх оцінювання, с;  
 $T_6$  – час на прийняття за необхідності рішення на здійснення повторного пострілу, с;  
 $T_7$  – час на прицілювання, с;  
 $T_8$  – час на здійснення пострілу, с;  
 $T_9$  – час на перезаряджання зброї, с;  
 $n$  – кількість пострілів.

З огляду на особливості виконання завдань снайпером сил безпеки, величини  $T_1$  і  $T_9$  не є важливими для досліджуваного питання: підготовка першого пострілу здійснюється в умовах профіциту часу, а в перезаряджанні при застосуванні самозарядної зброї немає потреби через достатню ємність будь-якого магазину.

Час  $T_3$  визначається особливостями зброї та положенням для стрільби, а час  $T_8$  залежить від навичок стрільця, отже, ці величини не залежить від характеристик ОП.

Значення  $T_5$  і  $T_6$  у випадку, що розглядається, дорівнюють нулю через завчасно прийняте рішення про повторний постріл.

Таким чином, величинами, які залежать від характеристик прицілу (кратності  $V$  та кута поля зору  $\gamma$ ), є час на відновлення зображення в прицілі, захват цілі в поле зору  $T_4$  і час на прицілювання  $T_7$ . Під прицілюванням будемо розуміти наведення зброї на ціль – суміщення прицільної марки прицілу з точкою прицілювання після захвату цілі в поле зору.

Варто зазначити, що у випадку, коли кут поля зору ОП у два та більше разів перевищує кут вильоту, втрати цілі з поля зору не відбуватиметься й час  $T_4$  буде дорівнювати нулю. Але в цьому випадку уявний кутовий розмір цілі може бути недостатнім для наведення зброї на ціль із заданою точністю. Наприклад, при стрільбі із 7,62-мм снайперської гвинтівки Драгунова (СВД) із прицілом ПСО-1 втрата цілі з поля зору відбувається. При цьому достатня точність наведення на цілі з габаритами  $0,05 \times 0,05$  м і меншими не забезпечується на відстанях до 200 м [22], які є властивими для снайпера сил безпеки. Отже, необхідне підвищення кратності ОП, а це призведе до зву-

ження кута поля зору. Тому розгляд випадку, коли ціль унаслідок віддачі зброї виходить за межі поля зору ОП, видається доцільним.

Одним із параметрів, що визначає загальний час виконання вогневого завдання, є час наведення зброї на ціль або час прицілювання  $T_7$ . Цей відрізок часу починається із захвату цілі в поле зору прицілу та закінчується суміщенням прицільної марки з точкою прицілювання. Величина  $T_7$  залежить від шляху СПМ, який повинна здійснити прицільна марка ОП в межах його поля зору та швидкості її руху ВПМ.

Для визначення впливу кратності й кута поля зору оптичного прицілу на оперативність виконання вогневого завдання, зокрема на час прицілювання, необхідно розкласти процес прицілювання на складові. Таких складників можна виділити дві:

фаза швидкого наближення прицільної марки до точки прицілювання (час  $T_7'$ );

фаза плавного суміщення прицільної марки з точкою прицілювання (час  $T_7''$ ).

На рис. 1 показано переміщення прицільної марки відносно цілі під час прицілювання: переміщення з точки 1 в точку 2 відповідає першій фазі процесу прицілювання, а з точки 2 в точку 3 – другій.

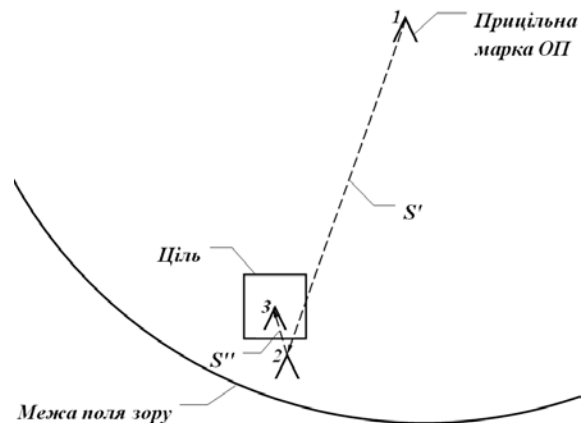


Рис. 1. Процес прицілювання

$$T_7' = \frac{S'_{ПМ}}{V'_{ПМ}}, \quad (2)$$

де  $S'_{ПМ}$  – шлях прицільної марки під час першої фази прицілювання, м;

$V'_{ПМ}$  – швидкість прицільної марки під час першої фази прицілювання, м/с.

$$T_7'' = \frac{S''_{ПМ}}{V''_{ПМ}}, \quad (3)$$

де  $S''_{ПМ}$  – шлях прицільної марки під час другої фази прицілювання, м;

$V''_{ПМ}$  – швидкість прицільної марки під час другої фази прицілювання, м/с.

Прицільна марка в результаті швидкого перенесення до точки прицілювання, як правило, проходить незначний зайвий шлях, минаючи точку наведення. Під час другої фази прицільна марка суміщається з точкою наведення.

Значення  $S''_{ПМ}$  рідко перевищує кутові розміри цілі та зазвичай є значно меншим, ніж  $S'_{ПМ}$ . Наприклад, для прицілу ПСО-1 кут поля зору становить близько ста тисячних, а ціль розміром  $0,1 \times 0,1$  м – одну тисячну, тобто значення  $S'_{ПМ}$  на два порядки більше, ніж  $S''_{ПМ}$ . Навіть для оптичних прицілів із відносно вузькими кутами поля зору відношення кута поля зору до кутових розмірів цілі становить 30...60. Унаслідок цього часом  $T'_7$  у більшості практичних випадків можна зневажити. За умов такого припущення  $T_7 = T'_7$ .

Час  $T'_7$  і кут поля зору мають пряму залежність: чим більший кут поля зору, тим більший час на перенесення прицільної марки до точки прицілювання. Через те що кут поля зору зворотно пропорційний кратності ОП, час  $T'_7$  залежить від кратності також зворотно.

Кратність ОП впливає також на час відновлення зображення та захват цілі в поле зору  $T_4$ .

Цей відрізок часу починається з моменту втрати цілі з поля зору внаслідок утворення кута вильоту й закінчується моментом захвату цілі в поле зору. Величина  $T_4$  залежить від кутової відстані між межами поля зору в положеннях до пострілу та після нього  $S_{ПЗ}$ , а також швидкості переміщення поля зору ОП під час пошуку цілі  $V_{ПЗ}$  (рис. 2). При визначенні  $S_{ПЗ}$  необхідно врахувати розміри цілі.

$$T_4 = \frac{S_{ПЗ}}{V_{ПЗ}}, \quad (4)$$

де  $S_{ПЗ}$  – шлях поля зору, м;  
 $V_{ПЗ}$  – швидкість поля зору, м/с.

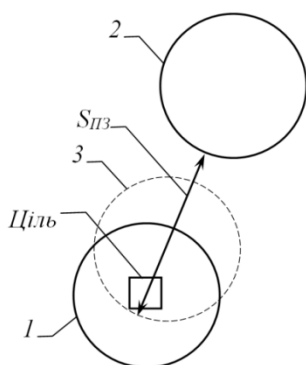


Рис. 2. Захват цілі в поле зору ОП: 1 – положення поля зору до пострілу; 2 – положення поля зору після пострілу; 3 – положення поля зору, що відповідає найкоротшому шляху його переміщення при пошуку та захваті цілі

При зменшенні кута поля зору зростає ймовірність того, що поле зору при переміщенні пройде повз ціль, що додатково збільшить час  $T_4$ . З рис. 3 видно, що менше поле зору проходить повз ціль, при тому що більше – захоплює ціль.

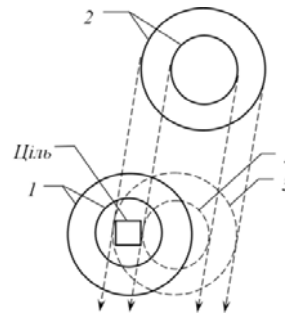


Рис. 3. Захват цілі в поле зору ОП: 1 – положення полів зору до пострілу; 2 – положення полів зору після пострілу; 3 – поле зору захоплює ціль; 4 – поле зору проходить повз ціль

Через те що ціль необхідно відшукувати, траєкторія руху поля зору може бути не найкоротшою, що також впливає на величину  $T_4$  (рис. 4).

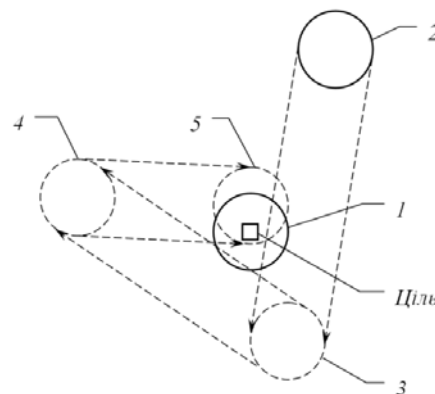


Рис. 4. Захват цілі в поле зору ОП: 1 – положення поля зору до пострілу; 2 – положення поля зору після пострілу; 3, 4 – поле зору проходить повз ціль; 5 – поле зору захоплює ціль

З огляду на те що лінійні розміри цілі та поля зору ОП залежать від відстані до цілі, є сенс оперувати кутовими величинами: кутовим шляхом і кутовою швидкістю. Тоді

$$T'_7 = \frac{\Psi'_{ПМ}}{\omega_{ПМ}}, \quad (5)$$

де  $\Psi'_{ПМ}$  – кутовий шлях прицільної марки під час першої фази прицілювання, рад;  
 $\omega'_{ПМ}$  – кутова швидкість прицільної марки під час першої фази прицілювання, рад/с.

$$T_4 = \frac{\Psi_{ПЗ}}{\omega_{ПЗ}}, \quad (6)$$

де  $\Psi_{ПЗ}$  – кутовий шлях поля зору, рад;  
 $\omega_{ПЗ}$  – кутова швидкість поля зору, рад/с.

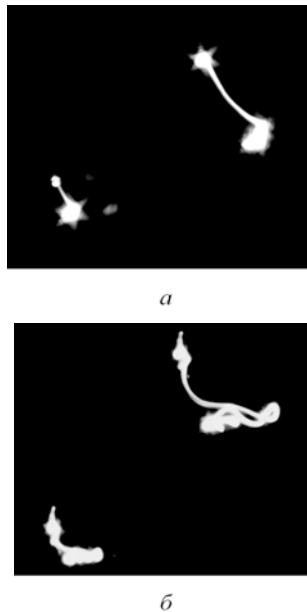


Рис. 5. Траєкторії руху гвинтівки під час пошуку цілі: а – ціль одразу захоплена в поле зору ОП; б – поле зору ОП спочатку пройшло повз ціль

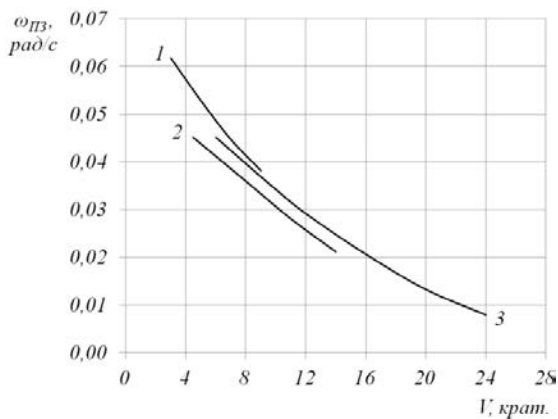


Рис. 6. Кутова швидкість руху поля зору під час пошуку цілі: 1 – 1П21; 2 – Leupold Mark 4 4,5-14×50; 3 – Zeiss hansoldt ZF 6-24×56

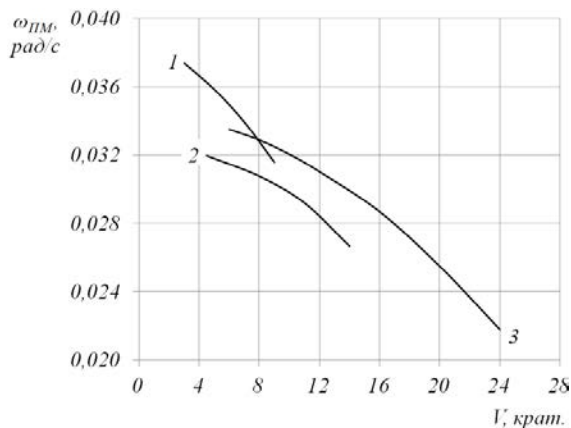


Рис. 7. Кутова швидкість прицілювання: 1 – 1П21; 2 – Leupold Mark 4 4,5-14×50; 3 – Zeiss hansoldt ZF 6-24×56

Значення чинників, що впливають на величини  $T_4$  та  $T_7$ , а також їх залежності від кратності ОП не відомі й у літературних джерелах не знайдені. Тому для їх визначення проведено натурні експериментальні дослідження. Як ціль використовувався квадрат зі стороною 0,05 м, що розташовувався на відстані 70 м, яка вважається середньою для снайпера сил безпеки [1; 10].

Для визначення часу на прицілювання, що відповідає певному куту поля зору, ціль розташовувалася впритул до межі поля зору в довільному напрямку. За звуковим сигналом досвідчений стрілець здійснював наведення зброї на ціль із максимально можливою оперативністю. Сигналом про закінчення процесу служив спуск курка з бойового взводу. Контроль правильності прицілювання здійснювався за допомогою лазерного цілевказівника, що вмикався під час спуску курка. При правильному наведенні зброї промінь цілевказівника потрапляв у центр електронної мішені (ЭЛТ-10), про що повідомляло її спрацювання. Під час досліджень урахувалися лише ті заміри часу, коли правильність наведення підтверджувалася спрацюванням мішені.

Час пошуку цілі та захвату її в поле зору ОП визначався аналогічним чином. При цьому зброя випадково наводилася в точки, що є рівно віддаленими від цілі та виключають її спостереження. Кутове віддалення точок від цілі й напрям їх розташування приблизно відповідали величині та напрямку кута вильоту 7,62 мм гвинтівки СВД (0–55).

Дослідження проведено з використанням панкратичних оптичних прицілів, що перебувають на озброєнні Національної гвардії України: Leupold Mark 4 4,5–14×50, Zeiss hansoldt ZF 6-24×56 та 1П21. Дослідження проводилися в усьому діапазоні кратностей оптичних прицілів.

Для вивчення траєкторії руху зброї при захваті цілі в поле зору та прицілюванні на гвинтівку кріпилися світлодіоди, рух яких записувався на фотокамеру з достатнім часом експозиції. Приклади отриманих траєкторій наведено на рис. 5.

Значення часу  $T_4$  та  $T_7$  визначалися за звукозаписом процесів пошуку цілі та прицілювання за відповідними звуковими мітками.

Відеозапис зазначених процесів дав змогу визначити кутову швидкість поля зору ОП при пошуку цілі та прицілюванні.

Кількість замірів значень  $T_4$  та  $T_7$  – по 10 для кожної кратності ОП. При цьому дослідження повторювалися п'ять разів із п'ятьма різними стрільцями. За результатами апроксимації отриманих значень усталовлено низку залежностей.

Залежності кутових швидкостей руху поля зору під час пошуку цілі та прицілювання марки при прицілюванні від кратності ОП наведено на рис. 6 і 7.

Зниження кутової швидкості руху поля зору під час пошуку цілі при зростанні кратності ОП пояснюється звуженням його кута й утрудненням сприйняття зображення стрільцем: у поле зору потрапляє менше об'єктів, що є орієнтирами, а швидкість руху зображення суб'єктивно підвищується. При постійному збільшенні кратності ОП швидкість поступово знижується, але не сягає нуля, що відповідає асимптотичному наближенню кривих до осі абсцис.

Кутова швидкість прицілювання знижується прогресивно через збільшення внеску швидкості  $V''_{ПМ}$ , яка є меншою від  $V'_{ПМ}$  у їх сумарне значення. Можна допустити, що при подальшому збільшенні кратності ОП внесок  $V'_{ПМ}$  у зазначену суму зведеться до мінімуму, а час прицілювання практично дорівнюватиме часові  $V''_{ПМ}$ . Тоді криві змінять напрям вигину й асимптотично наближатимуться до осі абсцис.

На рис. 8–10 наведено залежності часу пошуку цілі та часу прицілювання від кратності ОП. При цьому сумарний час  $T_{\Sigma} = T_4 + T_7$ .

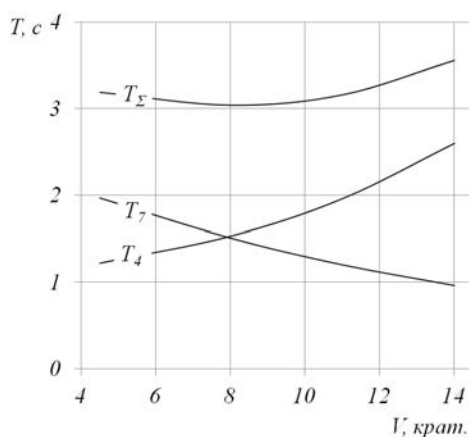


Рис. 8. Часові показники для прицілу Leupold Mark 4 4,5–14×50

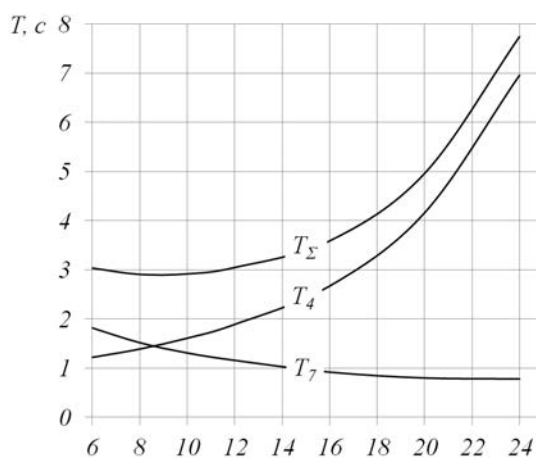


Рис. 9. Часові показники для прицілу Zeiss hansoldt ZF 6–24×56

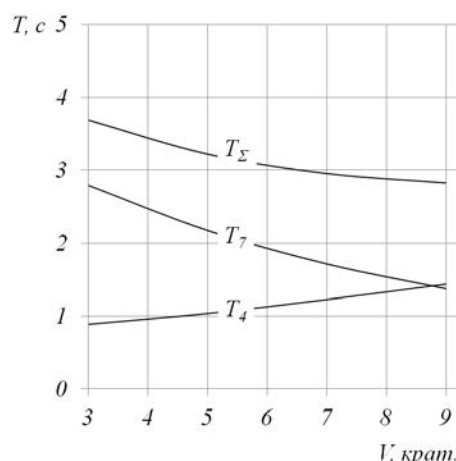


Рис. 10. Часові показники для прицілу 1П21

З рисунків видно, що зі збільшенням кратності ОП час на пошук цілі та захват її в поле зору зростає, а час на прицілювання – зменшується. При відносно великих значеннях кратності час пошуку цілі сягає значних величин, що пояснюється випадками проходження поля зору повз ціль, як показано на рис. 4 та 5б.

Отримані залежності є нелінійними, що не суперечить логіці. Так, при наближенні кратності ОП до нескінченності кут поля зору наближатиметься до нуля. При цьому час пошуку цілі наближатиметься до нескінченності, а час прицілювання – до нуля, ніколи його не досягаючи. При наближенні кратності ОП до одиниці кут поля зору наближається до певного значення, що властиве цьому прицілу та є меншим, ніж кут поля зору неозброєного ока. Тому час пошуку цілі при цьому не дорівнює нулю, а час прицілювання не сягає значних величин. Зазначене обумовлює форми кривих  $T_4(V)$  та  $T_7(V)$ .

Час  $T_{\Sigma}$  має виражений мінімум при певному значенні кратності ОП. Це значення є раціональним за критерієм оперативності для випадків, коли величина кута вильоту виключає залишення цілі в полі зору при пострілі, що є властивим для більшості бойової зброї.

Варто зазначити, що на залежність  $T_4(V)$  впливає величина кута вильоту, отже, для кожного зразка зброї та положення для стрільби її параметри необхідно уточнювати. При цьому оцінювання часу  $T_4$  можна здійснювати на основі величин кута вильоту й кутової швидкості руху поля зору при пошуку цілі, яка є функцією кратності, і кута поля зору ОП.

**Висновки.** Отже, на основі викладеного вище можемо резюмувати таке:

1. Сумарний час, що витрачається на пошук цілі й захват її в поле зору та прицілювання, має

виражений мінімум при певному значенні кратності ОП. Це значення є раціональним за критерієм оперативності.

2. Якщо при пострілі ціль не втрачатиметься з поля зору, то час  $T_4 = 0$ , а  $T_5 = T_7$ , що суттєво підвищує оперативність виконання вогневого завдання снайпером. У такому випадку збільшення кратності є корисним, тому що залежність  $T_7(V)$  є спадною, але до певного значення, за якого кут поля зору ОП ще забезпечує залишення цілі в полі зору при пострілі.

3. Для більшості зразків бойової зброї кут вильоту удвічі й більше перевищує кут поля зору

ОП, що призводить до втрати цілі з поля зору. Тому кращим є таке значення кратності ОП, коли забезпечується залишення цілі в полі зору при пострілі. Обмежуючим фактором при зниженні кратності ОП є вимоги до точності наведення зброї на ціль, яка прямо пропорційна кратності ОП.

4. При неможливості одночасного забезпечення потрібних точності наведення зброї на ціль та оперативності виконання вогневого завдання можливим шляхом розв'язання цієї проблеми є зменшення кута вильоту кулі, що є напрямом подальшого дослідження.

#### Список літератури:

1. Plaster J. The Ultimate Sniper. Paladin Press, 2007. 617 с.
2. Израильский спецназ приоткрыл кадры. URL: <http://www.kommersant.ru/doc/734539> (дата звернення: 14.05.2021).
3. Основы снайперского ремесла. URL: [http://spec-naz.org/articles/others/osnovy\\_snaiperskogo\\_remesla/](http://spec-naz.org/articles/others/osnovy_snaiperskogo_remesla/) (дата звернення: 14.05.2021).
4. Терроризм (часть 2). Антитеррористическая деятельность. URL: <http://rus-antiterror.livejournal.com/31809.html> (дата звернення: 14.05.2021).
5. Рязанов О.Е. История снайперского искусства : учебное пособие. Москва : Витязь-Братишка. 2004. 162 с.
6. Тактика контртеррора. URL: [licsecurity.ru/antiterror/taktika-kontrterroga](http://licsecurity.ru/antiterror/taktika-kontrterroga) (дата звернення: 14.05.2021).
7. Біленко О.І. Тактико-технічні характеристики стрілецької зброї для сил охорони правопорядку, які підлягають регламентації. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. Харків, 2013. № 2/10 (62). С. 28–32.
8. Біленко О.І., Белашов Ю.О. Шляхи підвищення ефективності виконання вогневих завдань снайпером сил охорони правопорядку. *Збірник наукових праць Академії ВВ МВС України*. 2013. № 2 (22). С. 12–15.
9. Бруксмит П. Искусство снайперской подготовки. Москва : Росмен-Пресс, 2004. 192 с.
10. Лонсдейл М. Снайперские/контрснайперские операции и основы меткой стрельбы. URL: <http://bond007.h1.ru/razvedka/l-03.htm> (дата звернення: 14.05.2021).
11. Программа для подготовки снайперов. Средства обороны для настоящих профессионалов. URL: <http://www.euro-security.info/ru/targets/sniper-target> (дата звернення: 14.05.2021).
12. Об утверждении Наставления по огневой подготовке в органах внутренних дел Российской Федерации : Приказ МВД РФ от 11.09.2000 № 955. URL: <http://www.bestpravo.ru/rossijskoje/lq-pravo/z3b/index.htm> (дата звернення: 14.05.2021).
13. Искусство снайпера. URL: <http://www.russian-snipers.ru/publ/1-1-0-14> (дата звернення: 14.05.2021).
14. Ардашев А. Снайперская война : учебник. Яуза : Эксмо, 2010. 416 с.
15. Все свободны. Спасибо. URL: [www.vremya.ru/print/12621.html](http://www.vremya.ru/print/12621.html) (дата звернення: 14.05.2021).
16. Голубкова В.В. Псковской области завершена операция по спасению заложниц, захваченных заключенными. URL: <http://www.kp.by/daily/25692/896324/> (дата звернення: 14.05.2021).
17. Конев К. Автомат как оружие снайпера? URL: <http://www.hpbt.org/articles/samo.htm> (дата звернення: 14.05.2021).
18. Біленко О.І. Показники та критерії оцінювання ефективності стрільби при виконанні специфічних завдань силами безпеки. *Системи озброєння і військова техніка*. 2014. № 3 (39). С. 7–11.
19. Шерешевский М.С. Эффективность стрельбы из автоматического оружия : учебник. Москва : ЦНИИ информации, 1979. 328 с.
20. Чернышев В.Л. Показатели эффективности использования вооружения : учебник. Москва : МАИ, 2006. 87 с.
21. Біленко О.І. Особливості оцінювання ефективності стрільби при виконанні специфічних завдань силами безпеки. *Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України*. 2015. № 1 (25). С. 40–46.
22. Біленко О.І., Белашов Ю.О., Пістряк П.В. Дослідження впливу кратності оптичного прицілу на ймовірність ураження цілі снайпером. *Збірник наукових праць Військової академії (м. Одеса)*. 2015. № 1(3). С. 60–68.
23. Рон В. Крупный калибр для снайпера. *Оружие*. 2011. № 5. С. 1–9.
24. Шульце К. Для больших дальностей. *Калашников*. 2013. № 5. С. 82–87.
25. Enemyforces. URL: <http://www.enemyforces.net/firearms/psg1.htm> (дата звернення: 14.05.2021).

---

**Bielashov Yu.O., Zozulya B.M. DEPENDENCE OF RESULTS OF PERFORMANCE OF FIRE TASK BY A SNIPER ON CHARACTERISTICS OF OPTICAL SCOPE**

*Recently, there have been increasing threats to state security in the world, namely: reconnaissance and subversive activities of foreign special services; the threat of encroachments by certain groups and individuals on state sovereignty, territorial integrity, economic, scientific, technical and defense potential of Ukraine, the rights and freedoms of citizens; criminal activity against the peace and security of mankind, first of all the spread of international terrorism; manifestations of separatism, attempts at ethnic autonomy of certain regions of Ukraine, etc.*

*In order to prevent and eliminate these threats, the security forces conduct special operations involving snipers.*

*The peculiarities of the fire tasks of a sniper of the security forces are the need for high values of accuracy of firing and efficiency of these tasks. It is important to provide these values at the same time, because otherwise there is a risk of failure to perform the task in general.*

*Analysis of shooting performance indicators and the factors on which they depend, showed that possible ways to improve the accuracy of shooting is the use of optical scopes with sufficient multiplicity, which provide the desired accuracy of aiming.*

*Reliability in the execution of the fire task must be maximized: failure to hit the target can cause losses among the hostages, civilians or friendly forces.*

*The article investigates the influence of the multiplicity of the optical scope on the efficiency of the sniper fire task. Empirical dependences of the image recovery time in the sight and the capture of the target in the field of view and aiming time on the multiplicity for some models of optical scopes are obtained. The obtained results can be used to select the optimal multiplicity of the scope when performing fire tasks by a sniper and to form requirements for the technical characteristics of sniper weapons.*

**Key words:** *sniper, fire task, optical scope, multiplicity, efficiency of fire task execution, firing efficiency.*

УДК 621.38

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/05>

**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

## **ПИТАННЯ ОПТИМАЛЬНОГО ВИБОРУ МУЛЬТИМЕТРА ЦИФРОВОГО ДЛЯ ПОТРЕБ ВИПРОБУВАЛЬНОГО ЦЕНТРУ (З ДОСВІДУ ПРАКТИЧНОЇ ДІЯЛЬНОСТІ)**

*Стаття присвячена аналізу оптимального вибору мультиметра цифрового для потреб Випробувального центру Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз СБ України. Перелічені види випробувань, які проводить Випробувальний центр із застосуванням засобів вимірювальної техніки. Виконаний аналіз останніх досліджень і публікацій з проблемних питань обґрунтування вибору та рекомендацій щодо використання засобів вимірювань.*

*У статті розглядається питання додаткового оснащення Випробувального центру зразками сучасних засобів вимірювальної техніки універсального призначення виробництва провідних світових виробників за критерієм «ціна/якість» та за градацією «універсальне призначення / вузькоспеціалізоване призначення». Наданий опис найбільш важливих критеріїв, якими треба керуватися під час вибору мультиметрів цифрових. Наведені загальні положення щодо специфіки функціонування цифрових вимірювальних приладів. Наведені визначення мультиметра та класифікація видів мультиметрів. Надані порівняльні характеристики аналогових та цифрових мультиметрів.*

*Проаналізовані особливості параметрів двох видів сучасних мультиметрів цифрових – стаціонарного (лабораторного) та портативного, також внесені конкретні пропозиції щодо їх вибору. Були розглянуті конкретні моделі: мультиметр лабораторний SDM 3065X виробництва корпорації SIGLENT TECHNOLOGIES CO., LTD (КНР) та мультиметр портативний з функцією «True-RMS» Fluke 289 виробництва компанії Fluke (США). Виконано порівняння функціональних можливостей приладів SDM 3065X та Fluke 289 з параметрами мультиметра DMM 4040 виробництва фірми TEKTRONIX (США), який нині використовується під час проведення випробувань.*

**Ключові слова:** цифрові вимірювальні прилади, дискретизація, мультиметр цифровий, роздільна здатність, похибка, види вимірювань, математичні функції, програмне забезпечення, подвійний екран.

**Постановка проблеми.** Випробувальний центр Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України (ВЦ ІСТЕ СБУ), акредитований в Національному агентстві з акредитації України, є єдиним органом з оцінки відповідності в структурі СБУ, який наблизився до рівня, що забезпечує оцінювання відповідності продукції вимогам норм європейських стандартів. Крім того, його діяльність відповідає Закону України від 15.01.2015 № 124-VIII «Про технічні регламенти та оцінку відповідності».

ВЦ ІСТЕ СБУ проводить такі види випробувань, як:

- оцінка відповідності функції законного перехоплення інформації з телекомунікаційних мереж із комутацією каналів/пакетів;
- оцінка відповідності функції блокування доступу до визначеного (ідентифікованого) інформаційного ресурсу (сервісу) в телекомунікаційних мережах;
- стійкість продукції до дії підвищеної та зниженої температури;
- стійкість продукції до дії підвищеної відносної вологості;



- міцність продукції під час транспортування;
- безпека використання продукції.

Достовірність та точність вимірювань і випробувань забезпечуються сучасними засобами вимірювальної техніки (ЗВТ). Але ВЦ ІСТЕ СБУ експлуатує певну, на жаль обмежену, кількість сучасних ЗВТ. З метою підвищення якісного рівня випробувань шляхом оброблення додаткових результатів, одержаних від приладів із розширеними функціональними можливостями, потрібне подальше оснащення ВЦ сучасними ЗВТ виробництва провідних світових компаній.

При обмеженому фінансуванні постає питання найбільш оптимального вибору сучасних ЗВТ за критерієм «ціна/якість» та за градацією «універсальне призначення / вузькоспеціалізоване призначення».

Під час проведення маркетингових досліджень та при виконанні процедури закупівель ЗВТ насамперед перевагу потрібно надавати приладам універсального призначення. При необхідності закупівлі та застосуванні вузькоспеціалізованих ЗВТ необхідно звертати увагу на унікальність їх параметрів.

Відповідно до рекомендацій Концепції розвитку системи метрологічного забезпечення у сфері оборони на період до 2015 року та на перспективу до 2025 року [1] важливим є системний підхід, оскільки сучасність ставить усе більш жорсткі вимоги до точності, надійності, обсягів та автоматизації вимірювань, режимів аналізу та документуванню результатів вимірювань.

З метою ефективного розвитку ВЦ ІСТЕ СБУ щодо виконання завдань вимірювання технічних параметрів продукції, яка проходить випробування, опрацьовується питання його додаткового оснащення найбільш сучасними ЗВТ універсального призначення виробництва провідних світових виробників. Одним із актуальних завдань є оптимальний вибір мультиметра цифрового [2].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Дослідженням проблемних питань обґрунтування вибору та рекомендацій щодо застосування сучасних ЗВТ займалися такі вітчизняні науковці, як В. Макаренко та В. Співак [3], Д. Нестерчук, С. Квітка, С. Галько [4], О. Дерюга [5], В. Хахула [6] та інші. Вагомим внеском у розроблення методів оптимального застосування ЗВТ є дослідження, проведені зарубіжними вченими. Це, зокрема, ґрунтовні праці А. Афонського, В. Дьяконова [2, 7, 8, 9] та В. Чинкова [10]. Існує велика кількість інших публікацій, які мають, як правило, інформаційно-довідковий характер, або розміщені на сайтах провідних виробничих та дистрибуторських компаній різних країн, що

спеціалізуються на розробленні, виробництві та (або) постачанні різноманітних засобів вимірювальної техніки [11, 12, 13].

**Постановка завдання.** Мета цієї статті – надати короткі описи та викласти певні рекомендації щодо аналізу та оптимального вибору мультиметра цифрового для потреб ВЦ ІСТЕ СБУ.

**Виклад основного матеріалу.** Функціонування більшості цифрових вимірювальних приладів базується на перетворенні безперервної (аналогової) вимірювальної величини в дискретну (цифрову). Виняток становлять прилади, які призначені для вимірювання дискретних величин (лічильники ядерних частинок, лічильники числа імпульсів та ін.). Процес цифрового кодування безперервної величини є сукупністю квантування (дискретизації) цієї величини за рівнем і за часом.

У цифрових вимірювальних приладах відбувається автоматичне перетворення вхідної вимірювальної величини на цифровий код. Автоматизм перетворення вимірювальної величини в цифровий код є визначальною ознакою таких ЗВТ.

Зазначені прилади включають два обов'язкових функціональних вузли:

1) аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) і 2) цифрові відлікові пристрої (ЦВП). Крім АЦП і ЦВП, цифрові прилади можуть містити цифро-аналогові перетворювачі (ЦАП). АЦП і ЦАП застосовують і як автономні пристрої.

У результаті квантування вимірювальної величини по рівню виникає похибка дискретності, обумовлена тим, що безліч значень вимірювальної величини відтворюється обмеженою кількістю показань ЦВП.

Похибка дискретності властива ЦВП і відсутня у аналогових приладів. Проте ця похибка не є перешкодою для збільшення точності приладів, так як відповідним вибором числа рівнів квантування похибку дискретності можливо зробити як завгодно малою. ЦВП, як правило, мають значно менші похибки, ніж аналогові прилади, які призначені для вимірювання тих же самих фізичних величин. Дискретизація безперервної величини  $x(t)$  по часу проводиться з метою перетворення  $x(t)$  в дискретну в часі величину, яка співпадає з відповідними значеннями  $x(t)$  тільки в певні моменти часу. Проміжок часу між двома сусідніми моментами часу дискретизації називається кроком дискретизації, який може бути постійним або змінним. Дискретизація по часу (так само, як і квантування по рівню) безперервної вимірювальної величини є джерелом похибки ЦВП. Однак вибором відповідного кроку дискретизації

(як і рівня квантування) похибка може бути зведена до мінімуму.

**Мультиметр** (англ. multimeter) – універсальний прилад, який здатний вимірювати декілька параметрів, в першу чергу – постійний струм і напругу, змінний струм і напругу, опір резисторів на постійному струмі. Деякі мультиметри додатково дають можливість вимірювати ємність конденсаторів, температуру; виконувати прозвонювання ланцюгів, оцінювати непошкодженість діодів та транзисторів. Існують моделі, що дозволяють вимірювати індуктивність та освітленість. Також зустрічаються прилади, що мають вбудовані генератори випробувальних сигналів та вимірювачі частоти. Ці багатофункціональні засоби вимірювальної техніки стали дійсно масовими приладами, які широко використовуються в багатьох сферах діяльності суспільства. Приклад класифікації видів мультиметрів наведений на рис. 1.

Порівняльні характеристики аналогових та цифрових мультиметрів відображені в таблиці 1.

Цифрові мультиметри звичайно мають у своєму складі вбудовані мікропроцесори, які підвищують надійність приладів та значно поліпшують їх метрологічні та експлуатаційні характеристики. Вони випускаються під різними торговими марками і надзвичайно широким рядом виробників – АКТАКОМ, UNI-T, MASTECH, Wavetek Meterman, METEX, BeeTECH, Fluke, Keithley, SIGLENT TECHNOLOGIES, TEKTRONIX та ін.

### Вибір цифрового мультиметра

Щоб коректно вибрати цифровий мультиметр, нижче перераховані найбільш важливі критерії, якими треба керуватися:

**1. Роздільна здатність.** Роздільна здатність визначає точність, з якою прилад може представляти отримані результати. Знаючи роздільну здатність мультиметра можливо визначити, чи зможе він відобразити малі значення вимірюваного сигналу. Для опису роздільної здатності використовується термін «розряди». 6½-розрядний мультиметр може відображати 6 повних розрядів вимірюваного значення у діапазоні від 0 до 9 і ще пів розряду (два значення старшого розряду), у якому відображається 1 або нічого (якщо він дорівнює нулю). 6½-розрядний мультиметр може відображати значення до 1999999.

**2. Похибка.** Похибка визначає максимальну помилку, яка може виникати за певних умов виміру. Вона показує наскільки близько результат який відображається, відповідає достовірному значенню вимірюваного параметра. Зазвичай похибка виражається у відсотках від показань приладу. Наприклад, похибка в один відсоток означає, що при показах 100 В реальне значення напруги може лежати у діапазоні від 99 до 101 В.

**3. Вимірювання.** Цифрові мультиметри можуть виконувати безліч різних вимірів. Цифровий мультиметр загального призначення зазвичай вимірює напругу, струм і опір. Часто підтримується прозвонка ланцюгів і перевірка діодів. Прозвонка ланцюгів дозволяє швидко перевіряти



Рис. 1. Приклад класифікації видів мультиметрів

## Порівняльні характеристики аналогових та цифрових мультиметрів

№ з/п	Параметр, що порівнюється	Цифровий мультиметр	Аналоговий (стрілочний) мультиметр
1	Точність показів	Покази відображаються з високою точністю цифрами на рідкокристалічному дисплеї.	На точність показів впливають джерела зовнішніх магнітних полів та орієнтація приладу по відношенню до площини земної поверхні. Інколи оператор змушений розраховувати межі вимірювань по кількості поділок на шкалі.
2	Залежність від полярності сигналу вимірювального приладу	Прилад автоматично визначає полярності та виконує вимірювання. Якщо клема щупів переплутані, то на дисплеї перед показаннями висвітлиться знак «-».	Потрібно обов'язково дотримуватись полярностей, бо інакше стрілка упреться в обмежувач на протилежному краю шкали.
3	Опції функціональності	Досить важко навести перелік чисельних опцій різних моделей цифрових приладів. Окрім вимірювань стандартних електричних параметрів, вони можуть вимірювати температуру, автоматично регулювати межі вимірювань та полярність, визначати ємність конденсаторів та інше.	Практично аналогові мультиметри можливо забезпечити додатковими функціями. Виникають складності процесу відображення на шкалі приладу, тому виробники не роблять такого дооснащення.
4	Енергетичне споживання	Любий режим вимірювань потребує підключення джерела живлення.	Відсутня потреба енергії джерела живлення при вимірюванні напруги та струму.
5	Можливість відслідковувати динаміку показань	На обробку даних та відображення в цифровому виді потребується певний час, виникає невелика затримка у відображенні постійно змінюваних параметрів.	Стрілочний прилад реагує миттєво, динаміка зміни показань легко відстежується.
6	Завадозахищеність	Цифрові прилади майже не відчувають вплив електромагнітних полів, тому точність їх вимірювань стабільна. Але сторонні імпульсні радіосигнали, особливо такі, що збігаються по тактовій частоті, на якій працює процесор, можуть суттєво вплинути на точність вимірювань.	Електромагнітні поля сторонніх джерел можуть суттєво вплинути на відхилення стрілки приладу, що спотворить дійсні показання.
7	Рівень впливу зарядки джерела живлення	Неточність вимірювань проявляється при рівні заряду джерела живлення нижче 40%. Досить велика кількість приладів оснащується індикатором низького рівня зарядки джерела живлення. Цей фактор потрібно відслідковувати.	При пониженні зарядки джерела живлення, рівень нульового значення в різних режимах вимірювань змінюється. Оператор змушений постійно виконувати калібрування приладу.
8	Стійкість до механічних впливів	_____	Конструкція стрілочного механізму базується на підвішеній рамці, яка кріпиться волосками в просторі електромагнітного поля. Дуже крихка конструкція потребує обережної експлуатації.

розімкнений (високий опір) і замкнутий (низький опір) стани ланцюга. При перевірці діодів вимірюється падіння напруги на переході при прямому зміщенні. Інші можливі виміри включають частоту, період, температуру і ємність.

**4. Додаткові канали.** Значна кількість цифрових мультиметрів мають слот для опцій на задній панелі, який призначений для установки плати сканера, що дозволяє виконувати багато-

портові виміри або виміри параметрів декількох пристроїв.

Такі прилади за схемно-конструктивними рішеннями можливо розділити на три категорії: *портативні* – це невеликі, легкі, компактні прилади з акумуляторними джерелами живлення та зручними можливостями керуванням приладами для роботи в польових умовах; *стаціонарні* – це прилади із найбільш широким функціоналом, що

живляться від мережі змінного струму 220 вольт; *носимі* – це певний перелік стаціонарних приладів, в яких реалізована можливість установки акумуляторних джерел живлення паралельно із живленням від мережі. Така конфігурація корисна в тих випадках, коли необхідно виконати високоточні вимірювання або спеціальне аналізування поза межами лабораторій.

Прилади виконуються з ручним і автоматичним вибором меж вимірювання. Можливо виділити прилади з поворотним перемикачем, комбінованим та кнопковим управлінням. Від цих особливостей залежить зовнішній вид мультиметрів.

ВЦ ІСТЕ СБУ значний проміжок часу експлуатує мультиметр DMM 4040 виробництва фірми TEKTRONIX (США). З його параметрами можливо ознайомитись на сайті фірми VD MAIS [14]. На сьогодні він морально застарів і потребує заміни.

Автори пропонують читачам ознайомитись із матеріалами апробацій приладів, які можуть бути застосовані замість DMM 4040.

**Мультиметр лабораторний SDM 3065X** виробництва корпорації SIGLENT TECHNOLOGIES CO., LTD (КНР) є універсальним багатофункціональним ЗВТ.

Крім стандартних основних функцій (вимірювання сили постійного струму, напруги постійного струму, сили змінного струму, напруги змінного струму, вимірювання опору, перевірки діодів) є можливість додатково виконувати вимірювання ємності (в діапазоні від 1 pF до 100 mF), частоти (в межах від 3 Hz до 1MHz) та температури. Реалізовані в приладі діапазони вимірювань DC V (100nV ÷ 1000V), DC I (0,1nA ÷ 10A), AC V (100nV ÷ 750V), AC I (0,1nA ÷ 10A), R (100μΩ ÷ 100MΩ) враховують фактично всі практичні потреби при виконанні процесів вимірювань.

Щодо математичних функцій, то в мультиметрі SDM 3065X реалізовані можливості: роботи з гістограмами (режим побудови гістограм); функціонування з обробіткою статистичних значень отриманих в процесі вимірювань; режим порівняння із встановленими граничними значеннями; робота з функцією побудови різноманітних графіків.

Прилад оснащено кольоровим TFT-LCD-екраном з діагоналлю 11 см та роздільною здатністю 480x272 точки (з великими чіткими знаками та широким кутом огляду). Меню управління просте в керуванні.

Вхідні клеми розміщені як на передній так і на задній панелях, що дозволяє зручно виконувати вимірювання, в яких використовується 4 проводи (по схемі 2x4). Конструктивна реалізація

корпусу приладу запобігає пошкодженню екрану. Для зручності в експлуатації, за допомогою ручки, що використовується для переноски SDM 3065X, можливо змінювати кут нахилу мультиметра.

**Мультиметр Fluke «True-RMS» моделі 289** виробництва компанії Fluke (США) є універсальним багатофункціональним ЗВТ виконаним в форматі портативного приладу з автономним живленням та функцією вимірювань середньоквадратичних значень.

У цій моделі реалізовано найсучасніші технічні рішення щодо:

*виконання стандартних вимірювань:*

– напруги постійного струму DC V (1 μV ÷ 1000 V); сили постійного струму DC I (10 nA ÷ 20 A); напруги змінного струму AC V (1 μV ÷ 1000 V); сили змінного струму AC I (10 nA ÷ 20 A); електричного опору R (1 mΩ ÷ 500 MΩ);

*можливості виконання вимірювань:*

– провідності G (10 pS ÷ 50 nS); температури (мінус 200°C ÷ плюс 1350°C); ємності (1 pF ÷ 100 мФ); частоти (0,001 Гц ÷ 1000 кГц).

Крім цього, в цій моделі мультиметра реалізовано функції:

– вимірювання робочого циклу (коефіцієнт заповнення); вимірювання ширини імпульсу (0,025 мС ÷ 1250 мС); вимірювання в відносних величинах та відносних процентних величинах; фіксація мінімальних та максимальних значень; вимірювання пік-фактора; можливість виконання вимірювання в дБ (дБм та дБВ); випробування на цілісність електричного кола.

Під час вимірювання змінної напруги є можливість застосувати фільтр нижніх частот.

Прилад оснащено рідкокристалічним монохромним екраном з двома режимами підсвічування. Кнопки керування та вхідні клеми розміщені на передній панелі.

Виконаємо порівняння функціональних можливостей мультиметрів SDM 3065X та Fluke «True-RMS» моделі 289 з параметрами мультиметра DMM 4040 згідно з таблицею 2.

Отже, використовуючи мультиметр SDM 3065X, можливо додатково (в порівнянні із приладом DMM 4040) виконувати виміри ємності та температури, але діапазон вимірювання електричного опору в мультиметрі DMM 4040 більш розширений. Також DMM 4040 має більший вибір математичних функцій, що може стати в нагоді під час вирішення складних вимірювальних задач.

У мультиметрі лабораторному SDM 3065X в порівнянні з аналогічним приладом DMM 4040 застосовано більш спрощений набір функцій. Але

## Порівняння функціональних можливостей мультиметрів SDM 3065X, Fluke 289 та DMM 4040

Назва показника	DMM 4040	SDM 3065X	Fluke 289
Роздільна здатність	6½ розряда	6½ розряда	-
Похибка вимірювань напруги постійного струму (базова похибка)	до 0,0035%	до 0,0035%	0,025%
Види вимірювань	Напруга змінного струму, напруга постійного струму, сила змінного струму, сила постійного струму, електричний опір (10μΩ ÷ 1ГΩ), частота, період, прозвонка ланцюгів, перевірка діодів	Напруга змінного струму, напруга постійного струму, сила змінного струму, сила постійного струму, електричний опір (100μΩ ÷ 100MΩ), частота, період, прозвонка ланцюгів, перевірка діодів, вимірювання ємності, вимірювання температури	Напруга змінного струму, напруга постійного струму, сила змінного струму, сила постійного струму, електричний опір, частота, період, перевірка цілісності електричних ланцюгів, перевірка діодів, вимірювання ємності та температури
Математичні функції	Zero (Нуль), dBm (дБм), dB (дБ), MX+B, Offset (зміщення), DCV ratio and TrendPlot (співвідношення пост. напруги и трэнд-графік), Histogram (Гістограма), Statistics (Статистика) (мін./макс./середн./середньоквадратичне відхилення) и Limit Test (Перевірка меж вимірювань)	dBm (дБм), dB (дБ), Trend Chart (трэнд-графік), Histogram (Гістограма), Statistics (Статистика), дельта-вимірювання (мін./макс./середн./середньоквадратичне відхилення)	dBm (дБм, дБВ), фіксація (мін./макс.), вимірювання пік-фактора, вимірювання робочого циклу (коефіцієнт заповнення), вимірювання ширини імпульсу, фільтр низьких частот при вимірюванні змінної напруги
Можливості підключення	Передня панель: USB; Задня панель: RS-232/USB, IEEE-488(GRIB) та Ethernet	Передня панель: USB; Задня панель: LAN та Ethernet	ІЧ-зв'язок
Подвійний екран	В наявності. Дозволяє виконати вимірювання двох різних параметрів одного сигналу без перепідключення до тестуємої схеми	В наявності. Дозволяє виконати вимірювання двох різних параметрів одного сигналу без перепідключення до тестуємої схеми	Відсутній. Є можливість виводу на екран двох параметрів одного сигналу
Програмне забезпечення	NI LabVIEW Signal Express	Easy DMM	FlukeView Forms
Орієнтовна вартість	1 600 \$	730 \$	660 \$

враховуючи конкретні вимоги до ЗВТ та зважаючи на співвідношення функціональності/вартість можливо рекомендувати використання мультиметра SDM 3065X для рішення великого спектру вимірювань в науковій діяльності, виробництві та навчальному процесі.

Мультиметр Fluke 289 має більш спрощений набір функціональних можливостей, ніж DMM4040, але, в порівнянні з іншими аналогами, Fluke 289 дає можливість працювати з математичними функціями, здійснювати їх запис в пам'ять

та аналізувати результати вимірювань на персональному комп'ютері.

У моделі Fluke 289 з'явився корисний помічник – кнопка «i-info» для швидкого виклику збудованої довідки по функціям вимірювань.

Також цікаві будуть для користувача і інші функції приладу:

– функція LoZ Volts – вхід із низьким вхідним опором, який дозволяє виключити помилкові та некоректні покази через завади. Цей режим також може використовуватись для

перевірки наявності або відсутності напруги на провідниках;

– фільтр нижніх частот Low Pass забезпечує точні вимірювання напруги та частоти в електроприводах із регулюємою швидкістю, також в іншому обладнанні з високим рівнем електричних завад;

– можливість оновлення та розширення функцій приладу в польових умовах дозволяє ініціювати нові функції без виведення засобу вимірювальної техніки із експлуатації.

За своїми можливостями мультиметр моделі Fluke 289 займає проміжне місце між портативними та лабораторними приладами. Перевагами цього ЗВТ можна вважати: портативність, мобільність, досить великий спектр вимірювань, мінімальні вимоги до місця розміщення, автономність живлення приладу.

**Висновки.** На базі аналізу викладеного матеріалу можливо дійти таких висновків:

– лише оптимальний вибір мультиметра цифрового дозволить коректно виконати завдання додаткового оснащення сучасним засобом вимірювальної техніки ВЦ ІСТЕ СБУ;

– рекомендується використовувати такі марки мультиметрів цифрових, які мають функції автоматизованих вимірів, вбудовані функції аналізу і кнопки швидкого виклику функцій та (або) режимів на передній панелі приладу; дають можливість працювати з математичними функціями, здійснювати їх запис в пам'ять та аналізувати;

– процеси дослідження та вимірювання нестаціонарних сигналів вимагають реалізацію можливості для швидкого виклику вбудованої довідки по функціям вимірювань на екран приладу;

– бажано мати можливість оновлення та розширення функцій мультиметра цифрового в польових умовах, що дозволить ініціювати нові функції без виведення ЗВТ із експлуатації;

– для потреб ВЦ ІСТЕ СБУ необхідно вибрати портативні ЗВТ, що рекомендовані для полігонних випробувань, але мають характеристики аналогічні параметрам лабораторних приладів.

Отже, враховуючи матеріали, викладені в цій статті, мультиметр цифровий моделі Fluke 289 виробництва компанії Fluke (США) може бути рекомендований для дооснащення ВЦ ІСТЕ СБУ.

#### Список літератури:

1. Концепція розвитку системи метрологічного забезпечення у сфері оборони на період до 2015 року та на перспективу до 2025 року: затвердж. наказом Міністра оборони України від 18.01.2010 №12.
2. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Измерительные приборы и массовые электронные измерения. М.: Солон-Пресс, 2007. 544 с.
3. Макаренко В.В., Співак В.М. Цифрова та імпульсна схемотехніка. Моделювання та аналіз. Електронний навчальний посібник. К.: НТУУ «КПІ», 2015 – 314 з іл.
4. Нестерчук Д.М., Квітка С.О., Галько С.В. Основи метрології та засоби вимірювань: навчальний посібник. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2017. 256 с.
5. Дерюга О.В. Дослідження метрологічних характеристик цифрових мультиметрів. Системи озброєння і військова техніка, 2010, № 2(22), с. 208-210. Режим доступу: <http://www/hups.mil.gov.ua>.
6. Хахула В.В. Метод корекції похибок вимірювального каналу цифрового мультиметра. Збірник наукових праць ОДАТРА № 1(6), 2015, с. 74-76. Режим доступу: <http://irbis-nbuv.gov.ua>.
7. Афонский А.А., Дьяконов В.П. Электронные измерения в нанотехнологиях и микроэлектронике / под ред. проф. В.П. Дьяконова. М.: ДМК Пресс, 2011. 688 с.
8. Дьяконов В.П. Виртуальные лаборатории. Обзор приставок и плат к персональному компьютеру. Ремонт и сервис, 2005, № 7, с. 48-53.
9. Дьяконов В.П. Осциллографы-мультиметры. Ремонт и сервис, 2005, № 8, с. 58-63.
10. Чинков В.Н. Цифровые измерительные приборы. Учебник/ В.Н. Чинков – М.: МО, 1992 – 506 с.
11. Контрольно-измерительное оборудование. Каталог 2016/2017. URL: [www.rohde-schwarz.ru](http://www.rohde-schwarz.ru).
12. Keysight Technologies. Контрольно-измерительные решения. Каталог 2016. 377 с. URL: <https://prist.ru>.
13. Електронний ресурс фірми «Харків-Прилад». URL: <https://pribory.com>
14. Електронний ресурс компанії «VD MAIS». Режим доступу: <http://www.vdmais.ua>.

#### **Skakun O.V., Voskresenskiy V.B., Sivoborodko A.V. THE QUESTION OF THE OPTIMAL CHOICE OF A DIGITAL MULTIMETER FOR THE NEEDS OF THE TEST CENTER (FROM PRACTICAL EXPERIENCE)**

*The article is devoted to the analysis of the optimal choice of digital multimeter for the needs of the Testing Center of the Ukrainian Research Institute of Special Equipment and Forensics of the Security Service of Ukraine. The types of tests which are carried out by the Testing center with use of means of measuring equipment are listed. An analysis of recent research and publications on problematic issues justifying the choice and recommendations for the use of measuring instruments.*

---

*The article considers the issue of additional equipment of the Testing Center with samples of modern measuring instruments of universal purpose of production of the world's leading manufacturers on the criterion of «price/quality» and gradation «universal purpose/highly specialized purpose». The description of the most important criteria which should be guided at the choice of digital multimeters is given. The general provisions concerning specificity of functioning of digital measuring devices are resulted. Definitions of multimeter and classification of types of multimeters are given. Comparative characteristics of analog and digital multimeters are given.*

*The peculiarities of the parameters of two types of modern digital multimeters-stationary (laboratory) and portable, are analyzed, and specific proposals for their selection are also made. Specific models were considered: a laboratory multimeter SDM 3065X manufactured by SIGLENT TECHNOLOGIES CO., LTD (PRC) and a portable multimeter with the «True-RMS» function Fluke 289 manufactured by Fluke (USA). The functionality of SDM 3065X and Fluke 289 devices was compared with the parameters of the DMM 4040 multimeter manufactured by TEKTRONIX (USA), which is currently used in testing.*

**Key words:** *digital measuring instruments, sampling, digital multimeter, resolution, error, types of measurements, mathematical functions, software, double screen.*

## РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.395

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/06>

**Блаженний Н.В.**

Державний університет телекомунікацій

### ВПЛИВ СОНЯЧНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ (КОСМІЧНОЇ РАДІАЦІЇ) НА ОПТИЧНІ ЛІНІЇ ЗВ'ЯЗКУ: ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ

*Активне зростання мереж при одночасному збільшенні довжини ділянок, а також розширення спектру застосування оптоволокна призвели до того, що виникла необхідність вивчати низку факторів, які впливають на якість роботи оптичних компонентів у різних умовах їх експлуатації. Відомо, що будь-який електронний або фотонний компонент може постраждати від дії ядерного випромінювання. У разі виникнення щонайменшої несправності системи, яка базується на роботі фотонних компонентів, це суттєво вплине на якість робіт і вартість усього обладнання. Ремонт оптичних компонентів або систем у радіаційному середовищі просто немислимий через надвисокий рівень радіації. Також майже неможливо відремонтувати бортове обладнання після виведення супутника на орбіту чи старт ракетно-космічного комплексу. Саме тому важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем ще до початку виконання їх місії: визначити проблеми й уникнути їх. Для забезпечення цього варто ретельно дослідити, як іонізоване випромінювання впливає на роботу й надійність низки оптичних компонентів, над чим сьогодні працює низка науковців. Метою статті є дослідження інформаційно-джерельного забезпечення проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно; створення інформаційної бази статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення. У статті всебічно досліджується інформаційно-джерельне забезпечення наукової проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно. На основі огляду матеріалів українських і зарубіжних авторів створено інформаційну базу статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення.*

**Ключові слова:** оптичне волокно, волоконно-оптична лінія зв'язку, радіаційне опромінення, радіаційно-стійке оптоволокно, іонізуюче випромінювання, ефект заміщення, іонізаційні ефекти, шуми, згасання.

**Постановка проблеми.** Значний прогрес в електроніці, оптиці, квантовій та оптоелектронній технології особливо на початку XXI століття уможливив використання оптоволокна як середовища для передачі великих об'ємів інформації на значні відстані, підвищивши швидкість систем передавання даних з 40 до 80 Гбіт/с і розширивши їх смугу пропускання до близько 100 ГГц. Нині смуга пропускання середовища передачі оптичних кабелів стала нараховувати десятки ТГц, а обсяг переданої інформації з одного волокна у волоконно-оптичних лініях зв'язку збільшився в рази. Завдяки цьому дальність передавання сигналів зросла до декількох сотень кілометрів, а поліпшення параметрів систем передачі даних покращило якість уже наявних послуг зв'язку й Internet, створення нових видів інформаційних мереж і систем. Однаково

активно оптичне волокно сьогодні застосовується в нафтовій, атомно-енергетичній, авіакосмічній галузях. Так, воно стало сировиною для датчиків, якими вимірюють напругу, температуру, тиск та інші параметри. Наприклад, оптоволоконні датчики для зняття показників у нафтових свердловинах для вимірювання температури й тиску, – такі пристрої гарно себе проявляють у середовищі високих температур, а завдяки невеликому розміру й майже відсутності потреби споживання електричної енергії мають переважаючі характеристики перед звичними електронними. Широко використовується оптичне волокно в гідрофонах для сейсмічних або гідролокаційних приладів; системах із гідроновим датчиком – у нафтовидобувній промисловості; у лазерному гіроскопі – для навігації кораблів і літаків. Також оптоволокно застосовується



для передачі інформації на особливо важливих об'єктах, наприклад, військових базах, атомних станціях. Реальними є й перспективи використання в космічному просторі. Так, уже в другій половині цього року американська компанія «Laser Light Communications» планує запуск глобальної програмно-керованої волоконно-супутникової платформи, яка в перспективі буде розширена скупченням 12 супутників навколоземної орбіти, що використовуватимуть лазерні промені замість радіохвиль [4]. Нині оптичне волокно вважається найдосконалішим фізичним середовищем для передавання інформації, а також найперспективнішим середовищем для передачі великих потоків інформації на значні відстані. Кількість пристроїв, підключених до Інтернету, зростає настільки швидко, що вже зараз існує потреба повного переходу на оптичний зв'язок. Активне зростання мереж при одночасному збільшенні довжини ділянок, а також розширення спектру застосування оптоволоконна призвели до того, що виникла необхідність вивчити низку факторів, які впливають на якість роботи оптичних компонентів у різних умовах їх експлуатації. Питання впливу радіаційного випромінювання на оптичне волокно набуло актуальності з потребою прокладання волоконно-оптичних кабелів зв'язку в агресивних середовищах, як-от: в активних зонах атомних станцій, для військових потреб, а також для використання в умовах космічної радіації, що є дуже перспективним і затребуваним сьогодні напрямом досліджень і для вітчизняних наукових досліджень. Але, на жаль, ця тема в українському науковому полі висвітлена незначною мірою.

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

Аналізуючи інформаційно-джерельну базу забезпечення окресленої наукової проблематики, варто відмітити, що в українському науковому середовищі питання впливу космічної радіації (радіоактивного опромінення) на оптичні системи й компоненти висвітлено надзвичайно недостатньо.

Попри те що існує перелік навчальних посібників і підручників (більш давніх і новітніх), які викладають загальні відомості про волоконну оптику, волоконно-оптичні кабелі та системи передачі даних, сучасні технології цифрових оптоволоконних мереж, серед наукових розвідок є зовсім мало досліджень, присвячених питанню радіаційної стійкості оптичного волокна; дослідження параметрів впливу іонізованого опромінювання на оптоволоконно й компонентів оптичних кабелів і систем. Дещо наближеними до теми окресленого нами наукового питання є дві публі-

кації колективу маже однакового складу авторів: «Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку» [30] і «Підвищення працездатності оптоволоконних структур в умовах високих рівнів потужності іонізуючого випромінювання». У цих статтях науковці розглядають фактори, що впливають на втрати енергії при генерації й ввіді випромінювання джерела в оптичне волокно. У першій роботі автори доходять висновку, що точність розташування сполучної площини в пристроях узгодження та взаємного розміщення випромінювачів та оптичного волокна дає можливість знизити втрати при з'єднанні й передавати інформацію з більшою надійністю без регенерації, зберігши працездатність оптоволоконної системи в умовах впливу радіаційних факторів. Друга праця поглиблює першу та пропонує розробку пристрою узгодження між джерелом та одномодовим волокном, що дає змогу компенсувати втрати потужності в лініях передач і контрольно-вимірювальних приладах під впливом радіоактивності. Досягти цього вони планують шляхом підвищення ефективності вводу випромінювання високопотужних джерел в оптичне волокно при високих рівнях затухання потужності електромагнітної хвилі. Однак зазначимо, що ці статті мають вузькоспеціалізований і вузькоприкладний характер, де вплив власне іонізованого випромінювання розглядається дуже опосередковано поряд із іншими факторами впливу. Провівши вольтамперну характеристику діодних структур із р-n-переходом, світлодіодів, лазерних діодів, фотодіодів фотоприймачів і лавинних фотодіодів під впливом штучного опромінення, автори виявили, що вплив радіації виявляється в зменшенні інтенсивності світла, що випромінюється світлодіодом, і в зниженні чутливості фотоприймача, який приймає світловий сигнал. Дослідники стверджують, що обидва ефекти викликають суттєве зниження якості сигналу, що передається по оптоволоконній лінії, зазначаючи, що при збільшенні нейтронних потоків до  $\sim 5 \times 10^{14}$  н/см<sup>2</sup> оптичні компоненти й лінія зв'язку виходять повністю з ладу. Це нині все, що пропонують вітчизняні дослідники. Як бачимо, ця проблематика в українському полі досліджень є досить скупою на розробки як теоретичного, так і практичного характеру. За відсутності достатньої кількості вітчизняних наукових досліджень і в умовах розширення спектра використання оптичних волокон ми бачимо перспективи подальшого вивчення впливу радіаційного випромінювання на оптоволоконно, що спонукало нас проаналізувати повне інформаційно-джерельне забезпечення

визначеної наукової проблеми в площині світового досвіду.

**Постановка проблеми.** Відомо, що будь-який електронний або фотонний компонент може постраждати від дії ядерного випромінювання. У разі виникнення щонайменшої несправності системи, яка базується на роботі фотонних компонентів, це суттєво вплине на якість робіт і вартість усього обладнання. Ремонт оптичних компонентів або систем у радіаційному середовищі просто немислимий через надвисокий рівень радіації. Також майже неможливо відремонтувати бортове обладнання після виведення супутника на орбіту чи старт ракетно-космічного комплексу. Саме тому важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем ще до початку виконання їх місії: визначити проблеми й уникнути їх. Для забезпечення цього варто ретельно дослідити, як іонізоване випромінювання впливає на роботу й надійність низки оптичних компонентів, над чим сьогодні працює низка науковців.

**Метою статті** є дослідження інформаційно-джерельного забезпечення проблеми впливу сонячного випромінювання (космічної радіації) на оптичне волокно; створення інформаційної бази статей і матеріалів, на які можна опиратися в ході подальших досліджень у питанні зміни параметрів компонентів волоконно-оптичних ліній зв'язку в умовах радіаційного опромінення. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати низку науково-пошукових і науково-дослідних завдань, а саме: зібрати базу загальнотеоретичних і практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики; проаналізувати цю базу, визначити найбільш цікаві та перспективні дослідження; ознайомитися з ними й узагальнити отримані дані для подальших шляхів проведення досліджень у полі окресленої проблематики.

**Виклад основного матеріалу.** Варто зазначити, що за більше ніж 20 років студювання розвитку оптоволоконних технологій учені пройшли чималий поступ, а науковий доробок зарубіжних науковців в окресленій проблематиці є значно більший. Сьогодні однозначно відомо, що дія іонізуючого випромінювання на оптичне волокно має багатофакторний характер. Учені розрізняють корпускулярні й електромагнітні іонізуючі випромінювання. Корпускулярні випромінювання представляють вплив нейтронів, протонів, електронів, альфа- й бета-частинок, а також осколків розділення ядер. До електромагнітних іонізуючих випромінювань відносять рентгенівські й гамма-випромінювання. Вплив іонізуючого опромінення

полягає в тому, що, діючи на речовину, залежно від енергії частинок викликає зміщення атомів решітки та іонізацію. Ефект зміщення полягає в змінненні з нормального положення атомів у кристалічних решітках. При цьому в структурі решітки утворюються дефекти: вакансії, міжвузлові проникнення додаткових атомів, дислокації. Ці дефекти можуть виявляти нестійкий характер, і після припинення дії радіації решітка може відновитися. Більш складні дефекти утворюються в результаті об'єднання атомів. Особливо шкідливими є поєднання дефектів з уже наявними в матеріалі домішками або з вже наявними дефектами решіток. Іонізаційні ефекти спостерігаються у вигляді змінних явищ, пов'язаних з утворенням електронно-іонних пар. Зростання числа вільних електронів та іонізованих атомів змінює електричні характеристики матеріалу. Основними джерелами енергетичних частинок, які викликають занепокоєння науковців, є такі: 1. Протони й електрони, що потрапили в радіаційні пояси Ван Аллена. 2. Важкі іони, що потрапили в магнітосферу. 3. Протони космічних променів і важкі іони. 4. Протони й важкі іони із сонячних спалахів. На рівень усіх цих джерел випромінювання впливає сонячна активність, потужність енергії якої коливається від кеВ до ГеВ і більше [28]. Тривають проекти, які вивчають радіаційні пояси Землі та зовнішній простір довкола нашої планети.

Ученими підсумовано, що довготривалі іонізуючі пошкодження через протони й електрони можуть спричинити зміну порогових показників пристроїв, збільшення споживання пристроєм енергії, зміщення часових проміжків на виконання завдань, зниження ефективності й функціональності обладнання, оптичні втрати тощо. Вони резюмують, що сьогодні вкрай важливо забезпечити справність усіх компонентів і систем, які використовуються в обладнанні, аби уникнути небезпеки поломок, недоліків роботи, необхідності подальшого ремонту, адже оптичні компоненти вже активно застосовуються в космічних апаратах різного призначення, як-от світлодіоди та фотодіоди – в оптронах [24]. У космічній галузі також використовують волоконно-оптичні гіроскопи для навігації космічних кораблів [10]. Як зондування на борту розглядалися фібро-бреггівські решітки, наприклад, у ядерних та інтелектуальних космічних силових установках [8; 25] і для космічних волоконно-оптичних систем зв'язку [15]. Різні типи оптичних волокон вивчалися для використання в космічних системах оптичного зв'язку та лазерних далекомірних системах.

У недалекій перспективі – використання бездротового оптичного зв'язку у внутрішньо супутниковому вільному просторі [23]. Атомно-енергетична промисловість також залучила різноманітні можливості застосування оптичних волокон: як для потреб зв'язку, так і для зондування [30]. Оптиковолоконні датчики вже сьогодні застосовуються для контролю температури й розподіленого температурного зондування в експериментальних реакторах і навколо них [7]. Бачимо два шляхи застосування оптичних компонентів у середовищі використання термоядерного синтезу. Перший – це оптична діагностика, що планується в роботі майбутнього Міжнародного термоядерного експериментального реактора, де запропоновано використання волоконно-оптичної спектроскопії та інфрачервоної термографії. Другий – це програма передачі даних, де волоконно-оптичні лінії пропонуються для зв'язку між віддаленими маніпуляторами та диспетчерською під час операцій з технічного обслуговування реактора ITER [20]. Знайшли своє застосування й оптичні компоненти в системах передачі даних для виконання експериментів з термоядерної фізики [17]. Так, у новому поколінні досліджень – проекти Compact Muon Solenoid (CMS) та ATLAS, що розробляються для роботи у Великому адронному колайдері, планують використовувати оптичні зв'язки з їх позитивними характеристиками високої пропускної здатності, низької потужності та стійкості до шуму [6; 19]. Вплив ядерного випромінювання на оптичне волокно, конкретніше, на діоксин кремнію, вивчається щонайменше впродовж останніх тридцяти років [30]. Від початку спостережень відомо, що оптичне волокно може бути дуже чутливим до впливу радіаційного випромінювання [16]. Так, експериментальне дослідження «Космічна радіаційна чутливість скла: перші результати у створенні всебічної бази даних коефіцієнтів доз», вивчаючи вплив гамма- та протонного випромінювання на пропускання й показники заломлення, сформувало одну з перших баз даних, яку почали використовувати для прогнозування впливу космічного випромінювання на різні оптичні системи [12]. Науковий звіт колективу дослідників «База даних дослідження впливу радіаційного впливу на оптичне волокно» підсумував масштабне дослідження впливу радіації на компоненти оптично-волоконного кабелю. Уже тоді їх експериментальні випробування вимірювали показники як стійкої реакції оптичних волокон і кабелів, що піддавалися постійному випромінюванню, так і перехідної реакції оптичних

волокон і кабелів, що зазнавали дії імпульсного випромінювання. Випробуване ними волокно сьогодні вже активно використовують [5]. Ученими встановлено, що навіть за низьких загальних доз опромінення оптичне ослаблення волокна може значно збільшитися, а його загасання значно зростає [2]. Так, у багатомодовому оптичному волокні при типовій дозі 104 Рад загасання зростає на 70 дБ/км на довжині хвилі 1300 нм, що може призвести до виходу з ладу всієї лінії зв'язку. Наслідком радіаційного опромінювання оптичного волокна також може бути поява шумів, утворення яких пов'язане зі зміною в часі рівнів загасання волокна в різних його ділянках. Ці шуми стають причиною порушення зв'язку незалежно від кінцевого рівня підвищення загасання. Експерименти показують, що в результаті іонізованого опромінення змінюються первинні оптичні параметри самого матеріалу, причому найбільших змін зазнає коефіцієнт загасання. Такий ефект зміни величини згасання називається внесеним згасанням. Досліджуючи ці параметри, група вчених розробила методику прогнозування згасання, індукованого радіацією, у низці оптичних волокон. За їхніми дослідженнями, довгострокове згасання можна спрогнозувати з точністю близько 15% за рівня гамма-променів 60 Со для потужностей доз від 100 Гр/год до 3 Гр/год [30]. Сьогодні їхніми розрахунками та їхніми результатами керуються такі дослідники. Наприклад, для випробування випромінювань оптичних волокон і систем в Інституті Фраунгофера. Перші підсумки радіаційних випробувань цього наукового підрозділу, який досліджував вплив іонізуючого випромінювання на електронні, оптоелектронні та фотонні компоненти й системи, лягли сьогодні в роботу Nuclear Effects in Electronics and Optics (NEO) у Fraunhofer INT [27]. Знання, отримані за понад 40-річний досвід у галузі, дають змогу їм нині консультувати інші компанії щодо кваліфікації випромінювання та зміцнення компонентів і систем, а також для розробки нових систем датчиків випромінювання. Ученими досліджено механізм виникнення внесеного загасання: при впливі іонізованого випромінювання в матеріалі скловолокна виникають процеси зміщення, що створюють описані вище дефекти решітки. Крім того, у вихідному матеріалі вже можуть існувати такі дефекти. Під впливом випромінювання на цих дефектах створюються електрони провідності й дірки, комбінації яких із вакансіями утворюють так звані центри фарбування, формування яких суттєво погіршують оптичні властивості

оптоволокна [9]. Через те що центри фарбування можуть поглинати фотони, які несуть інформацію на певних довжинах хвиль і можуть зникати в результаті теплових або оптичних процесів, з'являється додаткове загасання. Явище додаткового загасання називають унесеним загасанням. Установлено, що внесене загасання зменшується за більшої довжини оптичних хвиль. Так, на основі спричиненого гамма-випромінюванням загасання в Р-легованих волокнах відзначено чотири піки поглинання у видимій ділянці (470, 502, 540 і 600 нм) (інтегральна доза <math><2,0\text{ Гр}</math>). Науковцями відмічено, що індуковані радіацією втрати при 470 і 600 нм сильно залежать від потужності дози. При потужності дози 0,2 та 0,5 Гр/хв індукована втрата виявляє нелінійне відношення до загальної дози, при високій потужності дози (1,0 Гр/хв) і низькій дозі (0,1 Гр/хв), схоже, існує лінійна залежність від загальної дози [29]. Тобто величина внесеного загасання залежить від потужності дози опромінення. Розглядаючи загасання як функцію загальної дози, потужності дози, потужності світла й температури, учені дослідили явище загасання в дванадцяти одномодових оптичних волокнах при 1310 нм і 1550 нм. Серед зразків, що піддалися дії гамма-променів  $^{60}\text{Co}$  та дії поля високоенергетичного випромінювання, F-леговане стійке до випромінювання волокно SM від компанії Fujikura Ltd. продемонструвало надзвичайну толерантність – низьке загасання при 1310 нм, яке не перевищує 5 дБ/км навіть після загальної дози 1 МГр. У результаті цього експерименту виробником виготовлено 2500 км цього типу волокна. Учені ж заявили, що виконані вимірювання ще не дають повного розуміння основних механізмів загасання, але експериментально доведено, що концентрація легуючих речовин є одними з ключових факторів. Зменшення в часі й розмірі внесеного загасання говорить про процес відновлення загасання. Так, вимірюючи загальний ступінь залежності концентрацій радіаційно-індукованих центрів дефектів від дози опромінення, автори дослідження «Дефекти скла, індуковані радіацією: походження ступеню залежності концентрації від дози» при тестуванні діоксин-кремнієвого оптоволокна, легovanого германієм, детально спрогнозували криві пострадіаційного відновлення загасання [14]. Розвідка «Стійкість специфічних оптичних волокон до випромінювання, що зазнають дії іонізуючого випромінювання 650 кГр (Si)» виявила чіткі докази того, що після закінчення опромінення є очевидне відновлення загасання, але підтвердила, що майже відразу при повторному опроміненні з'являються

нові пошкодження. З порівнянь опромінення двох зразків одного й того ж багатомодового волокна, виконаного в однакових умовах, крім рівнів освітленості, вони дійшли висновку, що існують чіткі докази фотовідбілювання [1]. Унесене загасання, а також ступінь його відновлення характеризують радіаційну стійкість волокна. Питання розробки й випробування радіаційно-стійкого волокна цікаве й актуальне донині. Так, на шляху до розробки стійких до випромінювання хвилеводів із чистого діоксиду кремнію, а також легovanних науковці провели низку спостережень процесів пошкодження оптичних матеріалів радіоактивним випромінюванням [9]. Дослідження «Радіаційна стійкість наявних оптичних волокон» [16] установило співвідношення рівня втрат, спричиненого іонізованим випромінюванням, залежно від типу волокна, довжини хвилі, температури, потужності світла, потужності дози й типу випромінювання. Результати цих випробувань вразили. На основі опромінення гамма-променями та нейтронами одномодового (SM), багатомодового (MM SI) і полімерних оптичних волокон (POF) установлено таке: 1. Безперервне  $^{60}\text{Co}$  гамма-опромінення SM волокон з дозовою потужністю близько 1,5 Гр/с до кінцевої дози 106 Гр призводить до індукованих радіацією втрат лише від 0,85 до 1,3 дБ/10 м при довжині хвилі 1300 нм і температурі близько 30 °С. 2. Волокна ГІ мали втрати від 1,3 до 2 дБ/10 м за таких же умов. 3. Волокна MM SI з чистим сердечником  $\text{SiO}_2$  з високим умістом OH – близько 0,15 дБ/10 м, приблизно 850 нм і близько 0,1 дБ/10 м, близько 1060 нм (106 Гр, 30°С) продемонстрували найнижчі втрати. 4. POF із серцевиною з поліметилметакрилату також виявили збільшення втрат <math><EQ 0,1\text{ дБ/10 м}</math> (670 нм, кімнатна температура), але лише до значень гамма дози <math><EQ 800\text{ Гр}</math>. Проведено вивчення ролі легуючих елементів фтору (F) та германію (Ge) на радіаційну чутливість скла на основі кремнезему – «Ефекти випромінювання на заготовки на основі діоксиду кремнію та оптичні волокна» [13]. Результати іншого дослідження показали, що найкращу радіаційну стійкість має леговане фтором і термооброблене оптичне волокно (радіаційні втрати становлять близько 20 дБ/м у видимому діапазоні після опромінення нейтронами  $1\times 10^{23}\text{ н/м}^2$ ) [38]. Дані цього дослідження свідчать про те, що такі волокна можуть використовуватися дуже наближено до палаючої плазми для її діагностики та дистанційного зондування. Стаття «Радіаційна стійкість специфічних багатомодових та одномодових оптичних волокон при -25°С

перевищує повну дозу SLHC до дози 500 кГр (Si) виявила, що з низки потенційних одномодових і багатомодових оптичних волокон одномодове волокно DrakaElite Super RadHard та одномодові волокна Fibre X показують себе дуже добре, інші ж волокна дуже швидко показують високий рівень поглинання [18]. Сьогодні визначено такі параметри, які впливають на реакцію оптичного волокна на іонізуюче випромінювання: 1. Склад волокна та спосіб виготовлення. 2. Тип опромінення, потужність дози, загальна доза. 3. Температура, діаметр обгортки волокном. 4. Його термічна обробка й історія опромінення. 5. Довжина та потужність оптичної хвилі. 7. Час, що минув між експозицією та вимірюванням.

Таким чином, розглядаючи параметри внесеного згасання в оптичних волокнах, першочергово треба чітко визначити: який тип волокна та склад скла задіяні; які умови середовища й на якій довжині хвилі вимірюються значення. Залежність унесеного загасання та його часової характеристики від дози випромінювання, типу впливу випромінювання для різних видів волокон є досить різноманітною і становить чималий інтерес для наступних досліджень. У цьому сьогодні полягає перспектива подальших досліджень тестування різних видів оптоволокон. Так, у полі зору новітніх досліджень – вивчення оптичних волокон із новими типами конструкцій серцевин, стійких до випромінювання. Говориться про те, що нині вибір радіаційно-стійких волокон варто розглядати разом з іншими параметрами, такими як траса волокна в середовищі з високим випромінюванням, робоча довжина хвилі та потужність, а також продуктивність інших електронних компонентів у мережі для оптимізації загальної продуктивності мережі в середовищах із високим випромінюванням. Так, роботи японських учених «Техніка зондування з використанням оптичних волокон під високою дозою радіації [21] та «Розробка методики дистанційного зондування з використанням радіаційно-стійких оптичних волокон в умовах високої радіації» [22] піддають випробуванням стійке до випромінювання оптичне волокно, що вже використовується для дослідження внутрішніх приміщень посудин під тиском реактора й резервуарів для первинного утримання на АЕС Фукусіма-Даїчі. Радіаційну

стійкість оптичного волокна покращено за рахунок збільшення кількості гідроксили до 1000 ppm у чистому кремнеземному волокні.

**Висновки.** Зібрана база загальнотеоретичних і практичних матеріалів у полі окресленої наукової тематики та її аналіз дали змогу нам визначити найбільш цікаві й перспективні дослідження. Ознайомившись із ними й узагальнивши отримані дані, ми дійшли таких висновків:

1. Оптичні волоконні кабелі, розміщені на атомних електростанціях та інших середовищах із високим випромінюванням, таких як космічне середовище, фізичне середовище високих енергій і військові програми, повинні мати можливість підтримувати свою функціональність навіть при високому рівні кумулятивного радіаційного опромінення, адже стандартні оптичні волокна під час опромінення можуть зазнати непоправних фізичних змін, що призведуть до істотного їх ослаблення навіть при незначних дозах опромінення.

2. Щоб забезпечити надійну волоконно-оптичну мережу в середовищах із високим випромінюванням, необхідно проводити подальші випробування, аби переконатися, що зміни оптичних волокон або кабельних матеріалів не збільшують ослаблення та що функціональність мережі не порушується.

3. Правильний підбір оптичних волокон і кабелів для розгортання в середовищах із високим випромінюванням вимагає врахування багатьох змінних. Вплив ослаблення, спричиненого випромінюванням, на продуктивність волокна необхідно враховувати та визначати кількісно з урахуванням передбачуваної дози, потужності дози, довжини хвилі й інших умов навколишнього середовища, що існують для волокна.

4. На додаток до впливу ослаблення, спричиненого випромінюванням, волокна, які будуть розгортатися в середовищах із високим випромінюванням, також повинні характеризуватися за іншими критеріями оптичної продуктивності, такими як сумісність сплайсингу та пропускна здатність, а також міцність волокна.

5. Дослідження радіаційно-стійкого волокна має подальші перспективи, ураховуючи розширення шляхів і можливостей його подальшого застосування.

#### Список літератури:

1. The radiation tolerance of specific optical fibres exposed to 650 kGy (Si) of ionizing radiation / B. Arvidsson, K. Dunn, C. Issever, B.T. Huffman, M. Jones, J. Kierstead, G. Kuyt, T. Liu, A. Povey, E. Regnier, A.R. Weidberg, A. Xiangf, J. Yef. *Journal of Instrumentation*. 2009. Vol. 4. P. 07010. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/4/07/P07010/pdf> (дата звернення: 01.06.2021).

2. Trends in Optical Fibre Metrology and Standards / F. Berghmans, O. Deparis, S. Coenen, M. Decréton, P. Jucker ; Ed. by Soares O. D. D. NATO ASI Series. E. : Applied Sciences, 1995. № 285. P. 131–156.
3. Brichard B., Fernandez A.F. Conference RADECS 2005, Short Course Notebook – New challenges for Radiation Tolerance Assessment / Ed. by Fernandez A. F. Cap d'Agde, 2005. P. 95–137.
4. Burkitt-Gray A. SDN fibre/satellite carrier plans to start services in first half of 2021. *Capacity*. 21 July 2020. URL: <https://www.capacitymedia.com/articles/3825997/sdn-fibre-satellite-carrier-plans-to-start-services-in-first-half-of-2021> (дата звернення: 01.06.2021).
5. Fiber Optic Data Bus Radiation Effects Study / A.B. Campbell, E.J. Frieble, P.W. Marshall, G.P. Summers, Y.J. Chen. Naval Research Laboratory : Washington, 1992. 91 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/235060324\\_Fiber\\_Optic\\_Data\\_Bus\\_Radiation\\_Effects\\_Study](https://www.researchgate.net/publication/235060324_Fiber_Optic_Data_Bus_Radiation_Effects_Study) (дата звернення: 01.06.2021).
6. CMS Outreach. URL: <http://cmsinfo.cern.ch/outreach/> (дата звернення: 01.06.2021).
7. Temperature monitoring of nuclear reactor cores with multiplexed fiber Bragg grating sensors / A.F. Fernandez, A.I. Gusarov, B. Brichard, S. Bodart, K. Lammens, F. Berghmans, M.C. Decreton, P. Megret, M. Blondel, A. Delchambre. *Optical Engineering*. 2002. № 41. P. 1246–1254.
8. Fielder R.S., Klemer D., Stinson-Bagby K.L. High neutron fluence survivability testing of advanced fiber Bragg grating sensors. *AIP Conference Proceedings*. 2004. № 699. P. 650–657. URL: <https://doi.org/10.1063/1.1649627> (дата звернення: 01.06.2021).
9. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics / E.J. Friebele, K.J. Long, C.G. Askina, M.E. Gingerich, M.J. Marrone, D.L. Griacom. *SPIE Proceedings*. 1985. Vol. 0541. URL: <https://doi.org/10.1117/12.975360> (дата звернення: 01.06.2021).
10. Friebele E.J., Wasserman L.R. Development of Radiation-Hard Fiber for IFOGs. *18th International Optical Fiber Sensors Conference Technical Digest*, ME2. Washington DC, 2006.
11. Overview Of Radiation Effects In Fiber Optics / E.J. Friebele, K.J. Long, C.G. Askina, M.E. Gingerich, M.J. Marrone, D.L. Griacom. *SPIE Proceedings*. 1985. Vol. 0541. URL: <https://doi.org/10.1117/12.975360> (дата звернення: 01.06.2021).
12. Space radiation sensitivity of glasses: first results toward a comprehensive dose coefficients database / M. Fruit, A.I. Gusarov, D.B. Doyle, G.J. Ulbrich, A. Hermanne. *SPIE Proceedings*. 2000. Vol. 4134.
13. Radiation Effects on Silica-Based Preforms and Optical Fibers-I: Experimental Study With Canonical Samples / S. Girard, Y. Ouerdane, G. Origlio, C. Marcandella, A. Boukenter, N. Richard, J. Baggio, P. Paillet, M. Cannas, J. Bisutti, J.P. Meunier, R. Boscaino. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2008. № 55. P. 3473–3482.
14. Griscom D.L., Gingerich M.E., Friebele E.J. Radiation-induced defects in glasses: Origin of power-law dependence of concentration on dose. *Physical Review Letters*. 1993. № 71. P. 1019–1022. URL: <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1019> (дата звернення: 01.06.2021).
15. Fiber Bragg gratings as a candidate technology for satellite optical communication payloads: radiation-induced spectral effects / A.I. Gusarov, D.B. Doyle, N. Karafolas, F. Berghmans. *SPIE Proceedings*. 2000. Vol. 4134. P. 253–260.
16. Henschel H. Radiation hardness of present optical fibers. *SPIE Proceedings*. 1994. Vol. 2425. P. 21–31. URL: <https://doi.org/10.1117/12.198638> (дата звернення: 01.06.2021).
17. Fibre optic radiation sensor systems for particle accelerators / H. Henschel, M. Körfer, J. Kuhnenn, U. Weinand, F. Wulf. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*. 2004. № 526. P. 537–550 (дата звернення: 01.06.2021).
18. The radiation hardness of specific multi-mode and single-mode optical fibres at -25°C beyond a full SLHC dose to a dose of 500 kGy(Si) / B.T. Huffman, C. Issever, N.C. Ryder, A.R. Weidberg. *Journal of Instrumentation*. 2010. № 5. P. 11023. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1748-0221/5/11/C11023> (дата звернення: 01.06.2021).
19. Development of a displacement sensor for the CERN-LHC superconducting cryodipoles / D. Inaudi, B. Glisic, S. Fakra, J. Billan, S. Redaelli, J.G. Perez, W. Scandale. *Measurement Science and Technology*. 2001. № 12. P. 887–896.
20. ITER. URL: <http://www.iter.org> (дата звернення: 01.06.2021).
21. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ishikawa Takashi, Ito Keisuke and oth. Development of Remote Sensing Technique Using Radiation Resistant Optical Fibers under High-Radiation Environment Conference. *Proceedings of the Second International Symposium on Radiation Detectors and Their Uses*. 2018.
22. Ito Chikara, Naito Hiroyuki, Ohba Hironori, Saeki Morihisa and oth. In-Vessel Inspection Probing Technique Using Optical Fibers Under High Radiation Dose. *22nd International Conference on Nuclear Engineering, Prague, Czech Republic*. July, 2014.
23. Proton radiation effects in high power LEDs and IREDs for optical wireless links for intra-satellite communications / J.J. Jimenez, M.T. Alvarez, R. Tamayo, J.M. Oter, J.A. Dominguez, I. Arruego, J. Sanchez-Paramo, H. Guerrero. *IEEE Radiation Effects Data Workshop*. Workshop Record. IEEE, 2006. P. 77–84.

24. Johnston A.H., Rax B.G. Proton damage in linear and digital optocouplers. *IEEE Transactions on Nuclear Science*. 2000. № 47 (3). P. 675–681.
25. Juergens J., Adamovsky G. Performance Evaluation of Fiber Bragg Gratings at Elevated Temperatures. *SPIE Proceedings*. 2004. Vol. 5272.
26. Application of a Raman distributed temperature sensor to the experimental fast reactor joyo with correction techniques / A. Kimura, E. Takada, K. Fujita, M. Nakazawa, H. Takahashi, S. Ichige. *Measurement Science and Technology*. 2001. № 12. P. 966–973.
27. Kuhnhenh J., Metzger S., Henschel H. Radiation testing of optical fibres and systems at Fraunhofer Institute. *ESA-NASA working meeting on Optoelectronics*. 2005. № 10.
28. Lauenstein J.-M., Barth J.L. Radiation Belt Modeling for Spacecraft Design: Model Comparisons for Common Orbits. GSFC.NASA.GOV. URL: [https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec05\\_w16.pdf](https://radhome.gsfc.nasa.gov/radhome/papers/nsrec05_w16.pdf) (дата звернення: 02.06.2021).
29. Gamma ray radiation induced visible light absorption in P-doped silica fibers at low dose level / P. Lu, X. Bao, N. Kulkarni, K. Brown. *Radiation Measurements*. 1999. № 30. P. 725–733. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1350448799002334> (дата звернення: 02.06.2021).
30. Підвищення ефективності оптоволоконних каналів зв'язку / I. Nevlyudov, V. Malik, O. Tokareva, V. Nevlyudova. *Системи управління, навігації та зв'язку* : збірник наукових праць. Полтава : ПНТУ, 2020. Т. 1 (59). С. 151–154. URL: [doi:https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151](https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.1.151) (дата звернення: 02.06.2021).

### **Blazhennyi N.V. INFLUENCE OF SOLAR RADIATION (COSMIC RADIATION) ON OPTICAL COMMUNICATION LINE: SOURCES' REVIEW**

*The active growth of networks with the simultaneous increase in the length of sections, as well as the expansion of the spectrum of fiber optic applications, has led to the need to study a number of factors affecting the quality of optical components under various conditions of their operation. It's known that any electronic or photonic component can be affected by nuclear radiation. In the case of the slightest failure of a system based on the operation of photonic components, it will significantly affect the quality of work and the cost of the entire equipment. Repairing optical components or systems in a radiation environment is simply unthinkable through ultra-high levels of radiation. It's also almost impossible to repair onboard equipment after a satellite is put into orbit or a rocket and space complex is launched. This is why it's important to ensure that all components and systems are in good working condition before their mission begins – to identify problems and avoid them. To ensure this, the way ionized radiation affects the performance and reliability of a number of optical components should be thoroughly investigated, and number of scientists are working on today on this. The purpose of this article is to study the information and background support of the problem of the influence of solar radiation (cosmic radiation) on optical fiber; the creation of an information base of articles and materials, which can be relied on in further research in the issue of changes in the parameters of components of fiber-optic communication lines under conditions of radiation irradiation. The article comprehensively studies the information and background support of the scientific problem of the influence of solar radiation (cosmic radiation) on optical fiber. Based on review of materials of Ukrainian and foreign authors, the information base of articles and materials is created, which can be relied on in the course of further research in the issue of changing the parameters of components of fiber-optic communication lines under conditions of radiation irradiation.*

**Key words:** optical fiber, fiber-optic communication line, radiation exposure, radiation-resistant optical fiber, ionizing radiation, substitution effect, ionization effects, noise, extinction.

**Козюба М.М.**

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

**Гребенюк А.М.**

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

## ОСОБЛИВОСТІ СТВОРЕННЯ ПРОТОТИПІВ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ ЕЛЕКТРОННИХ ВИРОБІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВЕРСТАТА “PROTOMAT M60”

*У статті розглядається та обґрунтований спосіб оперативного виготовлення за допомогою верстата “ProtoMat M60” прототипів друкованих плат із металізацією перехідних отворів друкованих плат електронних виробів, які максимально відповідають параметрам серійних зразків виробів. Запропоновано й освоєно хімічне й гальванічне наросування міді в перехідних отворах і на контактних площинках прототипів друкованих плат. Крім того, для створення якісних і надійних паяних з’єднань між выводами електронних компонентів і контактними площинками друкованих плат запропоновано й освоєно нанесення фінішного покриття «гальванічне олово-вісмут».*

*Такий спосіб дозволяє виготовляти прототипи двосторонніх друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності й металізацією перехідних отворів і контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут товщиною покриття 10–20 мікрон.*

*Фінішне гальванічне покриття олово-вісмут забезпечує високу площинність контактних площинок прототипів друкованих плат і дозволяє проводити монтаж мініатюрних електронних компонентів із малим кроком виводів. Товщина фінішного гальванічного покриття, більша за 10 мікронів, запобігає утворенню інтерметалевих прошарків, більших за 1 мікрон, у паяних з’єднаннях. Крім того, таке покриття має високу механічну міцність, стійкість до стирання та до негативного впливу навколишнього середовища. Усі вище перераховані фактори дозволяють проводити монтаж широкої номенклатури електронних компонентів на прототипи друкованих плат електронних виробів за технологією групового поверхневого монтажу з оплавленням паяльної пасти на обох сторонах друкованої плати й забезпечити високу якість і надійність паяних з’єднань. Зокрема, така технологія дозволяє проводити монтаж електронних компонентів із безсвинцевими покриттями виводів за температур пайки 230–240° С.*

*Надійність отриманих паяних з’єднань у прототипах друкованих плат електронних виробів підтверджена успішним проведенням багаторазових кліматичних, вібраційних, термоциклічних та ударних випробувань із позитивним результатом.*

**Ключові слова:** друковані плати, фінішне гальванічне покриття олово-вісмут, електронні компоненти, контактні площинки, перехідні отвори, паяльна паста, поверхневий монтаж.

**Постановка проблеми.** Для утримування лідерських позицій на ринку електронних виробів, виробники повинні випускати нові продукти, в короткі терміни. Як правило, основою електронного виробу є друкована плата. В Україні в основному виготовляються двосторонні друковані плати 4–5 класу точності з фінішним покриттям хімічне олово товщиною 1 мікрон. Для швидкого освоєння нових виробів необхідно в короткі терміни виготовити та оптимізувати від одного до декількох прототипів друкованих плат серійного зразка електронного виробу. Термінове замовлення та виготовлення декількох одиниць прототипів друкованих плат у виробників друкованих

плат має велику собівартість. Оскільки створення друкованої плати серійного зразка є процесом творчим, розробнику може знадобитися декілька прототипів друкованих плат. Отже, процес створення прототипу друкованої плати серійного зразка може мати термін понад 1 місяця та високу собівартість.

Верстат “ProtoMat M60” швидкісна система виготовлення прототипів друкованих плат дозволяє проводити такі операції: фрезерування топології поверхні заготовки друкованої плати, свердлування отворів, фрезерування вікон s пазів, обрізання по контуру згідно з проектною документацією. Технічні характеристики “ProtoMat M60”



дають можливість виготовляти прототипи друкованих плат з такими характеристиками [1, с. 52]:

- мінімальна ширина провідника – 0,1 мм;
- мінімальний зазор між провідниками – 0,1 мм;
- мінімальний діаметр свердлування – 0,2 мм.

Верстат “ProtoMat M60” дозволяє швидко виготовляти прототипи друкованих плат без підготовки поверхні заготовки. Такі прототипи друкованих плат не враховують всіх електричних характеристик серійних зразків електронного виробу (перехідний опір, паразитні ємності й індуктивності). Для наближення прототипів друкованих плат до серійних зразків електронних виробів запропоновано використання хіміко-гальванічних процесів для виконання металізації перехідних отворів і поверхні заготовки друкованих плат: хімічної міді, гальванічної міді й хімічного олова й фінішного гальванічного покриття олово-вісмут.

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

Технологія створення якісних прототипів друкованих плат електронних виробів висвітлена в публікаціях таких авторів, як П. Лунд [2], Х.-И. Ханке, Х. Фабиан [3], Є.В. Пірогова [7], М. Махмудов [8] та стандарті [5] і галузевому стандарті [6].

Розвиток сучасної електронної апаратури базується на мініатюризації, підвищенні ефективності використання матеріалів і зменшенні матеріаломісткості, поліпшенні якості й надійності виробів. Вирішення цих завдань можливе за використання сучасної елементної бази й технології монтажу на поверхню, що дозволяє підвищити щільність монтажу від 4 до 6 разів [4, с. 6].

Забезпечити зменшення ваги й габаритних розмірів друкованих вузлів виробів електронних виробів можна за допомогою двобічного монтажу електронних компонентів на друковані плати.

Виготовлення макетів друкованих плат без металізації перехідних отворів складається з таких етапів:

1. Обробка інформації РСВ-файла за допомогою програм CircuitCAM, BordMaster.
2. Підготовка заготовки.
3. Свердлування отворів.
4. Фрезерування поверхні (у разі двосторонньої друкованої плати – фрезерування з двох сторін).
5. Фрезерування по контуру.

Для електричного з’єднання рисунків провідників двосторонніх друкованих плат без металізації перехідних отворів застосовують такі методи:

- впаювання проволочки або штифтів;
- запресовування порожнистих заклепок за допомогою додаткового пристрою LPKF EasyContac.

Друковані плати виготовлені без металізації перехідних отворів комбінованим методом мають низьку надійність із таких причин:

- у металізованому отворі проводиться тільки одне паяне з’єднання тоді як при використанні порожнистих заклепок їх необхідно три: припаювання заклепки з провідниковою доріжкою з двох сторін заготовки та припаювання контактного виводу електронного компонента [1, с. 165; 7, с. 163]. Збільшення кількості паяних з’єднань в одному знакомісці зменшує надійність такого з’єднання та значно збільшує розміри контактної площинки. Так, за необхідності мати внутрішній діаметр отвору 0,5 мм, – зовнішній діаметр заклепки, а значить і отвору під заклепку, становитиме 0,8 мм, що на 0,3 мм більше, тому тенденцію на мінімізацію розмірів друкованих плат важко виконати;

- впаювання дротів, штифтів і заклепок може привести до зміни параметрів електричної схеми (паразитні ємності та індуктивності) при проектуванні друкованих плат із щільним розташуванням компонентів. Особливо це важливо під час проведення налагодження виробів, де є необхідність проведення заміни електронних компонентів. Крім того попереднє впаювання дротів, штифтів і заклепок зменшує надійність паяних з’єднань готового друкованого вузла електронного виробу, оскільки збільшується кількість пайок.

**Постановка завдання.** Отже, метою статті є вибір швидкого способу (методу) створення прототипів якісних друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності з металізацією перехідних отворів та контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут та аналіз можливостей використання цього способу для проведення операцій групового поверхневого монтажу електронних компонентів включаючи компоненти з безсвинцевими покриттями виводів та оцінити надійність паяних з’єднань в таких платах.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Існують механічні й хімічні способи виготовлення прототипів друкованих плат. Механічний спосіб забезпечує видалення шару фольгованої міді фрезою по заданій програмі. Хімічний спосіб ґрунтується на травленні фольгованої міді хімічними розчинами. Для отримання хімічним способом топологічного рисунка на заготовці прототипу друкованої плати, який би відповідав інформації РСВ-файлу, необхідно виготовити фотошаблон (провести п’ять технологічних операцій), покрити заготовку світло чутливою плівкою (провести шість технологічних операцій), провести

фото експонування, виконати ще цілий ряд операцій, в тому числі і хімічне покриття міддю, гальванічне покриття міддю та олово-вісмутом, щоб витравити мідне покриття заготовки хімічним методом. [5; 6]. Авторами в роботі використовувалась комбінована технологія: механічне фрезерування та свердлування та хімічне нарощування шарів металізації. При виготовленні прототипів друкованих плат автори використовували готовий двосторонній фольгований склотекстоліт марки FR-4 товщиною від 0,5 до 2,0 мм різних виробників. Найкраще себе зарекомендував склотекстоліт FR-4, виготовлений в Німеччині та Чехії. Якість цього матеріалу відповідає стандарту IPC4101B, системи управління якістю виробників, підтверджена міжнародними сертифікатами ISO 9001:2000. FR-4 – склотекстоліт класу вогнетривких 94V-0 має високу механічну міцність та хімічну стійкість.

Високе значення адгезії фольги до основи діелектрика та високе значення об'ємного й поверхневого електричного опору, стабільність геометричних розмірів дозволяє застосовувати склотекстоліт FR-4 під час проведення операцій монтажу навіть безсвинцевих електронних компонентів.

Нами були опрацьовані режими фрезерування та свердлування фольгованого склотекстоліту FR-4 виробництва фірми “Isola”, Німеччина, які дозволили виготовляти топологічні елементи 100 мікрон на прототипах друкованих плат товщиною від 0,5 мм до 2 мм.

Технічні характеристики отриманих гальванічних покриттів дозволяють проводити груповий монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст.

Виготовлення прототипів друкованих плат із металізацією перехідних отворів складається з таких етапів:

1. Обробка інформації PCB-файла за допомогою програм CircuitCAM, BordMaster.

2. Етап базового методу виготовлення друкованих плат:

– підготовка поверхні заготовки (фольгованого міддю склотекстоліту);

– покриття заготовки бакелітовим лаком.

3. Свердлування отворів на верстаті “ProtoMat M60”.

4. Етап базового методу виготовлення друкованих плат:

– хіміко-механічна підготовка поверхні отворів;

– хімічна металізація отворів (активація хлористим паладієм, хімічна мідь);

– зняття бакелітового лаку;

– хімічна підготовка поверхні заготовки (знежирювання, активація соляною кислотою);

– електролітичне міднення;

– електролітичне нанесення сплаву олово-вісмут.

3. Фрезерування заготовки поверхні прототипу друкованої плати на верстаті “ProtoMat M60” (створення рисунка топології друкованої плати).

4. Фрезерування прототипу друкованої плати по контуру на верстаті “ProtoMat M60”.

5. Коректування рисунка під мікроскопом.

Такий спосіб дозволяє виготовляти прототипи друкованих плат із такими характеристиками:

– товщина хімічної міді в перехідних отворах – 1 мікрон;

– товщина гальванічної міді в перехідних отворах – 25 мікронів;

– товщина хімічного покриття олова 1 – мікрон;

– товщина фінішного гальванічного покриття олово-вісмут – 10–20 мікрон;

– температура плавлення фінішного гальванічного покриття олово-вісмут – 220–225° C;

– фінішне гальванічне покриття олово-вісмут з товщиною не менше 9 мікронів зберігає паяємість протягом 1 року без використання додаткових підшарів покриття та додаткового оплавлення;

– фінішне гальванічне покриттям олово-вісмут забезпечує високу плоскісність контактних площинок прототипів друкованих плат і дозволяє проводити монтаж мініатюрних електронних компонентів із малим кроком виводів;

– товщина фінішного гальванічного покриття понад 10 мікронів запобігає утворенню інтерметалевих прошарків понад 1 мікрона в паяних з'єднаннях. Крім того, таке покриття має високу механічну міцність, стійкість до стирання та до негативного впливу навколишнього зовнішнього середовища.

Нами були опрацьовані режими фрезерування та свердлування фольгованого склотекстоліту FR-4 виробництва фірми “Isola”, Німеччина, які дозволили виготовляти топологічні елементи 100 мікронів на прототипах друкованих плат товщиною від 0,5 мм до 2 мм.

Технічні характеристики отриманих гальванічних покриттів дозволяють проводити груповий монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти

в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст.

Якщо виготовлення прототипу друкованої плати без металізації отворів займає близько одного-двох робочих днів, то виготовлення друкованої плати з металізацією отворів, згідно з технологією виготовлення друкованих плат базовим методом, близько трьох робочих днів. Такий спосіб металізації отворів в порівнянні з іншими методами має ряд переваг:

- суттєво підвищується надійність паяних з'єднань шляхом того що припій під дією капілярного ефекту при відповідному виборі діаметру заповнює весь перехідний отвір. Крім цього досягається хороша електрична та механічна стабільність паяного з'єднання при відносно малій контактній площинці, що є важливим для зменшення малогабаритних характеристик друкованих вузлів. Міцність на розривання виводів елементів у місцях пайки їх на контактні площинки і на металізований отвір – більша на отворах [1, с. 164];

- виключення дротів для монтажу перехідних отворів забезпечує підвищену надійність паяних з'єднань під час вібраційних, ударних та кліматичних випробувань [1, с. 162];;

- товщина гальванічної міді в перехідних отворах у 25 мікронів зменшує розтріскування покриття, а отже збільшує надійність вузла;

- товщина фінішного покриття олово-вісмут у 10–20 мікронів зменшує утворення інтерметалевого прошарку в паяному з'єднанні та підвищує його надійність.

Для порівняння вартість хімічного нанесення покриття олово-вісмут буде меншою за гальванічне нанесення покриття олово-вісмут. Якщо порівняти такі характеристики хімічного та гальванічного олова як товщина, термін зберігання, здатність до швидкого росту інтерметалевих прошарків в самому покритті то гальванічне олово має перевагу перед хімічним, особливо це стосується електронних виробів відповідального призначення.

Такий спосіб виготовлення прототипів двосторонніх друкованих плат з металізацією перехідних отворів і контактних площинок гальванічним оловом товщиною 10–20 мікронів дозволив авторам виготовляти прототипи друкованих плат із такими характеристиками:

- мінімальна ширина провідника – 0,1 мм;
- мінімальний зазор між провідниками – 0,1 мм;
- мінімальний діаметр перехідного отвору з металізацією – 0,3 мм;
- габаритні розміри – 540 x 375 мм.

Перевагами цього способу є висока точність виготовлення провідників, зазорів та перехідних отворів; одночасне свердлування перехідних отворів та висока зставність обох сторін друкованої плати у випадку двосторонньої плати.

Використання прототипів друкованих плат дає можливість конструктору оперативно перевірити схемотехнічні рішення, протестувати плати та при необхідності в короткі терміни внести зміни в конструкцію електронного вузла.

Ця технологія була використана при виготовленні більше 100 друкованих плат для електронних виробів. Монтаж прототипів друкованих плат з обох їх сторін проводився за технологією групового поверхневого монтажу використовуючи спосіб оплавлення паяльної пасти в конвекційній печі навіть за температурними профілями оплавлення безсвинцевих паяльних паст. Прототипи друкованих вузлів готових електронних виробів і пройшли термоциклічні, вібраційні й ударні випробування. Відмов паяних з'єднань друкованих вузлів не було.

Отже, така технологія дозволяє в короткі терміни виготовити прототипи двосторонніх друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності й металізацією перехідних отворів і контактних площинок фінішним гальванічним покриттям олово-вісмут товщиною покриття 10–20 мікронів для дослідних зразків електронних виробів навіть відповідального призначення.

**Висновки.** Отримані результати дозволяють проводити монтаж широкої номенклатури електронних компонентів на прототипах друкованих платах двобічним груповим поверхневим монтажем електронних компонентів з оплавленням паяльної пасти на обох сторонах плати одночасно, та забезпечити їх високу якість та надійність. Створення технології виготовлення прототипів дослідних та серійних зразків друкованих плат 4 класу з елементами 5 класу точності з металізацією отворів з використанням етапів базового методу, дозволяє швидко отримати за допомогою верстата "ProtoMat M60" діючі дослідні й серійні зразки друкованих вузлів навіть змонтованих за безсвинцевою технологією. Особливо це важливо коли необхідно внести зміни до конструкції дослідних зразків виробів, які пройшли випробування та є нагальна потреба їх доопрацювання.

Прототипи електронних вузлів виготовлені за вищезгаданою технологією, успішно пройшли кліматичні, вібраційні, термоциклічні випробування та ударні випробування з позитивним результатом.

**Список літератури:**

1. Інструкція з експлуатації: LPKF Laser Electronics AG, Manual, ProtoMat M60.
2. Лунд П. Прецезионные печатные платы: Конструирование и производство / Перевод с английского. Москва : Энергоатомиздат, 1983. 360 с.
3. Ханке Х.-И., Фабиан Х. Технология производства радиоэлектронной аппаратуры / Перевод с немецкого ; Под редакцией В.Н. Черняева. Москва : Энергия, 1980. 464 с.
4. Грачев А.А., Мельник А.А., Панов Л.И. Поверхностный монтаж при конструировании и производстве электронной аппаратуры. Черкасы : McLaut Издатель Чабаненко Ю.А., 2004. 428 с.
5. ГОСТ 23752-79. ПЛАТЫ ПЕЧАТНЫЕ. Общие технические условия. [Скасований без заміни 2018-01-01. Використовується як довідковий матеріал]. Москва, 1991. 32 с.
6. ОСТ.4.054.060-82. Отраслевой стандарт. Платы печатные. Типовые технологические процессы. 41 с.
7. Пирогова Е.В. Проектирование и технология печатных плат. Учебник. Москва : ФОРУМ: ИНФРА, 2005. 569 с.
8. Махмудов М. Механическая обработка печатных плат. Москва : Радио и связь, 1986. 72 с.

**Hrebeniuk A.M., Kozyuba M.M. REDUCING FEATURES OF PROTOTYPING PRINTED CIRCUIT BOARDS OF ELECTRONIC PRODUCTS USING THE “PROTOMAT M60” MACHINE**

*The article discusses and substantiated the method of prompt manufacturing prototypes of printed circuit boards using the machine “ProtoMap M60” with the subsequent metallization of vias of printed circuit boards of electronic products which correspond to the maximum parameters of serial samples of products. Proposed and mastered galvanic build-up of copper in vias and on contact areas of prototypes of printed circuit boards. In addition, to create high-quality and reliable soldered connections between the terminals of electronic components and contact areas of printed circuit boards, it has been proposed and mastered using galvanic tin-bismuth as a finishing coating.*

*This method makes it possible to manufacture prototypes of 4th class double-sided printed circuit boards with 5th class accuracy elements with metallization of vias and contact pads with a finishing galvanic tin-bismuth coating with thickness of 10–20 microns.*

*The finish tin-bismuth coating was applied using the existing equipment at the institute.*

*The finish tin-bismuth galvanic coating provides high flatness of the contact pads of PCB prototypes and allows installation of miniature electronic components with a small pin steps. A galvanic coating thickness of more than 10 microns prevents the formation of intermetallic layers of more than 1 micron in brazed joints. In addition, this coating has high mechanical strength, resistance to abrasion and to the negative effects of the environment. All of the above factors make it possible to mount a wide range of electronic components on prototypes of printed circuit boards of electronic products using group surface mounting technology with reflow of solder paste on both sides of the printed circuit board and to ensure high quality and reliability of soldered joints. In particular, this technology allows the installation of electronic components with lead-free pins at soldering temperatures of 230–240°C.*

*The reliability of the obtained soldered joints in prototypes of printed circuit boards of electronic products is confirmed by the successful multiple climatic, vibration, thermal cyclic and shock tests with a positive result.*

**Key words:** *printed circuit boards, tin-bismuth finishing galvanic coating, electronic components, contact pads, vias, solder paste, surface mounting.*

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/08>**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

**Кисельов В.Б.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**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»**МЕТОД РОЗМІЩЕННЯ СЕНСОРІВ ЛІТАЮЧИМИ  
ІНФОРМАЦІЙНО-ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИМИ РОБОТАМИ  
ДИНАМІЧНИМИ ЧЕРГАМИ**

*Зростанням кількості руйнівних природних явищ і підвищення техногенного навантаження на екосистеми потребує практично абсолютної оперативності й точності інформаційного забезпечення системи прийняття рішення. Особливе місце в такому інформаційному забезпеченні займають системи оперативного моніторингу, які розгортаються в натуральному масштабі часу в зоні надзвичайної ситуації.*

*Для оперативного розгортання сенсорної мережі в статті запропонована спеціальна телекомунікаційна аероплатформа, що побудована на базі безпілотного літального апарату й розглядається як літаючий інформаційно-телекомунікаційний робот. Як математична модель літаючого інформаційно-телекомунікаційного робота в режимі розміщення сенсорів розглядається складена динамічна система. Відділення сенсорів від робота відбувається динамічними чергами за допомогою спеціального пристрою, який працює як «кулемет», але замість куль цей пристрій «вистрілює» (виштовхує) сенсори. У статті запропоновано метод, який дозволяє сформулювати в термінах теорії оптимального керування умови оптимальності розгалуженої траєкторії руху складеної динамічної системи з поточним моментом розділення, тобто з фіксованим інтервалом часу розділення.*

*Показано, що виникає можливість підвищити ефективність використання літаючого інформаційно-телекомунікаційного робота в режимі первинного розміщення сенсорів, яке значною мірою покращує (здає) технічні показники подальшого функціонування сенсорної мережі. Сформульовані в статті необхідні умови оптимальності розглядаються як математичне забезпечення системи оперативного автоматизованого проектування сенсорної мережі й можуть бути використані для побудови обчислювальних алгоритмів, які враховують специфіку телекомунікаційної взаємодії сенсорів між собою на момент початку роботи мережі.*

*Доведення необхідних умов оптимальності траєкторії руху літаючого інформаційно-телекомунікаційного робота виконано з використанням наслідку з необхідних умов оптимальності складеної динамічної системи, методу множників Лагранжа, граничного переходу під знаком інтеграла Стілтєса.*

**Ключові слова:** сенсорна мережа, літаючий інформаційно-телекомунікаційний робот, складена динамічна система, розгалужена траєкторія руху, телекомунікаційна аероплатформа.

**Постановка проблеми.** Забезпечення сталого розвитку в умовах стрімких кліматичних змін, що супроводжуються зростанням кількості руйнівних природних явищ і підвищенням техногенного навантаження на екосистеми потребує практично абсолютної оперативності й точності інформаційного забезпечення системи прийняття рішення на відпрацювання керуючих дій щодо реагування на надзвичайні ситуації [1–3]. Особливе місце в цьому інформаційному забезпеченні займають системи оперативного моніторингу, які розгортаються в натуральному масштабі часу в зоні надзвичайної ситуації [4–12].

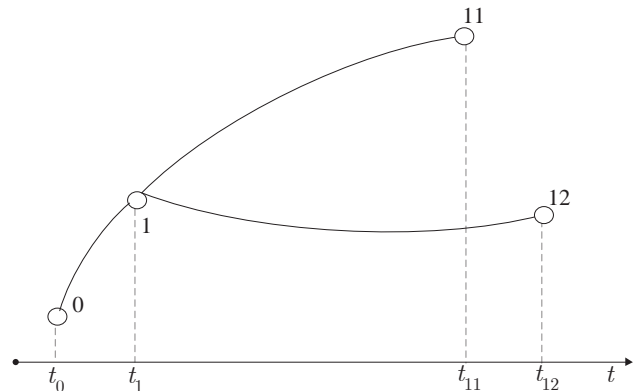
Від успішності первинного розгортання систем оперативного моніторингу (первинного розміщення сенсорів або стаціонарних, або мобільних) залежить успіх усієї операції стосовно парировання найбільш тяжких наслідків надзвичайної ситуації: загибель людей. Для оперативного розгортання сенсорної мережі використовується спеціальна літаюча платформа, яка отримала назву літаючий інформаційно-телекомунікаційний робот (далі – ЛІТР). Відділення сенсорів від ЛІТР відбувається динамічними чергами за допомогою спеціального пристрою, який працює як «кулемет», але замість куль цей пристрій «вистрілює» (виштовхує) сенсори. Оптимальне розгортання сенсорної мережі, коли відділення окремого сенсору або групи сенсорів відбувається у фіксовані (або фіксовані оптимально підібрані) моменти часу може бути виконано з використанням відомих умов оптимізації розгалуженої траєкторії руху із центральною та боковими гілками [13–15]. Але задача розміщення сенсорів істотно ускладнюється, якщо потрібно синтезувати траєкторію руху ЛІТР в припущенні, що відділення сенсорів може відбутися в кожен поточний момент часу в заданому інтервалі  $t \in [t_1', t_1'']$ , тобто динамічною чергою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В усіх наявних системах розміщення сенсорів динамічною чергою відбувається на евристично заданих траєкторіях із фіксованими моментами часу відділення сенсорів від ЛІТР [16; 17]. Це означає, що такі траєкторії ЛІТР не є оптимальними.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження методу розміщення сенсорів літаючими інформаційно-телекомунікаційними роботами динамічними чергами.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сформулюємо задачу розміщення сенсорів літаючими інформаційно-телекомунікаційними роботами динамічними чергами та розглянемо метод її розв'язання. ЛІТР будемо розглядати як складену

динамічну систему (далі – СДС), що складається з двох підсистем. Як було зазначено в [2, 14] траєкторія такої СДС (див. рис. 1) відноситься до класу розгалужених траєкторій і складається з трьох ділянок: (0, 1) – ділянка спільного руху СДС; (1, 11), (1, 12) – ділянки руху підсистем після розділення.



**Рис. 1.** Приклад схеми розгалуження траєкторії руху СДС: (0, 1) – ділянка спільного руху СДС; (1, 11), (1, 12) – ділянки руху підсистем після розділення

Векторні функції та змінні, що описують динаміку руху СДС на ділянках (0, 1), (1, 1*i*),  $i=1, 2$  будемо позначати, відповідно, індексами 1, 11, 12, що стоять зліва внизу, а скалярні функції та змінні – тими ж індексами, але що стоять праворуч внизу.

Розглянемо таку математичну постановку задачі. Складена динамічна система, динаміка руху якої описується рівнянням:

$${}_1\dot{x} = {}_1f({}_1x, {}_1u, t), \quad t \in [t_0, \tau], \quad (1)$$

де  ${}_1x \in E^n$  – вектор стану,  ${}_1u \in \Omega_1 \subset E^m$  – вектор керування,  $\tau \in [t_1', t_1'']$ , починає свій рух з множини:

$$Q_0 = \{({}_1x(t_0), t_0) : \varphi_1^{(0)}({}_1x(t_0), t_0) \begin{cases} \leq 0, l = \overline{1, r_0^{(0)}}; \\ = 0, l = \overline{r_0^{(0)} + 1, r^{(0)}}; \end{cases} \}, \quad (2)$$

де  $r^{(0)} - r_0^{(0)} < n + 1$ ,  $Q_0$  – обмеження на початкові значення фазових координат.

У будь-який момент часу  $\tau \in [t_1', t_1'']$  ( $t_0 < t_1'$ ), де  $t_1'$  і  $t_1''$  задаються умови:

$$Q_1' = \{({}_1x(t_1'), t_1') : \varphi_1^{(1')}({}_1x(t_1'), t_1') \begin{cases} \leq 0, l = \overline{1, r_1^{(1')}}; \\ = 0, l = \overline{r_1^{(1')} + 1, r^{(1')}}; \end{cases} \},$$

$$Q_1'' = \{({}_1x(t_1''), t_1'') : \varphi_1^{(1'')}({}_1x(t_1''), t_1'') \begin{cases} \leq 0, l = \overline{1, r_1^{(1'')}}; \\ = 0, l = \overline{r_1^{(1'')} + 1, r^{(1'')}}; \end{cases} \},$$

на множині:

$$Q_1 = \{({}_1x(\tau), \tau) : \varphi_1^{(1)}({}_1x(\tau), \tau) \begin{cases} \leq 0, l = \overline{1, r_1^{(1)}}; \\ = 0, l = \overline{r_1^{(1)} + 1, r^{(1)}}; \end{cases} \}, \quad (3)$$

де  $r^{(1)} - r_1^{(1)} < n + 1$ ,  $r^{(1')} - r_1^{(1')} < n + 1$ ,  $r^{(1'')} - r_1^{(1'')} < n + 1$ ;

$Q_1^+$ ,  $Q_1^-$ ,  $Q_1$  – обмеження на значення фазових координат відповідно в моменти часу  $t'$ ,  $t_1^+$ ,  $t_1^-$ ,  $t_1$ ,  $\tau \in [t_1^+, t_1^-]$ , складена динамічна система може розділитися на дві підсистеми:

$$\begin{aligned} {}_{1i}\dot{x} &= {}_{1i}f({}_{1i}x, {}_{1i}u, \eta), \quad \eta \in [\tau, t_i^+], \quad {}_{1i}x \in E^n, \\ {}_{1i}u &\in \Omega_{2i} \subset E^{m_{2i}} \quad (i = 1, 2) \end{aligned} \quad (4)$$

Підсистеми, що відділилися, повинні досягти кінцевих різноманіть:

$$Q_{1i} = \left\{ ({}_{1i}x(t_i^+), t_i^+) : \varphi_1^{(i)} \begin{cases} \leq 0, l = \overline{1, l_i^{(i)}}; \\ = 0, l = \overline{r_i^{(i)} + 1, r^{(i)}}; \end{cases} \right\} \quad (5)$$

в нефіксовані моменти часу, відповідно,  $t_i^0$  ( $i = 1, 2$ ).

У момент часу розділення СДС фазові координати підсистем зв'язані співвідношеннями:

$${}_{1i}x_p(\tau) = {}_{1i}x_p(\tau) \quad (p = \overline{1, n-1}), \quad (6)$$

$${}_{1i}x_n(\tau) = \xi_{1i} x_n(\tau) \quad (i = 1, 2), \quad (7)$$

де  $\xi_{11} + \xi_{12} = 1$ ,  $n$ -а фазова координата що описує в механічних СДС зміну маси. Завдання полягає в знаходженні такого процесу  ${}_{1i}x(t)$ ,  ${}_{1i}u(t)$ ,  ${}_{1i}x(\eta)$ ,  ${}_{1i}u(\eta)$ ,  $t_0$ ,  $t_i^0$  ( $i = 1, 2$ ), який би мінімізував критерій:

$$I = I_1 + I_{11} + I_{12} \rightarrow \min, \quad (8)$$

де:

$$I_1 = S_1({}_{1i}x(t_0), t_0; {}_{1i}x(t_1^+), t_1^+) + \int_{t_0}^{t_1^+} \Phi_1({}_{1i}x, {}_{1i}u, t) dt, \quad (9)$$

$$I_{1i} = S_{1i}({}_{1i}x(t_i^+), t_i^+) + \int_{\tau}^{t_i^+} \Phi_{1i}({}_{1i}x, {}_{1i}u, \eta) d\eta, \quad (i = 1, 2) \quad (10)$$

за умови, що розділення СДС може відбутися в кожен момент часу  $\tau \in [t_1^+, t_1^-]$ .

У виразах (8)–(10) скалярні функції:

$S_{1i}({}_{1i}x(t_0), t_0; {}_{1i}x(t_1^+), t_1^+)$ ,  $S_{1i}({}_{1i}x(t_i^+), t_i^+)$  ( $i = 1, 2$ ),  $\varphi_l^{(i)}({}_{1i}x(t_0), t_0)$  ( $l = \overline{1, r^{(i)}}$ ),  $\varphi_l^{(i)}({}_{1i}x(t_1^+), t_1^+)$  ( $l = \overline{1, r^{(i)}}$ ),  $\varphi_l^{(i)}({}_{1i}x(t_i^+), t_i^+)$  ( $l = \overline{1, r^{(i)}}$ ),  $\varphi_l^{(i)}({}_{1i}x(\tau), \tau)$  ( $l = \overline{1, r^{(i)}}$ ),  $\varphi_l^{(i)}({}_{1i}x(t_i^+), t_i^+)$  ( $i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(i)}}$ ) мають неперервні перші похідні за всіма своїми аргументами;  ${}_a f({}_a x, {}_a u, t)$  – неперервне разом із матрицею  $\partial {}_a f / \partial {}_a x$  зображення  $E^n \times \Omega_{\alpha} \times E^l \rightarrow E^n$ ;  $\Phi_{\alpha}({}_a x, {}_a u, t)$  – неперервне разом із матрицею  $\partial \Phi_{\alpha} / \partial {}_a x$  зображення  $E^n \times \Omega_{\alpha} \times E^l$  ( $\alpha = 1, 11, 12$ ).

Метод рішення задачі (1)–(10) полягає в такому. Розглядається допоміжна задача з кінцевою множиною значень можливих моментів часу відділення підсистем, складається векторний критерій оптимізації, здійснюється приведення векторного критерію до адитивної форми з використанням принципу псевдорозгалуження траєкторії СДС, і нарешт, через граничний перехід шукається рішення вихідної задачі.

Вважаючи, що розділення СДС на підсистеми сталося в один з моментів часу  $t_1^{(j)} \in [t_1^+, t_1^-]$  ( $j = \overline{1, N}$ ) приходимо до такої допоміжної задачі векторної оптимізації:

$$I^w = \text{col}[I^{(1)} \rightarrow \min, I^{(2)} \rightarrow \min, \dots, I^{(N)} \rightarrow \min], \quad (11)$$

$$I^{(j)} = I_1^{(j)} + I_{11}^{(j)} + I_{12}^{(j)}, \quad (12)$$

$$I_1^{(j)} = S_1({}_{1i}x(t_0), t_0; {}_{1i}x(t_1^{(j)}), t_1^{(j)}) + \int_{t_0}^{t_1^{(j)}} \Phi_1({}_{1i}x, {}_{1i}u, t) dt, \quad (13)$$

$$I_{1i}^{(j)} = S_{1i}({}_{1i}x(t_i^{(j)}), t_i^{(j)}) + \int_{t_i^{(j)}}^{t_i^{(j)}} \Phi_{1i}({}_{1i}x, {}_{1i}u, \eta) d\eta \quad (i = 1, 2), \quad (14)$$

$${}_{1i}\dot{x} = {}_{1i}f({}_{1i}x, {}_{1i}u, t), \quad t \in [t_0, t_1^{(j)}], \quad (15)$$

$${}_{1i}\dot{x} = {}_{1i}f({}_{1i}x, {}_{1i}u, \eta), \quad \eta \in [t_1^{(j)}, t_i^{(j)}], \quad (16)$$

$${}_{1i}x \in E^n, {}_{1i}x \in E^n, {}_{1i}u \in \Omega_i \subset E^{m_i}, {}_{1i}u \in \Omega_{2i} \subset E^{m_{2i}} \quad (i = 1, 2), \quad (17)$$

$${}_{1i}x_p(t_1^{(j)}) = {}_{1i}x_p(t_1^{(j)}) \quad (p = \overline{1, n-1}), \quad {}_{1i}x_n(t_1^{(j)}) = \xi_{1i} x_n(t_1^{(j)}),$$

$$\xi_{1i} \geq 0 \quad (i = 1, 2), \quad \xi_{11} + \xi_{12} = 1, \quad (18)$$

$$({}_{1i}x(t_0), t_0) \in Q_0, \quad ({}_{1i}x(t_1^{(j)}), t_1^{(j)}) \in Q_1, \quad ({}_{1i}x(t_1^+), t_1^+) \in Q_1^+,$$

$$({}_{1i}x(t_1^+), t_1^+) \in Q_1^-, \quad (19)$$

$$({}_{1i}x(t_i^{(j)}), t_i^{(j)}) \in Q_{1i} \quad (i = 1, 2; j = \overline{1, N}), \quad (20)$$

$$t_0 < t_1^+ = t_1^{(1)} < \dots < t_1^{(N)} = t_1^-, \quad \theta = (t_1^{(1)}, t_1^{(2)}, \dots, t_1^{(N)}), \quad (21)$$

де  $t_1^{(j)}$  – момент часу досягнення кінцевої множини  $Q_{1i}$  системою (16), що розпочала рух у момент часу  $t_1^{(j)}$  ( $i = 1, 2; j = \overline{1, N}$ ).

Принцип псевдорозгалуження траєкторії СДС полягає в такому. Припустимо, що розділення СДС на підсистеми має відбутися в момент часу  $t = t_1^{(1)}$ . У такому випадку траєкторія СДС складається з трьох ділянок (рис. 2), оптимально зшитих між собою умовами стрибка.

Однак, якщо в момент  $t_1^{(1)}$  сигнал на розділення не надійде, то СДС в об'єднаному стані повинна продовжити рух до наступного можливого моменту часу розділення  $t_1^{(2)}$ .

Таким чином, у момент часу  $t_1^{(1)}$  необхідно оптимально зшивати не три, а чотири траєкторії, з яких одна зліва від  $t_1^{(1)}$ , що являє собою траєкторію руху підсистем в об'єднаному стані ( $0-1'$ ), і три траєкторії праворуч від  $t_1^{(1)}$ : дві псевдотраєкторії, по яких могли б переміщатися підсистеми в відділеному стані ( $1'-11'$ ,  $1'-12'$ ) і одна траєкторія підсистем, що здійснюють рух в об'єднаному стані ( $1'-1''$ ). Міркуючи аналогічним чином щодо моментів часу  $t_1^{(2)}$ ,  $t_1^{(3)}$ , ...,  $t_1^{(N)}$ , приходимо до задачі оптимізації розгалуженої траєкторії (підрозділ 1.4), яка в такому випадку полягає в такому:

$$\tilde{I} = v^N I_1^{(N)} + \varphi^{(0)T} \zeta_0^N + \varphi^{(1)T} \zeta_1^N + \varphi^{(i)T} \zeta_i^N + \sum_{j=1}^N \{ \mu_j^N [I_{11}^{(j)} + I_{12}^{(j)}] + \quad (22)$$

$$\varphi^{(1)T} \zeta_1^{N(j)} + \varphi^{(i)T} \zeta_i^{N(j)} \} \rightarrow \min,$$

$$\text{де } v^N, \xi_{1i}^N, \mu_j^N \quad (i = 1, 2; j = \overline{1, N}),$$

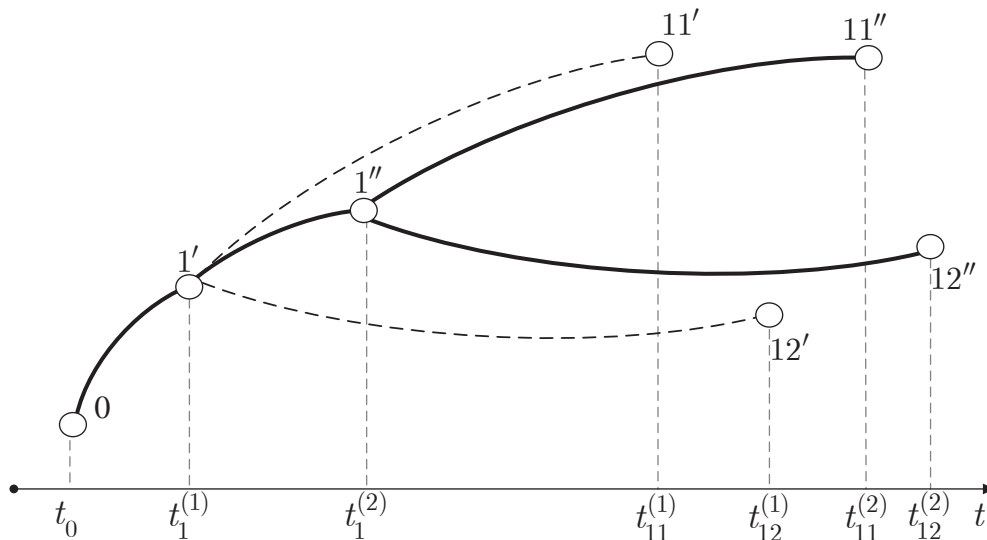


Рис. 2. Схема розгалуження траєкторії руху СДС із поточним моментом розділення

$$v^N \geq 0, \mu_j^N \geq 0 \quad (j = \overline{1, N}), \quad (23)$$

$$\varphi^{(0)T} = \{\varphi_1^{(0)}, \dots, \varphi_{r^{(0)}}^{(0)}\}, \quad \zeta_0^{NT} = \{\zeta_{01}^N, \dots, \zeta_{0r^{(0)}}^N\}, \quad (24)$$

$$\varphi^{(1')T} = \{\varphi_1^{(1')}, \dots, \varphi_{r^{(1')}}^{(1')}\}, \quad \zeta_{1'}^{NT} = \{\zeta_{1'1}^N, \dots, \zeta_{1'r^{(1')}}^N\}, \quad (25)$$

$$\varphi^{(1'')T} = \{\varphi_1^{(1'')}, \dots, \varphi_{r^{(1'')}}^{(1'')}\}, \quad \zeta_{1''}^{NT} = \{\zeta_{1''1}^N, \dots, \zeta_{1''r^{(1'')}}^N\}, \quad (26)$$

$$\varphi^{(1)T} = \{\varphi_1^{(1)}, \dots, \varphi_{r^{(1)}}^{(1)}\}, \quad \zeta_1^{NT} = \{\zeta_{11}^N, \dots, \zeta_{1r^{(1)}}^N\}, \quad (27)$$

$$\varphi^{(1i)T} = \{\varphi_1^{(1i)}, \dots, \varphi_{r^{(1i)}}^{(1i)}\}, \quad \zeta_{1i}^{NT} = \{\zeta_{1i1}^N, \dots, \zeta_{1ir^{(1i)}}^N\}, \quad (28)$$

$$\zeta_{0l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(0)}}), \quad \zeta_{1'l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(1')}}), \quad \zeta_{1''l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(1'')}}), \quad (29)$$

$$\zeta_{il}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(i)}}), \quad \zeta_{1i}^{NT} \geq 0 \quad (i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(ii)}}) \quad (30)$$

з урахуванням співвідношень (15)–(21).

Оскільки вимога задачі (1)–(8) щодо оптимальності умов розділення в кожен поточний момент часу більш жорстка, ніж вимога задачі (15)–(22), де оптимальні умови повинні дотримуватися в кінцевому числі моментів часу відділення підсистем, то кожен допустимий процес  ${}_1x(t), {}_1u(t), {}_{1i}x(\eta), {}_{1i}u(\eta), t_0, \eta, t_{1i}^{(j)}$  ( $i = 1, 2; j = \overline{1, N}$ ) задачі (1)–(8) буде допустимим і в задачі (15)–(22) при довільно вибраних моментах часу  $t_1^{(1)} < t_1^{(2)} < \dots < t_1^{(N)}$ .

Оптимальний процес  ${}_1x(t), {}_1u(t), {}_{1i}x(\eta), {}_{1i}u(\eta), t_0, \eta, t_{1i}^{(j)}$  ( $i = 1, 2; j = \overline{1, N}$ ) задачі (1)–(8) назвемо стійко-оптимальним, якщо знайдеться таке натуральне  $N_0$ , що для кінцевої множини значень  $N > N_0$  і рівновіддалених точок  $t_1^{(1)} < t_1^{(2)} < \dots < t_1^{(N)}$  допустимий процес  ${}_1x(t), {}_1u(t), {}_{1i}x(\eta), {}_{1i}u(\eta), t_0, \eta, t_{1i}^{(j)}$  ( $i = 1, 2; j = \overline{1, N}$ ) буде оптимальним і в задачі (15) – (22).

Установимо ознаки стійко-оптимального процесу й одночасно отримаємо рішення вихідної задачі, виконавши в необхідних умовах оптимальності для задачі (15)–(22) граничний по  $N$  перехід.

Відповідно до принципу мінімуму для оптимального процесу  ${}_1x(t), {}_1u(t), {}_{1i}x(\eta), {}_{1i}u(\eta), t_0, \eta, t_{1i}^{(j)}$  ( $i = 1, 2; j = \overline{1, N}$ ) задачі (15)–(22) існують множники Лагранжа  $\zeta_0^N, \zeta_{1'}^N, \zeta_{1''}^N, \zeta_1^{N(j)}, \zeta_{1i}^{N(j)}$  ( $i = 1, 2$ ) і рішення  ${}_1\lambda^N(t), {}_{1i}\lambda^N(\eta)$  ( $i = 1, 2$ ) векторних спряжених рівнянь:

$$v^N [{}_1\lambda^N(t) + \partial H_1 / \partial x] = 0, \quad (31)$$

$$\mu_j^N [{}_{1i}\lambda^N(\eta) + \partial H_{1i} / \partial x] = 0 \quad (i = 1, 2; j = \overline{1, N}) \quad (32)$$

такі, що справедливі умови:

1) трансверсальності:

$$v^N \left[ \frac{\partial S_1}{\partial {}_1x(t_0)} \Big|_{\lambda} + {}_1\lambda^N(\hat{t}_0) \right] + \frac{\partial \varphi^{(0)T}}{\partial {}_1x(t_0)} \Big|_{\lambda} \zeta_0^N = 0, \quad (33)$$

$$v^N \left[ \frac{\partial S_1}{\partial t_0} - H_1 \Big|_{\lambda} \right] + \frac{\partial \varphi^{(0)T}}{\partial t_0} \Big|_{\lambda} \zeta_0^N = 0, \quad (34)$$

$$\mu_j^N \left[ \frac{\partial S_{1i}}{\partial {}_{1i}x(t_{1i}^{(j)})} \Big|_{\lambda} - {}_{1i}\lambda^N(\hat{t}_{1i}^{(j)}) \right] + \frac{\partial \varphi^{(1i)T}}{\partial {}_{1i}x(t_{1i}^{(j)})} \Big|_{\lambda} \zeta_{1i}^{N(j)} = 0, \quad (35)$$

$$\mu_j^N \left[ \frac{\partial S_{1i}}{\partial t_{1i}^{(j)}} + H_{1i} \Big|_{\lambda} \right] + \frac{\partial \varphi^{(1i)T}}{\partial t_{1i}^{(j)}} \Big|_{\lambda} = 0; \quad (36)$$

2) стрибка:

$$v^N \left[ \frac{\partial S_1}{\partial {}_1x_p(t_1')} \Big|_{\lambda} - {}_1\lambda_p^N(t_1' - 0) + {}_1\lambda_p^N(t_1' + 0) \right] + \frac{\partial \varphi^{(1')T}}{\partial {}_1x_p(t_1')} \Big|_{\lambda} \zeta_{1'}^N +$$

$$+ \frac{\partial \varphi^{(1'')T}}{\partial {}_1x_p(t_1'')} \Big|_{\lambda} \zeta_{1''}^N + \mu_1^N \sum_{i=1}^2 \rho(\xi_{1i}, p) {}_{1i}\lambda_p^N(\hat{t}_1') = 0,$$

$$\frac{\partial \varphi^{(1)T}}{\partial (t_1')} \Big|_{\lambda} \zeta_1^N + v^N [H_1|_{\lambda, t_1' - 0} - H_1|_{\lambda, t_1' + 0}] - \mu_1^N \sum_{i=1}^2 H_{1i}|_{\lambda} = 0, \quad (38)$$



$$v^N \left[ \frac{\partial S_1}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} - {}_1\lambda_p^N(t_1 - 0) \right] + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^N + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^{N(N)} +$$

$$+ \mu_N^N \sum_{i=1}^2 \rho(\xi_{1i}, p) {}_{1i}\lambda_p^N(t_1^-) = 0, \quad (39)$$

$$\frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial t_1^-} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^N + v^N H_{1r} \Big|_{\lambda} - \mu_N^N \sum_{i=1}^2 H_{1i} \Big|_{\lambda} = 0, \quad (40)$$

$$v^N \left[ {}_1\lambda_p^N(t_1^{(j)} + 0) - {}_1\lambda_p^N(t_1^{(j)} - 0) \right] + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p(t_1^{(j)})} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^{N(j)} +$$

$$+ \mu_j^N \sum_{i=1}^2 \rho(\xi_{1i}, p) {}_{1i}\lambda_p^N(t_1^{(j)}) = 0, \quad (41)$$

3) мінімуму гамільтоніанів:

$$H_{1r}({}_1\hat{x}(t), {}_1\hat{u}(t), {}_1\lambda^N(t), t) = \min_{{}_1u(t) \in \Omega_{1r}, t \in [t_0, t_1]} H_{1r}({}_1\hat{x}(t), {}_1\hat{u}(t), {}_1\lambda^N(t), t), \quad (42)$$

$$H_{1i}({}_1\hat{x}(\eta), {}_1\hat{u}(\eta), {}_1\lambda^N(\eta), \eta) = \min_{{}_1u(\eta) \in \Omega_{1i}, \eta \in [t_1^{(j)}, t_1^{(j+1)}]} H_{1i}({}_1\hat{x}(\eta), {}_1\hat{u}(\eta), {}_1\lambda^N(\eta), \eta) \quad (i=1,2), \quad (43)$$

4) нетривіальності, невід'ємності, доповнюючої нежорсткості:

$$v^N + \sum_{i=1}^{j(0)} \zeta_{0i}^N + \sum_{i=1}^{j(1)} \zeta_{1i}^N + \sum_{i=1}^{j(2)} \zeta_{2i}^N + \sum_{i=1}^N \left[ \sum_{l=1}^{j(1)} \zeta_{1l}^{N(l)} + \sum_{l=1}^2 \sum_{i=1}^{j(2)} \zeta_{1i}^{N(i)} + \mu_j^N \right] = 1, \quad (44)$$

$$\zeta_{0l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(0)}}), \zeta_{1l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(1)}}), \zeta_{2l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(2)}}), \quad (45)$$

$$\zeta_{1l}^{N(i)} \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(i)}}), \zeta_{1l}^N \geq 0 \quad (l = \overline{1, r^{(i)}}), \quad (i = 1, 2) \quad (46)$$

$$\Phi_l^{(0)} \zeta_{0l}^N = 0, \quad l = \overline{1, r^{(0)}}; \Phi_l^{(1)} \zeta_{1l}^N = 0, \quad l = \overline{1, r^{(1)}}; \Phi_l^{(i)} \zeta_{1l}^N = 0, \quad l = \overline{1, r^{(i)}}; \quad (47)$$

$$\Phi_l^{(1)} \zeta_{1l}^{N(j)} = 0, \quad l = \overline{1, r^{(1)}}; \Phi_l^{(i)} \zeta_{1l}^{N(j)} = 0 \quad (l = \overline{1, r^{(i)}}), \quad l = \overline{1, r^{(i)}} \quad (48)$$

де значок « $\wedge$ » означає оптимальні значення змінних і параметрів,

$$H_q(q, x, q, u, q, \lambda, t) = \Phi_q(q, x, q, u, t) + q \lambda^{NT}(t) q f(q, x, q, u, t), \quad q = 1, 11, 12,$$

$$\rho(\xi_{1i}, p) = \begin{cases} 1, & p = 1, \overline{n-1}; \\ \xi_{1i}, & p = n, i = 1, 2. \end{cases}$$

Задамо на числовій осі ступінчасті функції  $\alpha^N(t)$ ,  $\zeta_{1l}^N(t)$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $\zeta_{1il}^N(t)$  ( $i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(i)}}$ ) зі стрибками відповідно  $\alpha_1^N(t), \dots, \alpha_N^N$ ;  $\zeta_{1l}^{N(1)}, \dots, \zeta_{1l}^{N(N)}$ ;  $\zeta_{1il}^{N(1)}, \dots, \zeta_{1il}^{N(N)}$  ( $i = 1, 2$ ) в точках  $t_1^{(1)}, \dots, t_1^{(N)}$ . При  $t < t_1^{(1)}$  покладемо  $\mu^N(t) = \zeta_{1r}^N(t) = \zeta_{1il}^N(t) = 0$ . В інтервалі часу  $[t_1^{(1)}, t_1^{(N)}]$  спряжене рівняння (31) разом з умовою стрибка (39), (41) можуть бути представлені в рівносильній інтегральній формі, що містить інтеграл Стільтєса [18]:

$$v_1^N \lambda_p^N(\tau) = v^N \int_{\tau}^{t_1} \frac{\partial H_1}{\partial_1 x_p} dt + \int_{\tau}^{t_1} \sum_{i=1}^2 \rho(\xi_{1i}, p) {}_{1i}\lambda_p^N(t) d\mu^N(t) + \int_{\tau}^{t_1} \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p} d\zeta_1^N(t) + v^N \frac{\partial S_1}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^N, \quad (49)$$

де  ${}_{1i}\lambda^N(t)$  ( $i = 1, 2$ ) знаходиться в результаті рішення рівнянь (16), (32) при граничних умовах (18)–(21),

(35), (36), (38), (40). Водночас умова стрибка для  $t = t_1^+$  набуде вигляду:

$$v^N \left[ \frac{\partial S_1}{\partial_1 x(t_1^+)} \Big|_{\lambda} - {}_1\lambda^N(t_1^+ - 0) + {}_1\lambda^N(t_1^+ + 0) \right] + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x(t_1^+)} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r}^N = 0, \quad (50)$$

де  ${}_{1i}\lambda^N(t_1 - 0)$  – знаходиться в результаті рішення рівняння (31) в інтервалі часу  $[t_0, t_1^+]$  за дотримання граничних умов (33), (34), а  ${}_{1i}\lambda^N(t_1 + 0)$  із рівняння (49) при  $\tau = t_1^+$ .

Унаслідок умов (23) та (44)–(46) функції  $\alpha^N(t)$ ,  $\zeta_{1l}^N(t)$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $\zeta_{1il}^N(t)$  ( $i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(i)}}$ ) невід'ємні й мають обмежену варіацію. Зафіксуємо довільний відрізок  $J$  числової осі, що включає  $[t_1^{(1)}, t_1^{(N)}]$  разом із малою околицею та виберемо  $N > N_0$  так, щоб  $t_1^{(1)}, \dots, t_1^{(N)}$  залишалися точками неперервності керування  ${}_1u(t)$ . З послідовності функцій  $\{\mu^N(t) : N > N_0\}$ ,  $\{\zeta_{11}^N(t) : N > N_0\}$ , ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $\{\zeta_{1il}^N(t) : N > N_0\}$ , ( $i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(i)}}$ ) можна виділити підпослідовності, які поточечно на  $J$  сходяться до граничних функцій, тобто:

$$\mu^N(t) \rightarrow \mu(t), \quad \zeta_{1l}^N(t) \rightarrow \zeta_{1l}(t) \quad (l = \overline{1, r^{(1)}}), \quad (51)$$

$$\zeta_{1il}^N(t) \rightarrow \zeta_{1il}(t) \quad (i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(i)}}), \quad t \in J.$$

Скаляри  $v^N$ ,  $\zeta_{1l}^N$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $\zeta_{1il}^N$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $N > N_0$  також обмежені й тому послідовності  $\{v^N : N > N_0\}$ ,  $\{\zeta_{1l}^N : N > N_0\}$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ),  $\{\zeta_{1il}^N : N > N_0\}$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ) мають підпослідовності, що сходяться, тобто:

$$v^N \rightarrow v, \quad \zeta_{1l}^N \rightarrow \zeta_{1l}^N \quad (l = \overline{1, r^{(1)}}), \quad \zeta_{1il}^N \rightarrow \zeta_{1il}^N \quad (l = \overline{1, r^{(1)}}). \quad (52)$$

Варіації функції  $\alpha(t)$ ,  $\zeta_{1l}(t)$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ) на  $J$  обмежені, а отже, в інтегральному рівнянні типу Вольterra [18; 19]:

$$v_1 \lambda_p(t) = v \frac{\partial S_1}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p(t_1^-)} \Big|_{\lambda} \zeta_{1r} + v \int_{\tau}^{t_1} \frac{\partial H_1}{\partial_1 x_p} dt + \int_{\tau}^{t_1} \left[ \sum_{i=1}^2 \rho(\xi_{1i}, p) {}_{1i}\lambda_p(t) d\mu(t) + \frac{\partial \Phi^{(1)T}}{\partial_1 x_p} d\zeta_1(t) \right], \quad (p = \overline{1, n}) \quad (53)$$

останній доданок має сенс. Рішення  ${}_1\lambda(\tau)$  цього рівняння існує в класі функцій обмеженої варіації і при цьому єдине [19]. У силу (51) рішення  ${}_1\lambda(\tau)$  рівняння (49) в кожній точці  $\tau \in J$  сходяться до рішення  ${}_1\lambda(\tau)$  рівняння (33). При цьому функції  $\alpha(t)$ ,  $\zeta_{1l}(t)$  ( $l = \overline{1, r^{(1)}}$ ) як границі (51) неспадних невід'ємних функцій самі є неспадними на  $J$  функціями отже, може розглядатися як міри. Переходячи до границі по  $N$  в співвідношеннях (31) – (47), і з урахуванням усього викладеного вище, отримаємо такий результат.

Теорема. Нехай  ${}_1x(t)$ ,  ${}_1u(t)$ ,  ${}_{1i}x(\eta)$ ,  ${}_{1i}u(\eta)$ , ( $i = 1, 2$ )  $t_0$ ,  $t_1^-$ ,  $t_1^+$  – стійко-оптимальний процес задачі (2.83)–(2.90). Тоді існують невід'ємні числа  $v$ ,  $\zeta_{0l}$  ( $l = \overline{1, r^{(0)}}$ ),  $\zeta_{1l}$

$(l = \overline{1, r^{(l)}})$ ,  $\zeta_{i,l}$  ( $l = \overline{1, r^{(l)}}$ ) і невід'ємні міри  $\alpha(t)$ ,  $\zeta_{i,l}(t)$  ( $l = \overline{1, r^{(l)}}$ ),  $\zeta_{i,l}(t)$  ( $i = 1, 2; l = \overline{1, r^{(l)}}$ ) обмеженої варіації, зосереджені на множинах відповідно

$$M_\mu = [t'_1, t''_1], M_1 = \{t : \varphi_1^{(1)}(x(t), t = 0) \in [t'_1, t''_1], \\ l = \overline{1, r^{(l)}}\},$$

$M_{i,l} = \{t : \varphi_i^{(l)}(x(t'_i), t'_i = 0) \in [t'_i, t''_i], l = \overline{1, r^{(l)}}$ ,  $i = 1, 2$ , де  $t'_i$  ( $i = 1, 2$ ) – момент часу досягнення системою (4) ( $i = 1, 2$ ) кінцевої множини (5) за умови, що розділення СДС відбулося в момент  $t$ , векторна функція  ${}_1\lambda(\tau)$  обмеженої варіації, що є рішенням інтегрального рівняння (53)  $\tau \in [t'_i, t''_i]$  і звичайного диференціального рівняння:

$${}_1\dot{\lambda}(t) = -\left. \frac{\partial H_1}{\partial x} \right|_\kappa \quad (54)$$

для  $\tau \in [t_0, t'_1]$  і векторні функції  ${}_i\lambda(\eta)$  ( $i = 1, 2$ ) обмеженої варіації, що є рішенням рівнянь:

$${}_i\dot{\lambda}(\eta) = -\left. \frac{\partial H_{i,l}}{\partial x} \right|_\kappa, \eta \in [t, t'_i], i = 1, 2; t \in [t'_i, t''_1] \quad (55)$$

такі, що справедливі умови:

1) трансверсальності:

$$v \left[ \left. \frac{\partial S_1}{\partial x_1(t_0)} \right|_\kappa + {}_1\lambda^N(t_0) \right] + \left. \frac{\partial \varphi^{(0)T}}{\partial x(t_0)} \right|_\kappa \zeta_0 = 0, \quad (56)$$

$$v \left[ \left. \frac{\partial S_1}{\partial t_0} - H_1 \right|_\kappa \right] + \left. \frac{\partial \varphi^{(0)T}}{\partial t_0} \right|_\kappa \zeta_0 = 0, \quad (57)$$

$$d\mu(t) \left[ \left. \frac{\partial S_{i,l}}{\partial x(t'_i)} \right|_\kappa - {}_i\lambda^N(t'_i) \right] + \left. \frac{\partial \varphi^{(i)T}}{\partial x(t'_i)} \right|_\kappa d\zeta_{i,l} = 0, \quad (58)$$

$$d\mu(t) \left[ \left. \frac{\partial S_{i,l}}{\partial t'_i} \right|_\kappa + H_{i,l} \right] + \left. \frac{\partial \varphi^{(i)T}}{\partial t'_i} \right|_\kappa d\zeta_{i,l} = 0; \quad (59)$$

2) стрибка:

$$v \left[ \left. \frac{\partial S_1}{\partial x_1(t'_1)} \right|_\kappa + {}_1\lambda(t'_1 + 0) - {}_1\lambda(t'_1 - 0) \right] + \left. \frac{\partial \varphi^{(1)T}}{\partial x(t'_1)} \right|_\kappa \zeta_1^N = 0, \quad (60)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi^{(1)T}}{\partial t'_1} \right|_\kappa \zeta_1 + v \left[ H_{1,l} \Big|_{\kappa, \hat{\eta}=0} - H_{1,l} \Big|_{\kappa, \hat{\eta}=+0} \right] - d\mu(t) \sum_{i=1}^2 H_{i,l} \Big|_\kappa = 0, \quad (61)$$

$$\left. \frac{\partial \varphi^{(1)T}}{\partial t'_1} \right|_\kappa \zeta_1 + v H_{1,l} \Big|_\kappa - d\mu(t'_1) \sum_{i=1}^2 H_{i,l} \Big|_\kappa = 0; \quad (62)$$

3) мінімуму гамільтоніанів:

$$H_1(\hat{x}(t), \hat{u}(t), {}_1\lambda^N(t), t) = \min_{u(t) \in \Omega_1, t \in [t'_1, t''_1]} H_1(\hat{x}(t), \hat{u}(t), {}_1\lambda^N(t), t), \quad (63)$$

$$H_{i,l}(\hat{x}(\eta), \hat{u}(\eta), \lambda(\eta), \eta) = \min_{u(\eta) \in \Omega_{i,l}, \eta \in [t, t'_i], i=1,2} H_{i,l}(\hat{x}(\eta), \hat{u}(\eta), \lambda(\eta), \eta); \quad (64)$$

4) нетривіальності, невід'ємності, доповнюючої нежорсткості:

$$v + \int_{t'_1}^{t''_1} d\mu(t) + \sum_{i=1}^{r^{(0)}} \zeta_{0,i} + \sum_{i=1}^{r^{(1)}} \zeta_{1,i} + \sum_{i=1}^{r^{(1)}} \zeta_{1,i} + \int_{t'_1}^{t''_1} \left[ \sum_{i=1}^{r^{(1)}} d\zeta_{i,l}(t) + \sum_{i=1}^2 \sum_{l=1}^{r^{(i)}} d\zeta_{i,l}(t) \right] = 1, \quad (65)$$

$$\zeta_{0,l} \varphi_l^{(0)} = 0, l = \overline{1, r^{(0)}}; \quad (66)$$

$$\zeta_{1,l} \varphi_l^{(1)} = 0, l = \overline{1, r^{(1)}}; \quad (67)$$

$$\zeta_{1,l} \varphi_l^{(1)} = 0, l = \overline{1, r^{(1)}}; \quad (68)$$

$$d\zeta_{i,l}(t) \varphi_l^{(i)} = 0, l = \overline{1, r^{(i)}}; d\zeta_{i,l}(t) \varphi_l^{(i)} = 0, i = 1, 2, \\ l = \overline{1, r^{(i)}}. \quad (69)$$

**Висновки.** Запропонований метод дозволяє сформулювати в термінах теорії оптимального керування умови оптимальності розгалуженої траєкторії руху складеної динамічної системи з поточним моментом розділення, тобто із фіксованим інтервалом часу розділення. З технічної точки зору це означає, що виникає можливість підвищити ефективність використання літаючого інформаційно-телекомунікаційного робота у режимі первинного розміщення сенсорів, яке значною мірою покращує (задає) технічні показники подальшого функціонування сенсорної мережі.

Сформульовані у вигляді теореми необхідні умови оптимальності є частиною математичного забезпечення системи оперативного автоматизованого проектування сенсорної мережі і можуть бути використані для побудови обчислювальних алгоритмів, які враховують специфіку телекомунікаційної взаємодії сенсорів між собою на момент початку роботи мережі.

Доведення необхідних умови оптимальності траєкторії руху літаючого інформаційно-телекомунікаційного робота виконано з використанням наслідку з необхідних умов оптимальності складеної динамічної системи, методу множників Лагранжа, граничного переходу під знаком інтеграла Стілтєса.

### Список літератури:

1. Tachinina O.M., Lysenko O.I. Optimal principle for dynamical system with alterative orbiting. *Electronics and control systems*. Kyiv : NAU, 2016. № 4 (50). P. 108–113.
2. Тачинина О.М., Лысенко О.И. Метод размещения сенсоров в зоне чрезвычайной ситуации на базе технологии составных динамических систем. *Сборник научных трудов SWorld*. 2014. Выпуск 3 (36). Том 1. С. 84–89.
3. Тачинина О.М., Лысенко О.И., Чумаченко С.М. Математическая постановка задачи оптимизации движения группы квадрокоптеров. *Актуальні проблеми моделювання ризиків і загроз виникнення надзвичайних ситуацій на об'єкт критичної інфраструктури* : праці міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 20–21 квітня 2015 р. Київ : УкрНДІЦЗ, 2015. Вип.1. С. 113–119.
4. Романюк В.А., Лисенко О.І., Романюк А.В., Новіков В.І., Гуйда О.Г. Метод збору інформації з вузлів безпроводової сенсорної мережі з використанням інтелектуальних адаптивних літаючих інформаційно-

телекомунікаційних робіт. *Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 2. Астина 2. С. 25–35.

5. Popescu D., Stoican F., Stamatescu G., Chenaru O., Ichim L. A Survey of Collaborative UAV–WSN Systems for Efficient Monitoring. *Sensors*. 2019. No. 19 (21). 4690. URL: <https://doi.org/10.3390/s19214690>.

6. Jawhar I., Mohamed N., Al-Jarood J. UAV-based data communication in wireless sensor networks: Models and Strategies. *International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*, 2015.

7. Okcu H., Soy Turk M. Distributed Clustering Approach for UAV Integrated Wireless Sensor Networks. *International Journal of Ad Hoc and Ubiquitous Computing*. 2014. Vol. 15. No. 1–3. P. 106–120.

8. Ho D.-T., Grotli E.I., Johansen T.A. Heuristic Algorithm and Cooperative Relay for Energy Efficient Data Collection with a UAV and WSN. URL: [http://folk.ntnu.no/torarnj/ho\\_2013.pdf](http://folk.ntnu.no/torarnj/ho_2013.pdf).

9. Zhan Ch., Zeng Y., Zhang R. Energy-Efficient Data Collection in UAV Enabled Wireless Sensor Network. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2017. Volume: PP. Issue 99.

10. Synthesis of data collection methods by telecommunication airplatforms in wireless sensors networks / A.V. Romaniuk, V.A. Romaniuk, O.I. Lysenko, M.K. Sparavalo, O.V. Zhuk. *Information and Telecommunication Sciences*. 2020. № 2. P. 63–73.

11. Multiple UAVs path planning algorithms: a comparative study / Sathyaraj, B. Moses, et al. *Fuzzy Optimization and Decision Making*. 2008. P. 257–267.

12. Ho D.-T., Shimamoto Sh. Highly reliable communication protocol for WSN-UAV system employing TDMA and PFS scheme. December 2011. DOI: 10.1109/GLOCOMW.2011.6162401.

13. Lysenko O., Tachinina O., Alekseeva I., Kyselov V. Algorithm of Operative Synthesis of Information Robot Branching Path. *Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments* : IEEE 5th International Conference, Kyiv, Ukraine, October, 22–24, 2019. Kyiv : NAU, 2019. P. 234–237.

14. Lysenko O., Tachinina O. Handbook of Research on Artificial Intelligence Applications in the Aviation and Aerospace Industries. Chapter 14 : Methods for the Synthesis of Optimal Control of Deterministic Compound Dynamical Systems With Branch. P. 323–351. DOI: 10.4018/978-1-7998-1415-3.ch014.

15. Lysenko O., Tachinina O. Algorithms of controlling an information robot created on the basis of unmanned aerial vehicles. *Proceedings of the National Aviation University*. Kyiv : NAU, 2020. № 2 (83). P. 13–19. DOI: 10.18372/2306-1472.83.14629.

16. Increasing the efficiency of data gathering in clustered wireless sensor networks using UAV / V. Romaniuk, O. Lysenko, A. Romaniuk, O. Zhuk. *Information and telecommunication sciences*. 2020. Vol. 11. No. 1. P. 102–107. DOI: <https://doi.org/10.20535/2411-2976.12020.102-107>.

17. Romaniuk A.V., A. Romaniuk V.A., Sparavalo M.K., Lysenko O.I., Zhuk O.V. SYNTHESIS OF DATA COLLECTION METHODS BY TELECOMMUNICATION AERIAL PLATFORMS IN WIRELESS SENSORS NETWORKS. *Information and telecommunication sciences*. 2020. Vol. 11. No. 2. URL: <http://infotelesc.kpi.ua/article/view/221266>.

18. Брайсон А., Хо Ю-Ши. Прикладная теория оптимального управления. Москва : Мир, 1972. 554 с.

19. Иоффе А.Д., Тихомиров В.М. Теория экстремальных задач. Москва : Наука, 1989. 197 с.

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

## **METHOD OF PLACEMENT OF SENSORS BY FLYING INFORMATION**

### **AND TELECOMMUNICATIONS WORKS BY DYNAMIC QUEUES**

*The growing number of destructive natural phenomena and increasing man-made load on ecosystems requires almost absolute efficiency and accuracy of information support of the decision-making system. A special place in this information support is occupied by operational monitoring systems, which are deployed on a natural scale in the emergency zone.*

*For the rapid deployment of the sensor network, the article proposes a special telecommunication aircraft platform, built on the basis of an unmanned aerial vehicle, is considered a flying information and telecommunication robot. A composite dynamic system is considered as a mathematical model of a flying information and telecommunication robot in the mode of sensors placement. Separation of sensors from the robot is dynamic queues with a special device that works as a “machine gun”, but instead of bullets, this device “shoots” (pushes) the sensors. The article proposes a method that allows to formulate in terms of the theory of optimal control the conditions of optimality of the branched trajectory of a composite dynamic system with the current moment of separation, ie with a fixed interval of separation time.*

*It is shown that there is an opportunity to increase the efficiency of using flying information and telecommunication robot in the mode of primary placement of sensors, which significantly improves (sets) the technical performance of the further functioning of the sensor network. The necessary optimality conditions formulated in the article are considered as mathematical support of the system of operative automated design of sensor network and can be used for construction of computational algorithms which take into account specificity of telecommunication interaction of sensors among themselves at the beginning of network operation.*

*Proof of the necessary conditions for the optimality of the trajectory of a flying information and telecommunication robot is performed using the consequence of the necessary conditions for the optimality of a complex dynamic system, the method of Lagrange multipliers, the boundary transition under the sign of the Stieltjes integral.*

**Key words:** sensor network, flying information and telecommunication robot, folded dynamic system, branched trajectory, telecommunication air platform.

## ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.932.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/09>

**Глухова Н.В.**

Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

### ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ КОГЕРЕНТНОГО СТАНУ РІДИНИ

*У статті розглянуто сучасний стан досліджень у галузі визначення якості питної води, зокрема її біологічних властивостей. Виконано аналіз наявних моделей для опису фізичних, хімічних, біологічних властивостей води. Висвітлено переваги вивчення біологічних властивостей води в рамках теорії квантової електродинаміки.*

*Дослідження властивостей води в галузі квантової електродинаміки забезпечує врахування при побудові її моделей міжмолекулярних зв'язків у вигляді взаємодії між електричними диполями окремих молекул води й електромагнітним полем. Описані процеси впливають на біологічні властивості води, зокрема на ступінь її когерентності.*

*У роботі запропонована інформаційна технологія для обробки зображень газорозрядного випромінювання зразків води, яка дає змогу якісно й кількісно оцінити біологічні властивості води, пов'язані зі ступенем її когерентності. Інформаційна технологія містить обчислювальні процедури, які виконують функції побудови гістограм зображень газорозрядного випромінювання води, статистичний аналіз кількісних ознак гістограми, розрахунок медіан і різниць медіан в інтервалах групування даних гістограми.*

*Для виконання класифікації за видами води використано метрику – евклідову відстань. Вона розраховується для медіан в інтервалах гістограми або для різниць медіан.*

*Запропонована інформаційна технологія використана для обробки експериментальних результатів, отриманих у вигляді зображень газорозрядного випромінювання зразків рідини в полі високовольтного розряду. У ході досліджень залучено зразки дистильованої і штучно активованої води.*

*Отримані результати застосування інформаційної технології підтвердили достовірність і відтворюваність методу для контрольних зразків дистильованої води. Для штучно активованих видів води встановлено підвищення ступеня когерентності порівняно з контрольними зразками дистильованої, яка була обрана як еталон некогерентної.*

**Ключові слова:** *якість води, когерентний стан, газорозрядне випромінювання, цифрова обробка зображень.*

**Постановка проблеми.** Вода відіграє ключову роль в існуванні живих істот. Її біологічна функція зумовлена передусім властивостями розчинника. Незважаючи на те що вода є однією з найбільш розповсюджених речовин на Землі, її властивості настільки унікальні, що процес наукових досліджень і вдосконалення моделей води активно триває вже декілька десятиліть.

У зв'язку з техногенним навантаженням, що наростає, на гідросферу одним із найважливіших питань, які виникають на межі гармонійного поєднання досягнень науково-технічного прогресу та вирішення екологічних проблем, постає розробка методів оцінки якості води, у тому числі питної.

Більшість наявних моделей води ґрунтується на такому елементарному її складнику, як окремо взята молекула. На базі окремо взятих моделей молекул потім, як із цеглинок, будуються моделі води в різних агрегатних станах.

Синтезовані за таким принципом моделі виявилися корисними при дослідженні різноманітних фізико-хімічних властивостей води [1]. Паралельно із цим відомо, що вода володіє низкою так званих «аномальних» властивостей, які нині в повному обсязі не може описати й обґрунтовано пояснити ні одна із цих моделей. Основною причиною такої ситуації є нездатність моделей, в основу яких закладено уявлення про структуру води як набору ізольованих молекул,

описати увесь спектр прояву міжмолекулярних зв'язків.

Як встановлено в останні роки, важливий вплив на властивості води, зокрема біологічні, чинять сили міжмолекулярного електростатичного тяжіння [2]. Розробка нових теоретичних та експериментальних підходів щодо вивчення біологічних властивостей води, обумовлених існуванням сил міжмолекулярної електростатичної взаємодії, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Один із перспективних напрямів удосконалення моделей і методів для вивчення властивостей води розгортається в галузі квантової електродинаміки. Особливістю такого підходу є концентрація уваги саме на дослідженні міжмолекулярної взаємодії молекул води, що характеризуються флюктууючими дипольними моментами, які, у свою чергу, є джерелом електромагнітного випромінювання.

Важливість урахування при побудові моделей води міжмолекулярних зв'язків у вигляді взаємодії між електричними диполями окремих молекул води та електромагнітним полем обґрунтовано в роботах [3; 4].

Унаслідок міжмолекулярної взаємодії молекул води стає можливим утворення відносно великих за розміром (діаметр близько 100 нм) і стабільних сукупностей із молекул, які отримали назву когерентних доменів. Вони організуються завдяки невеликим індивідуальним флюктуаціям компонентів, які когерентно накладаються між собою [2]. Цей факт виявився значущим не тільки з точки зору теорії квантової електродинаміки, а і, як показали подальші дослідження, він має суттєвий вплив на пояснення біологічних властивостей води та поглиблення розуміння динамічних процесів на рівні міжклітинної рідини живих істот. Завдяки відкриттю когерентних явищ у структурі рідкої фази води з'явилася можливість більш повного опису протікання процесів метаболізму в живих організмах [5; 6].

Після встановлення та наукового обґрунтування зв'язку когерентного стану води з її біологічними властивостями проведено дослідження щодо впливу когерентної питної води на стан організму людини та перспективи її застосування з профілактичними й лікувальними цілями. У роботах [7; 8] наведено результати досліджень, які дали змогу встановити позитивний ефект від споживання води в когерентному стані на організм людини. Таким чином, виявлено позитивний вплив на регуляцію ритму серцевої динаміки, нормалізацію кров'яного тиску, стимуляцію імунітету [9; 10].

Дослідження біологічних властивостей питної води, обумовлених когерентними явищами в її структурі, є досить складним завданням, оскільки воно відноситься до галузі теорії квантової електродинаміки й потребує спеціальних методів і засобів вимірювань. У працях [11; 12] запропоновано спосіб дослідження ступеня когерентності води на базі методу газорозрядного випромінювання та застосування методології флікер-шумової спектроскопії для аналізу інформативних ознак зображень. Ефективність такого способу для дослідження ступеня когерентності води доведена експериментально при вивченні властивостей різних видів води з природних джерел.

В останній час у зв'язку з підвищеним техногенним навантаженням на гідросферу зростає частка споживання населенням штучно виготовленої (наприклад, дистильованої з додаванням корисних компонентів) або доочищеної води. Сьогодні розроблено великий спектр способів активації, підвищення біодоступності питної води та інших рідиннофазних об'єктів [13–15].

Тому подальшим розвитком способу оцінки ступеня когерентності води є розробка вдосконалених методик для дослідження активованих, доочищених або штучно виготовлених видів води.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка способу оцінки ступеня когерентності води, який передбачає статистичний аналіз гістограм яскравості зображень газорозрядного випромінювання.

**Виклад основного матеріалу.** Розроблена інформаційна технологія для дослідження когерентного стану рідини включає обробку й аналіз сигналів вимірювальної інформації, які отримані в результаті впливу на досліджуваний зразок рідини електромагнітним полем і представлені у вигляді зображень газорозрядного випромінювання. Інформаційна технологія будується на базі декількох обчислювальних процедур, які забезпечують виділення інформативних ознак зображень і можливість порівняння їх з аналогічними інформативними характеристиками зразків з бази даних зображень, що утворена на основі попередніх досліджень типових вод з відомими біологічними, фізичними, хімічними властивостями. У підсумку застосування інформаційної технології забезпечує отримання кількісних і якісних оцінок когерентного стану рідини.

Обчислювальні процедури розробленої інформаційної технології враховують специфіку використаного методу вимірювань з отриманням результатів у вигляді зображень. Одним

із найбільш досконалих і повних способів оцінки геометричних і фотометричних ознак зображень є побудова гістограм. Оскільки принципи побудови гістограм, зокрема стосовно вибору кількості інтервалів групування даних, розрізняються в метрологічній практиці та при цифровій обробці зображень, то проводилися додаткові дослідження для обґрунтованого вибору кількості інтервалів, доцільних при аналізі інформативних ознак газорозрядного випромінювання [16]. Такий підхід використаний для оптимізації обчислювальних процедур інформаційної технології дослідження когерентного стану рідини.

На рис. 1 представлена структурна схема для ілюстрації основних функцій, які забезпечує розроблена інформаційно-вимірювальна технологія. У базі даних зображень, яка використовується для порівняння з типовими зразками води, містяться згруповані зображення води з різним ступенем когерентності. Наприклад, зображення дистильованої (некогерентної), функціональної (когерентної, з підтвердженими лікувальними властивостями) з природних джерел.

Як зразки, які підлягали дослідженням, використано такі типи води: контрольні зразки дистильованої води; зразки дистильованої та природної фасованої води, для яких штучно підвищувався ступінь когерентності з різною спіноюю направленістю на базі використання методики [15].

Для визначення ступеня когерентності зазначених вище зразків проводилися експериментальні дослідження методом газорозрядного випромінювання. Кількісна оцінка інформативних ознак у розробленій інформаційній технології базується на побудові гістограм зображень [17; 18]. Для кожного досліджуваного зразка рідини отримано не

менше ніж 50 зображень газорозрядного випромінювання крапель води.

З метою підвищення точності й достовірності кількісної оцінки параметрів випромінювання виконувалася статистична обробка в межах вибірки зображень для кожного зразка.

Для якісної оцінки властивостей досліджуваних зразків води у вигляді класифікації за типовими видами води використана метрика – евклідова відстань [19]. Для гістограми зображення, яка в цьому випадку групується на 12 інтервалах, у межах вибірки розраховуються значення медіан [20] і різниць медіан [21].

Евклідова відстань розраховувалася як для значень медіан у відповідних стовпчиках гістограми яскравості зображення, так і для різниць медіан у сусідніх інтервалах розбиття гістограми. Різниця медіан дають змогу оцінити коливання яскравості в певних сусідніх діапазонах.

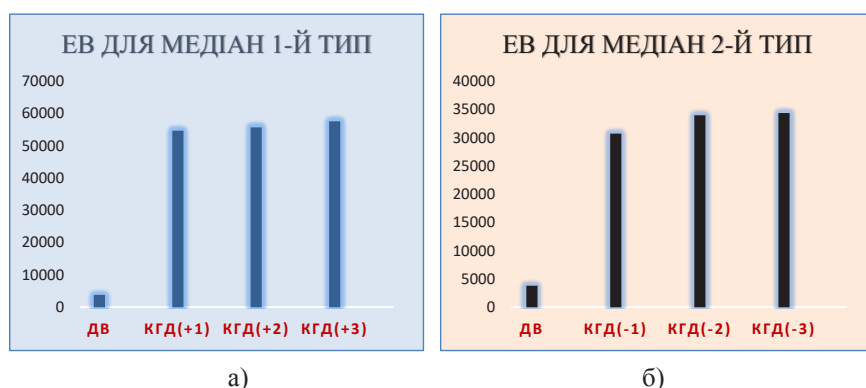
На рис. 2 графічно представлено результати розрахунку евклідової відстані для медіан для досліджуваних зразків води порівняно з типовою дистильованою, параметри випромінювання якої містяться в попередньо сформованій базі даних зображень.

Ліворуч на рис. 2 графічно показано зростання кількісного значення евклідової відстані для води зі штучно підвищеним ступенем когерентності на базі використання R-чипу, який призначений для отримання стану середовища з правосторонньою орієнтацією спінів [15]. На рис. 2б графічно представлені значення евклідової відстані для зображень випромінювання зразків води після використання L-чипу для отримання лівосторонньої орієнтації спінів.

На графіках за віссю ординат відкладалося значення евклідової відстані між медіанами



Рис. 1. Функції інформаційно-вимірювальної системи дослідження когерентного стану рідини



а) б)  
**Рис. 2. Графіки значень евклідової відстані (ЕВ) між медіанами стовпчиків гістограм яскравості зображень (а – для 1-го виду підвищення ступеня когерентності; б – для 2-го виду підвищення ступеня когерентності)**

досліджуваних зразків і типовим зразком дистильованої води, який був попередньо сформований у базі даних зображень. З аналізу графіків видно, що найменше значення евклідової відстані спостерігається для досліджуваного зразка дистильованої води (ДВ), що є підтвердженням відтворюваності методу газорозрядного випромінювання. Згідно з дослідженнями в галузі квантової електродинаміки, дистильована вода може бути використана як еталон некогерентної.

Для інших зразків, як з лівосторонньою, так і з правосторонньою орієнтацією спінів, отриманих штучно, спостерігаються суттєві відмінності в кількісних значеннях евклідової відстані порівняно з експериментальним зразком дистильованої води. Як видно з графіків, з пролонгацією впливу на зразки води від зразка з найменшим впливом, позначеним як дистильована води з 1-м ступенем підвищення когерентності КГД (+1), до зразка з найвищим ступенем когерентності КГД (+3) спостерігається вже незначне порівняно зі зразком дистильованої води ДВ зростання евклідової відстані.

У цілому графіки на рис. 2а і 2б виглядають аналогічно на якісному рівні, але варто звернути увагу на масштаб за віссю ординат. Відмінності між кількісними значеннями евклідової відстані

суттєво більше проявляються для зразків з правосторонньою орієнтацією спінів.

**Висновки.** У статті запропоновано інформаційну технологію для дослідження когерентного стану рідини. Як висвітлено в огляді літератури, явище когерентності корелює з біологічними властивостями води, що вказує на актуальність як теоретичного, так і експериментального напрямів вивчення цього питання.

Перевагою розробленої інформаційної технології є можливість статистичної обробки вибірок зображень, що підвищує точність і достовірність кількісного визначення інформативних ознак зображень.

Розроблені алгоритми й інструментальні засоби інформаційної технології виявилися ефективними при практичному впровадженні в ході експериментальних досліджень різних типів води: дистильованої та штучно виготовлених різними способами.

При порівнянні зі зразками типових вод (водопровідної, природної, функціональної з лікувальних джерел) можна зробити висновок, що дистильована вода зі штучно підвищеним рівнем когерентності з лівосторонньою орієнтацією спінів за своїми біологічними властивостями ближча до найбільш часто споживаних типів води (водопровідної доочищеної або природної).

#### Список літератури:

1. Маленков Г.Г. Структура и динамика жидкой воды. *Журнал структурной химии*. 2006. Т. 47. С. 5–35.
2. Messori C. The Super-Coherent State of Biological Water. *OALib Journal*. 2019. № 6 (2). P. 1–17.
3. Del Giudice E., Preparata G., Vitiello G. Water as a Free Electric Dipole Laser. *Physical review letters*. 1988. № 61 (9). P. 1085–1088.
4. Дел Гуидиче Э. Когерентная квантово-электродинамическая организация биохимических процессов. *Журнал формирующихся направлений науки*. 2014. № 4 (2). С. 92–99.
5. Del Giudice E. Old and new views on the structure of matter and the special case of living matter. *Journal of Physics: conference Series*. 2007. № 67. PP. 1-8.
6. Del Giudice E., Spinetti P., Tedeschi A. Water dynamics at the root of metamorphosis in living organisms. *Water*. 2010. № 2. P. 566–586.

7. Johansson B. Effects of functional water on heart rate, heart rate variability, and salivary immunoglobulin A in healthy humans: A pilot study. *J. Alter Compl. Med.* 2009. № 15 (8). P. 871–877.
8. Johansson B., Sukhotskaya S. Allometric Scaling Behaviour – A Quantum Dissipative State Implies a Reduction in Thermal Infrared Emission and Fractal Ordering in Distilled Coherent Water. *Water.* 2011. № 9.
9. Johansson B. A coherent water state – Implications for self-regulation and restoration of biological structures and functions. *Water Conference.* 2012. URL: <https://archives.waterconf.org/wp-content/uploads/2012-pdf-files/13-Johansson%20Abstract%20WC2012.pdf> (дата звернення: 12.07.2021).
10. Johansson B., Sukhotskaya S. Drinking functional coherent mineral water accompanies a strengthening of the very low frequency impact on heart rate variability, and mono and multifractal heart rhythm dynamics in healthy humans. *Functional Foods in Health and Disease.* 2016. № 6. P. 388–413.
11. Спосіб визначення ступеня когерентності стану води: пат. на винахід № 112809 Україна: МПК G01N 21/00, номер заявки а 2015 01841 / Л.А. Пісоцька, О.П. Мінцер, Н.В. Глухова ; заявник та патентовласник Пісоцька Л.А. Заявл. 02.03.2015; опубл. 12.09.2016, Бюл. № 17. 8 с.
12. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А. Метод визначення ступеня когерентності води з використанням методології фліккер-шумової спектроскопії. *Системи обробки інформації.* 2015. № 5 (130). С. 167–171.
13. Elsayed Yehya, Khamis Mustafa, Samara Fatin, Alqaydi Maitha, Sara Ziad, Al Zubaidi Isam, Mortula Maruf. Novel method for water purification using activated adsorbents developed from sewage sludge. *Desalination and Water Treatment.* 2016. № 57. P. 15649–15659.
14. Jacobson J. Method for electromagnetically restructuring water for consumption. EP1210145A4. European Patent Office, 2000.
15. Краснобрыжев В.Г. Спосіб та пристрій для створення когерентного матеріального середовища. Патентна заявка № 200803310 від 13.03.2008 у ДП «Український інститут промислової власності».
16. Глухова Н.В. Виявлення інформативних ознак зображень на базі аналізу гістограм яскравості. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки».* 2020. Том 31 (70). № 4. С. 75–80.
17. Песоцкая Л.А., Глухова Н.В., Лапицкий В.Н. Анализ изображений кирлиановского свечения капель воды. *Научный вестник Национального горничого университета.* 2013. № 1. С. 91–96.
18. Методы измерения физико-химических и энергоинформационных параметров воды / Н.В. Глухова, М.В. Курик, Л.А. Песоцкая, Н.Г. Кучук. *Системи обробки інформації.* 2014. № 9 (125). С. 215–219.
19. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А., Кучук Н.Г. Розробка системи експрес-класифікації води на основі бази даних зображень газорозрядного випромінювання. *Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил ім. І. Кожедуба.* 2015. Вип. 3 (44). С. 112–118.
20. Глухова Н.В., Пісоцька Л.А. Дослідження впливу зовнішніх факторів на біологічну активність води. *Клінічна інформатика та телемедицина.* 2015. Т. 11. Вип. 12. С. 80–84.
21. Peculiarities of gas-discharge luminescence of biological fluid from the achilles tendon in the late postmortem period / V.A. Povstyanyi, L.A. Pesotskaya, N.V. Glukhova, N.M. Yevdokimenko, L.R. Nikogosyan, Ye.L. Koshelnik. *Journal of Education, Health and Sport.* 2017. № 7 (2). P. 498–508.

#### **Glukhova N.V. INFORMATION TECHNOLOGY FOR THE STUDY OF THE COHERENT STATE OF THE LIQUID**

*The article considers the current state of research in the field of determining the quality of drinking water, in particular its biological properties. The analysis of existing models for the description of physical, chemical, biological properties of water is executed. The advantages of studying the biological properties of water in the framework of the theory of quantum electrodynamics are highlighted.*

*The study of the properties of water in the field of quantum electrodynamics provides consideration when building its models of intermolecular bonds in the form of interaction between the electric dipoles of individual water molecules and the electromagnetic field. The described processes affect the biological properties of water, in particular the degree of its coherence.*

*The paper proposes information technology for image processing of gas-discharge radiation of water samples, which allows to qualitatively and quantitatively assess the biological properties of water associated with the degree of its coherence. Information technology contains computational procedures that perform the functions of constructing histograms of images of gas-discharge radiation of water, statistical analysis of quantitative features of the histogram, calculation of medians and median differences in the intervals of histogram data grouping.*

*To perform the classification by type of water used metric – Euclidean distance. It is calculated for medians in histogram intervals or for median differences.*



*The proposed information technology was used to process the experimental results obtained in the form of images of gas-discharge radiation of liquid samples in the field of high-voltage discharge. Samples of distilled and artificially activated water were used in the research.*

*The obtained results of application of information technology confirmed the reliability and reproducibility of the method for control samples of distilled water. For artificially activated types of water, an increase in the degree of coherence was found in comparison with control samples of distilled water, which was chosen as the standard incoherent.*

**Key words:** *water quality, coherent state, gas discharge radiation, digital image processing.*

**Завгородній О.І.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін Д.А.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Котко Я.М.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін А.В.**

Харківський національний технічний університет сільського господарства імені Петра Василенка

## **ЕКОНОМІКО-МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОГНОЗУВАННЯ ЙМОВІРНИХ РИЗИКІВ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ**

*Актуальність дослідження розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей зумовлена необхідністю підвищення якості функціонування технологічних і біотехнологічних процесів, стан об'єктів яких вони описують. Наведені результати досліджень авторів можуть бути використані для оптимізації параметрів випромінювачів під час розтину штучної та натуральної шкіри, лазерної сварки біологічного матеріалу, ділення ранніх елітних ембріонів.*

*У статті побудована крайова задача диференціальних рівнянь теплопровідності, які описують стан багатошарового об'єкта під дією дискретних джерел випромінювання. Коректність розрахункової та прикладних оптимізаційних математичних моделей доведена за допомогою використання методів, заснованих на теорії диференціальних і псевдодиференціальних операторів у просторі узагальнених функцій степеневого зростання. Водночас через те, що для реалізації прикладних оптимізаційних математичних моделей потрібне значення температурного поля, то їхня коректність зумовлена коректністю крайових задач, які лежать в основі розрахункових математичних моделей.*

*Використавши методи відокремлених змінних і невизначених коефіцієнтів, знайшли розв'язок крайової задачі процесу термічної дії на кулястий тришаровий матеріал. Для оцінки травмованості технологічної системи автори пропонують використати декілька прикладних оптимізаційних математичних моделей. За допомогою поверхневого співвідношення об'ємів травмованого матеріалу до об'єму всього матеріалу в статті відшуканий відсоток травмованості досліджуваного об'єкта. На основі проведених розрахунків обґрунтовано вибір алгоритму аналізу ефективності процесу термічної дії на матеріал. Проведені дослідження можна розглядати як різновид економіко-математичного моделювання прогнозування ймовірних ризиків під час забезпечення технологічних процесів термічного навантаження на матеріал.*

**Ключові слова:** технологічні процеси, оптимізація, крайові задачі, економіко-математичне моделювання, ризик.

**Постановка проблеми.** Питанням оптимізації технологічних, механічних, електротехнічних, біотехнологічних та інших систем присвячено велику кількість наукових публікацій і розробок. Це пов'язане перш за все з тим, що дослідження стану модельованих систем знаходиться в різних наукових областях. Окрім того, специфіка оптимізації таких систем полягає в тому, що для розв'язання прикладних оптимізаційних математичних моделей пошуку раціональних значень управляючих параметрів фізичних полів необхідно забезпечити ітераційний процес побудови і розв'язання великого числа крайових задач, що

призводитиме до збільшення часу. До того ж, у зв'язку з тим фактом, що досить часто доводиться здійснювати математичне моделювання багатошарових систем, то необхідно показати, чи буде система диференціальних рівнянь з крайової задачі мати і до того ж єдиний розв'язок.

У статті запропоновано алгоритм для здійснення оптимізації технологічних систем, які містять джерела навантаження фізичних полів. Відзначимо, що проведені авторами розрахунки можна трактувати як різновид економіко-математичного моделювання технологічних процесів з метою прогнозування ймовірних ризиків витрат

досліджуваного матеріалу. Авторами розв'язана система диференціальних рівнянь теплопровідності з крайовою задачею, яка описує стан досліджуваної системи, запропоновані декілька прикладних оптимізаційних математичних моделей для оптимізації функції мети і параметрів систем, розраховані втрати досліджуваного матеріалу при здійсненні технологічного процесу. Результати проведених розрахунків можуть бути використані для прогнозування ймовірних ризиків витрат досліджуваного матеріалу при забезпеченні технологічних, біотехнологічних, механічних та інших процесів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Деякі питання економіко-математичного моделювання для прийняття управлінських рішень контролю можливих ризиків на підприємствах розглянуті в роботах [1–11]. Фундаментальні дослідження стосовно до розв'язання прикладних задач розрахунку та оптимізації технологічних і біотехнологічних систем наведені в роботах [1–7]. Авторами публікацій [1–7] наведені та детально досліджені методи і алгоритми для розв'язання цілої низки розрахункових і прикладних оптимізаційних задач. Запропонований комплексний підхід до розрахунку економічного ефекта функціонування транспортних [8; 9] і аграрних підприємств [10; 11] в умовах дії факторів ринкової економіки. Для роботи результати досліджень [1–11] важливі в контексті аналізу можливих підходів до вирішення прикладних задач економіко-математичного моделювання, які виникають у різних галузях. До того ж, дослідження цієї статті можуть бути застосовані для розрахунку можливих ризиків технологічних, біотехнологічних, електротехнічних і гідродинамічних процесів. Зазначають зміни постановки розрахункових математичних моделей і, можливо, методи реалізації розрахунку та спрямованого перебору локальних екстремумів функції мети, але сам алгоритм для прогнозування ймовірних ризиків залишиться без змін.

**Постановка завдання.** Вдосконалити чисельний алгоритм прогнозування ймовірних ризиків технологічних процесів за рахунок реалізації декількох прикладних оптимізаційних моделей для пошуку рекордних значень управляючих параметрів технологічних систем.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для побудови економіко-математичної моделі прогнозування ймовірних ризиків витрат досліджуваного матеріалу при забезпеченні технологічних процесів авторами запропонований комплексний підхід. У статті вдосконалені результати отримані

в публікації [12], в частині врахування специфіки модельованого процесу термічної дії на тришаровий матеріал.

Розглянемо процес точкового термічного навантаження на тришаровий матеріал. Для визначеності, в якості досліджуваного об'єкта будемо розглядати ембріон під дією лазерним променем. В основі розрахункової математичної моделі, яка описує стан модельованої системи лежить система диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} 5.5 \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0.7 \left( \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + 55; \\ 5.44 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.96 \left( \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + 94; \\ 5 \frac{\partial T_4}{\partial t} = 0.9 \left( \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{2}{r_4} \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + 452, \end{cases} \quad (1)$$

де  $r$  – просторова координата проникнення випромінювання;

$t$  – часова координата.

Граничні умови Дірихле служать для завдання початку та кінця дії випромінювання:

$$\begin{cases} T(0; 0) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ T(55; 185) = 37 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (2)$$

Граничні умови третього роду:

$$-0,67 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 4,4. \quad (3)$$

Питомий тепловий контакт:

$$\begin{cases} T_1(20; 35) = T_2(30; 70), & -0,71 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r}; \\ T_2(30; 70) = T_3(40; 105), & -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r}; \\ T_3(40; 105) = T_4(50; 140), & -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -0,91 \frac{\partial T_4}{\partial r}. \end{cases} \quad (4)$$

Рівності неперервності температурних полів:

$$\begin{cases} T(20; 35 - 0) = T(20; 35 + 0); \\ T(30; 70 - 0) = T(30; 70 + 0); \\ T(40; 105 - 0) = T(40; 105 + 0); \\ T(50; 140 - 0) = T(50; 140 + 0). \end{cases} \quad (5)$$

Для доведення коректності розглянутої багатоточкової крайової задачі застосована теорія диференціальних і псевдодиференціальних операторів у просторі узагальнених функцій степеневого зростання. Це дало можливість авторам отримати умови коректності розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей.

Розбивши розв'язок диференціального рівняння теплопровідності на суму загального однорідного та часткового неоднорідного розв'язку і використавши метод відокремлених змінних, отримали два диференціальні рівняння:

$$v'(t) = cv(t), \quad (6)$$

$$u''(r) + \frac{2}{r}u'(r) - 5.6cu(r) = 0. \quad (7)$$

Розв'язок диференціального рівняння (6) отримати не складно ( $v(t) = e^{ct}$ ), тоді, як розв'язок диференціального рівняння (7) потрібно шукати у вигляді степеневого ряду:

$$u(r) = \sum_{k=0}^{\infty} c_k r^{k-1}. \quad (8)$$

Далі, підставивши розв'язок  $v(t) = e^{ct}$  та степеневий ряд (7) в диференціальне рівняння з системи (1) та провівши низку обчислень, отримали функцію розподілу температурного поля:

$$T(r, t) = 100e^{ct} \sum_{k=0}^{\infty} \frac{(5.6c)^k r^{2k}}{((2k+1)!!)^2} - q_e r^2, \quad (9)$$

де  $q_e$  – питома густина потужності теплових навантажень в матеріалі.

Для обчислення температури нагріву в шарах досліджуваного матеріалу розглянемо, в загальному вигляді, розв'язок рівняння теплопровідності на брусі  $[t_1, t_2] \times [r_1, r_2]$ :

$$T(r, t) = c_1 e^{ct} \left( 1 + \frac{cr^2}{9a} + \dots \right) - \frac{qr^2}{6a} \quad (10)$$

з крайовими умовами Діріхле:

$$\begin{cases} T(r_1, t_1) = T_1; \\ T(r_2, t_2) = T_2. \end{cases} \quad (11)$$

Підставивши крайові умови (11) в розв'язок (10), отримали систему двох рівнянь:

$$\begin{cases} c_1 e^{ct_1} \left( 1 + \frac{cr_1^2}{9a} + \dots \right) = T(r_1, t_1) + \frac{qr_1^2}{6a}; \\ c_1 e^{ct_2} \left( 1 + \frac{cr_2^2}{9a} + \dots \right) = T(r_2, t_2) + \frac{qr_2^2}{6a}. \end{cases} \quad (12)$$

Розділимо перше рівняння на друге:

$$e^{c(t_1-t_2)} = \frac{T(r_1, t_1) + \frac{qr_1^2}{6a}}{T(r_2, t_2) + \frac{qr_2^2}{6a}} \times \frac{\left( 1 + \frac{cr_2^2}{9a} \right)}{\left( 1 + \frac{cr_1^2}{9a} \right)}. \quad (13)$$

Отже:

$$c_1 = \frac{T(r_1, t_1) + \frac{qr_1^2}{6a}}{e^{ct_1} \left( 1 + \frac{cr_1^2}{9a} \right)}. \quad (14)$$

Використавши метод невизначених коефіцієнтів, отримали, що температура нагріву клітин становить  $65^\circ\text{C}$ , периветильованого простору –  $86,2^\circ\text{C}$ .

Для оптимізації температурного поля та параметрів випромінювачів скористаємося прикладними оптимізаційними математичними моделями.

Математична модель 1 полягає в мінімізації максимального значення модуля різниці між отриманими значеннями температурного поля і його припустимими значеннями:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} |T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*) - T^*|, \quad (15)$$

де  $T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*)$  – температурне поле (функція мети);  $(x_i, y_i, z_i) \in \Omega^*$  – область матеріала;  $z^*$  – вектор параметрів дії, до якого входять: розмір області матеріалу, час дії випромінювання, інтенсивність та енергія випромінювання, траєкторія та швидкість руху джерела поверхнею матеріалу, густина термічного навантаження;  $t_0$  – початковий момент часу дії випромінювання;  $t^*$  – кінцевий момент часу;  $T^*$  – припустиме значення температурного поля.

Математична модель 2 гарантує досягнення мінімуму максимального значення температурного поля в точках контролю:

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} T_i(x_i, y_i, z_i, t, z^*). \quad (16)$$

Позначення залишаються такими ж, як в математичній моделі 1.

Математична модель 3 полягає в мінімізації об'ємів травмованого матеріалу.

$$\min_{z^* \in Z} \max_{\substack{(x_i, y_i, z_i) \in \Omega_i \\ i=1, N \\ t \in [t_0, t^*]}} \frac{V_{\text{segm.}}(T)}{V} \times 100\%, \quad (17)$$

де  $V_{\text{segm.}}(T)$  – об'єм травмованого сегменту матеріала;  $V$  – об'єм цілого матеріалу.

Інші позначення залишаються такими ж, як в математичній моделі 1.

Формула для розрахунку об'єму  $V_{\text{segm.}}(T)$  травмованого сегменту матеріала:

$$V_{\text{segm.}}(T) = \pi \left( r_1 h_1 - \frac{h_1^3}{3} \right), \quad (18)$$

де  $h_1$  – відрізок просторової координати  $r_1$ .

Використовуючи інтегральний критерій (математична модель 3), розрахували, що клітини травмовані приблизно на 11%. Цей результат є уточненими у порівнянні з отриманим результатом в публікації [7]. Більш детальніше реалізація розрахункових і прикладних оптимізаційних математичних моделей наведена в публікаціях авторів [12–15].

**Висновки.** У статті наведений різновид економіко-математичного моделювання прогнозування ймовірних ризиків при забезпеченні технологічних процесів. У якості досліджуваного об'єкта авторами розглянутий ембріон під дією локальних, дискретних джерел випромінювання. Використавши методи експертного оцінювання параме-

трів випромінювачів і виходячи з теплофізичних характеристик досліджуваного об'єкта, авторами побудована крайова задача процесу термічної дії, за допомогою методів відокремлених змінних і невизначених коефіцієнтів розраховані температури дії на матеріал. Для пошуку локальних екстремумів технічних параметрів випромінювачів і оцінки витрат матеріалу в статті запропоновано використати декілька прикладних оптимізаційних

математичних моделей. Використавши відношення об'ємів травмованого матеріалу до об'єму всього піддослідного матеріалу, знайдена травмованість останнього. Отримані результати дали змогу авторам підвищити якість технологічного процесу термічної дії на матеріал за рахунок вдосконалення методики прогнозування втрат піддослідного матеріалу і витрат ресурсів програмно-апаратних засобів забезпечення технологічних процесів.

#### Список літератури:

1. Стоян Ю.Г., Яковлев С.В. Математические модели и оптимизационные методы геометрического проектирования. Киев : Наукова думка, 1986. 268 с.
2. Рвачев В.Л., Слесаренко А.П. Алгебро-логические и проекционные методы в задачах теплообмена. Киев : Наукова думка, 1978. 140 с.
3. Scoblo T.S., Klochko O.Y., Romanchenko V.N., Belkin E.L. Features of the carbide phase degradation under heating and deformation. *Letters on Materials*. 2021. Vol. 11. Issue 1. P. 22–27.
4. Скобло Т.С., Мартыненко А.Д., Бантковский В.А., Гончаренко А.А., Сайчук А.В., Тихонов А.В., Лысенко С.В. Использование лазерных технологий для упрочнения и восстановления изделий из сталей и сплавов. *Технічний сервіс агропромислового, лісового та транспортного комплексів*. 2019. № 15. С. 142–162.
5. Макаров А.А., Николенко И.Г. Частичная параболичность краевой задачи для псевдодифференциальных уравнений в слое. *Вісник Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна. Серія: Математика, прикладна математика і механіка*. Харків, 2019. Т. 89. С. 21–32. DOI: 10.26565/2221-5646-2019-89-03.
6. Пташник Б.Й., Льків В.С., Кмить І.Я., Поліщук В.М. Нелокальні крайові задачі для рівнянь із частинними похідними. Київ : Наукова думка, 2002. 416 с.
7. Douglas-Hamilton D.H., Conia J. Thermal effects in laser-assisted pre-embryo zona drilling. *Journal of Biomedical Optics*. 2001. Vol. 6. Issue 2. P. 205. DOI: 10.1117/1.1353796.
8. Бережна Н.Г., Біляєва О.С., Войтов В.А., Горяїнов О.М., Карнаух М.В., Кравцов А.Г., Кутья О.В., Музильов Д.О., Шраменко Н.Ю. Проблеми транспортно-логістичного забезпечення в аграрній галузі. Харків : Міськдрук, 2019. 180 с.
9. Vojtov V., Kutiya O., Berezhnaja N., Karnaukh M., Belyaeva O. Modeling of reliability of logistic systems of urban freight transportation taking into account street congestion. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. Vol. 4. No. 3. P. 15–21. DOI: 10.15587/1729-4061.2019.175064.
10. Levkina R.V., Kravchuk I.I., Sakhno I.V., Kramarenko K.M., Shevchenko A.A. The economic-mathematical model of risk analysis in agriculture in conditions of uncertainty. *Financial and credit activity: problems of theory and practice*. 2019. Vol. 3. No. 30. P. 248–255.
11. Levkina R., Petrenko A. Management of innovative marketing techniques as an effective business tool. *Agricultural and Resource Economics: International Scientific E-Journal*. 2019. Vol. 5. Issue 1. P. 37–47. DOI: 10.22004/ag.econ.287141.
12. Levkina R., Levkin A., Petrenko A., Kolomiets N. Current approaches to biotechnology in animal husbandry. *International Journal of Advanced Science and Technology*. 2020. Vol. 29. Issue 8. Special issue. P. 2463–2469.
13. Левкін Д.А. Методологія дослідження технологічних процесів. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2020. Т. 31(70). № 4. С. 93–97. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2020.4/13>.
14. Skoblo T.S., Sidashenko O.I., Saichuk O.V., Klochko O.Y., Levkin D.A. Influence of Stresses on Structural Changes in Gray Cast Iron. *Materials Science*. 2020. Vol. 56. Issue 3. P. 347–358.
15. Левкин Д.А. Математическое моделирование и оптимизация многослойных систем. *Енергетика і автоматика*. Київ : НУБіП України, 2019. № 1(41). С. 45–56. DOI: 10.31548/energiya2019.01.045.

#### Zavgorodniy A.I., Levkin D.A., Kotko Ya.M., Levkin A.V. ECONOMIC AND MATHEMATICAL MODELING OF PROBABILITY RISK FORECASTING OF TECHNOLOGICAL PROCESSES

*The relevance of the work of computational and applied optimization mathematical models is due to the necessity to improve the quality of technological and biotechnological processes, the state of the described objects. The results of the authors' research can be used to optimize the parameters of the emitters in the opening of artificial and natural leather, laser welding of biological material, division of early elite embryos.*

*The boundary value problem of differential equations of thermal conductivity, which describes the state of a multilayer object under the action of discrete radiation sources, is constructed in the article. The correctness of computational and applied optimization mathematical models is proved by using methods based on the theory of differential and pseudodifferential operators in the space of generalized functions of power growth. Moreover, since the implementation of applied optimization mathematical models requires the value of the temperature field, the correctness of applied optimization mathematical models is due to the correctness of the boundary value problems that underlie the calculated mathematical models.*

*Using the methods of separate variables and indeterminate co-efficients, we found a solution to the boundary value problem of the process of thermal action on a spherical three-layer material. To assess the injury of the technological system, the authors propose to use several applied optimization mathematical models. Using the surface ratio of the volumes of thermally injured material to the volume of all material in the article, the trauma of the investigated object was found. Based on the calculations, the choice of the algorithm for analyzing the efficiency of the process of thermal action on the material is substantiated. The conducted researches can be considered as a kind of economic and mathematical modeling of forecasting of probable risks at maintenance of technological processes of thermal loading on material.*

**Key words:** *technological processes, optimization, boundary value problems, economic and mathematical modeling, risk.*

**Кандиба І.О.**

Чорноморський національний університет імені Петра Могили

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ВИБІР КРАЩОГО СЦЕНАРІЮ ВСТУПНОЇ КАМПАНІЇ ЗАКЛАДУ ВИЩОЇ ОСВІТИ

У статті наведено аналіз сучасних методів багатокритеріальної оптимізації: оптимальності за Парето, методу послідовних поступок, методу головного критерію та методу лінійної згортки. Досліджено можливість реалізації зазначених методів багатокритеріальної оптимізації в інформаційній системі генерації сценаріїв на основі графових структур. Запропоновано предметно-орієнтовану мову для опису цільових функцій. Зроблена пропозиція граматики для запису цільових функцій під час застосування оптимальності за Парето. Зображено абстрактні синтаксичні дерева зазначених грамастик. Згенеровано лексичні й синтаксичні аналізатори для обробки вхідного рядка з описом функцій оптимізації. Представлено алгоритм знаходження множини Парето оптимальних рішень із множини згенерованих сценаріїв. Описано основний принцип та алгоритм реалізації методу послідовних поступок під час вибору кращих за певними критеріями або їх сукупністю сценаріїв серед множини згенерованих. Представлено особливості реалізації методу головного критерію в інформаційній системі генерації множини сценаріїв. Наведено граматику для обробки вхідного рядка, що містить функцію оптимізації та обмеження методу головного критерію. Зображено опис методу лінійної згортки й алгоритм реалізації для інформаційної системи генерації сценаріїв на основі графових структур. Запропоновано граматику правил для вхідного рядка реалізації методу лінійної згортки. Сформовано програмну реалізацію всіх досліджених методів багатокритеріальної оптимізації. Наведено опис інтерфейсу, що дозволяє особі, що приймає рішення (ОПР), робити вибір одного з реалізованих методів багатокритеріальної оптимізації з можливістю опису функцій оптимізації та перегляду кращих сценаріїв. Як приклад застосування розроблених засобів обрано сценарний аналіз проведення вступної кампанії закладу вищої освіти (ЗВО) на основі реалізованих методів багатокритеріальної оптимізації. Визначено подальші шляхи розвитку розробленої інформаційної технології.

**Ключові слова:** багатокритеріальна оптимізація, метод послідовних поступок, метод лінійної згортки, метод головного критерію, оптимальність за Парето, предметно-орієнтована мова програмування.

**Постановка проблеми.** Задачі передбачення завжди ведуть до етапу прийняття рішень [1, с. 24]. Це твердження вірне для задачі передбачення вступної кампанії закладу вищої освіти (далі – ЗВО), що можна розв’язувати методами сценарного аналізу.

Визначивши множину можливих подій вступної кампанії та сформувавши взаємозв’язки між цими діями можливо застосувати метод генерації сценаріїв на основі графової моделі [2, с. 152]. Результатом вищеописаних дій є множина сценаріїв, що являють собою альтернативні варіанти проведення вступної кампанії. Кожен з генерованих сценаріїв має набір характеристик (критеріїв), при цьому вибір оптимального сценарію проведення вступної кампанії являє собою задачу багатокритеріальної оптимізації.

Необхідно визначити сценарій, при якому буде, під кутом зору оптимізації набору критеріїв в цілому, узгоджено декілька конфліктних цільових функцій: мінімізовано витрати на проведення

вступної кампанії, максимізовано середній бал абітурієнта, мінімізовано витрачений час викладачів залучених до вступної кампанії та інше. Наведені вимоги обумовлюють актуальність розв’язання задачі багатокритеріального вибору кращого сценарію серед генерованих спеціальними мовними засобами, в тому числі для вступної кампанії ЗВО.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Незважаючи на метод, за яким було генеровано множину сценаріїв для вибору найбільш вдалого сценарію необхідне використання методів підтримки прийняття рішень при багатокритеріальної оптимізації [3, с. 91].

У роботі [4, с. 568] описане застосування методу аналізу ієрархій (далі – МАІ) для оцінки критеріїв, за якими порівнюються потенційні постачальники та визначення оптимальної альтернативи. Автори описують послідовність реалізації МАІ для альтернатив, що задані користувачем в ручну. У роботі недостатньо повний опис можливості застосування МАІ для множини згенерованих альтернатив.

Робота [5, с. 27] містить опис та розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації для галузі вантажоперевезень. Досліджено оптимальність за Парето та актуальність її застосування у транспортних задачах. Однак, у роботі не запропоновано універсальних програмних реалізацій цього методу багатокритеріальної оптимізації.

Застосування методу послідовних поступок є одним з розповсюджених при розв'язання задач багатокритеріальної оптимізації, що описано в роботі [6, с. 143]. У ній представлено можливість застосування методу послідовних поступок для визначення раціонального сценарію підвищення рентабельності виробництва малого підприємства. Наведено опис математичного апарату застосування методу послідовних поступок, але недостатньою увагу приділено його програмній реалізації.

У роботі [7, с. 26] задачу багатокритеріальної оптимізації для вибору джерела альтернативної енергії пропонується розв'язувати на основі методу лінійної згортки. Робота містить опис математичного апарату для реалізації методу лінійної згортки, але не запропоновано програмних засобів реалізації цього методу.

У роботі [7, с. 25] описується можливість застосування методу головного критерію для розв'язання задачі багатокритеріальної оптимізації, але для цього методу також не запропоновано програмних засобів реалізації.

Виконаний аналіз показав, що питання багатокритеріальної оптимізації актуально для багатьох галузей діяльності, але питання програмних засобів реалізації методів багатокритеріальної оптимізації потребують подальших досліджень, зокрема щодо розроблення інформаційних технологій із застосуванням мовних засобів моделювання предметних галузей та генерації сценаріїв на їх основі і багатокритеріальної оптимізації.

**Постановка завдання.** Метою дослідження є розробка інформаційної технології для вибору кращого сценарію з множини згенерованих. Створення відповідної інформаційної системи дозволить обирати серед множини згенерованих найбільш ефективний сценарій, зокрема при проведенні вступної кампанії університету на основі багатокритеріальної оптимізації. Для досягнення зазначеної мети поставлені такі задачі:

- дослідження методів багатокритеріальної оптимізації, що можливо застосувати для вибору найбільш оптимального сценарію проведення вступної кампанії;

- розробка предметно-орієнтованої мови програмування для опису цільових функцій для множини критеріїв згенерованої на основі графових структур;

- реалізація методів багатокритеріальної оптимізації для визначення найбільш оптимального сценарію серед згенерованих.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Генерація сценаріїв може здійснюватися на основі використання комбінацій різних груп методів [3, с. 91]:

- якісні методи генерації сценаріїв (метод Делфі, метод мозкового штурму, метод аналогій, морфологічний аналіз та ін.);

- графові методи генерації сценаріїв (дерево подій, дерево ймовірностей, дерево відмов).

Кожна група методів має власні особливості, але не залежно від них на виході етапу генерації має бути множина сценаріїв. Кожен сценарій має набір характеристик, на які спи-

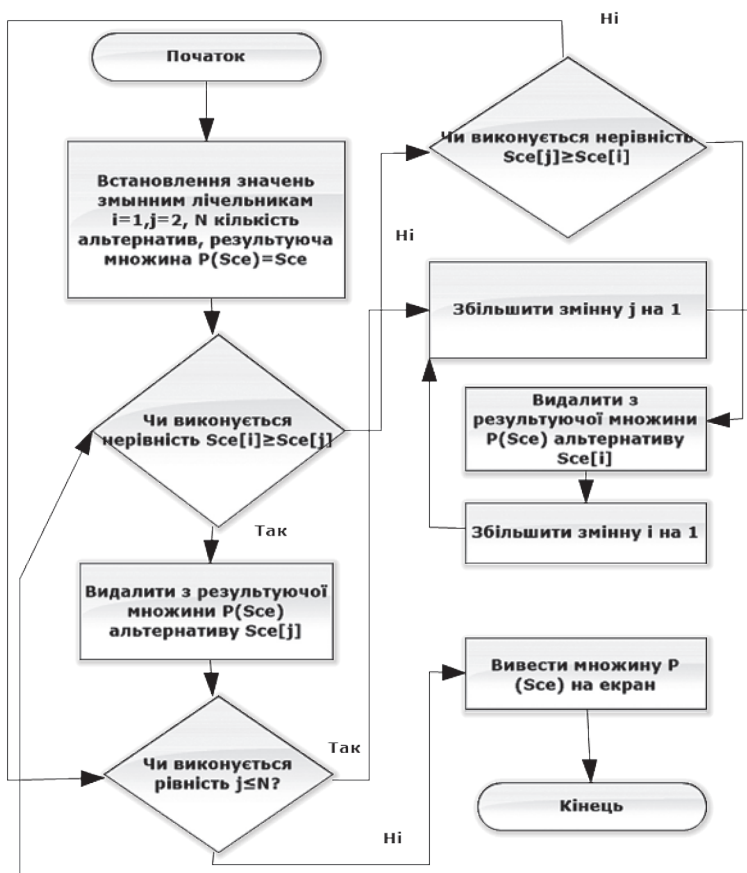


Рис. 1. Блок-схема алгоритму знаходження множини Парето оптимальних рішень



рається особа, що приймає рішення (далі – ОПР) під час вибору оптимального.

Розв’язання задачі багатокритеріального вибору або задачі багатокритеріальної оптимізації може бути здійснене за допомогою різних методів. Одним із найвідоміших методів розв’язання задачі багатокритеріальної оптимізації є оптимальність за Парето [5 с. 27]. Основна ідея оптимальності за Парето полягає в існуванні альтернатив, жодну характеристику з яких не можливо покращити без погіршення іншої. Тобто математично множину Парето оптимальних альтернатив можна представити таким чином [8, с. 13]:

$$P(\text{Sce}) = \{ \text{Sce}^* \in \text{Sce} \mid \text{не існує } \text{Sce}' \in \text{Sce}, \text{ для якої } \text{Sce}' > \text{Sce}^* \},$$

де Sce – множина альтернатив.

Вибір оптимальних рішень здійснюється шляхом максимізації чи мінімізації певного критерію [6, с. 143].

Алгоритм знаходження множини Парето оптимальних рішень описано у роботі [8, с. 13]. Отже можливо представити алгоритм у вигляді блок схеми, зображеної на рис. 1.

При використанні інформаційної системи для генерації множини сценаріїв кожен з них можна представити кортежем, що у якості елементів містить характеристики сценарію, а множину сценаріїв у вигляді масиву [2, с. 154]. В інтерфейсі користувача сценарії відображаються за допомогою таблиці (рис. 2).

У роботі [2, с. 154] описано підхід до генерації сценаріїв за допомогою графової бази даних з використанням у якості вершин графу подій, а у якості ребер взаємозв’язків. Характеристики сценарію згенерованого за методом, описаним у [2, с. 154], розраховуються за допомогою агрегатних функцій.

Визначення оптимального сценарію вимагає підключення модулю методів багатокритеріальної оптимізації. До складу цього модулю окрім реалізації математичної основи багатокритеріальної оптимізації має входити інтерфейс опису цільових функцій.

Реалізація інтерфейсу для запису цільових функцій можлива на основі предметно-орієнтованої мови програмування. Скоротити час створення предметно-орієнтованої мови можливо шляхом використання засобів автоматичної генерації аналізаторів [9, с. 2].

На першому кроці створення предметно-орієнтованої мови необхідний опис граматичних правил за допомогою форм Бекуса-Наура (далі – БНФ) [10, с. 76]:

<ОптимальністьЗаПарето> ::= <Функція> | <ОптимальністьЗаПарето>, <Функція>;

<Функція> ::= <Оптимальність> («<НазваКритерію>»);

<Оптимальність> ::= minimization | maximization»;

<НазваКритерію> ::= [A-Za-z0-1]+;

	summ(financial_expeses)	summ(increasing_perc_entage_entrants)	avg(average_score_entrants)	
2200	9000	17	175.0	Відвідування технікумів
2201	8500	17	177.5	Проведення підготовчих і
2202	7800	14	175.0	Відвідування технікумів
2203	7800	17	175.0	Відвідування технікумів
2204	7300	22	177.5	Залучення до викладанн
2205	9000	17	175.0	Відвідування технікумів
2206	8500	17	177.5	Проведення підготовчих і
2207	8500	20	177.5	Проведення підготовчих і
2208	7800	17	175.0	Відвідування технікумів
2209	7300	17	177.5	Проведення підготовчих і
2210	9000	17	175.0	Відвідування технікумів
2211	8500	17	177.5	Проведення підготовчих і
2212	8500	17	177.5	Проведення підготовчих і
2213	7800	17	175.0	Відвідування технікумів
2214	8500	20	177.5	Проведення підготовчих і
2215	7800	17	175.0	Відвідування технікумів

Рис. 2. Зображення множини згенерованих сценаріїв

У [9, с. 2] досліджено, що для подібних мов оптимальним засобом генерації аналізаторів для предметно-орієнтованих мов є Unicc. Цей інструмент дозволяє автоматичну генерацію лексичного та синтаксичного аналізаторів на основі опису граматик у вигляді БНФ. Основними перевагами інструменту є підтримка кирилиці та швидкодія розроблених аналізаторів [9, с. 2].

Визначити оптимальну за Парето альтернативу можна визначити задавши запит: minimization (“summ(actual\_hours)”), minimization (“summ(financial\_expeses)”), maximization (“avg(average\_score\_entr)”), де характеристиками сценарію є summ(actual\_hours) – сумарна кількість фактичних годин викладача витрачених на вступну кампанію, summ(financial\_expeses) – сумарна кількість витрачених фінансів, avg(average\_score\_entrants) – середній бал атестату абітурієнта, що братиме участь у подіях сценарію. Абстрактне синтаксичне дерево для цього запиту зображено на рис. 3.

Інший актуальний підхід до багатокритеріальної оптимізації – метод послідовних поступок. У основі методу послідовних поступок лежить ідея про те, що критерії мають різну важливість.

Використання методу послідовних вимагає впорядкування всіх критеріїв зростанням важливості:

$$f_1(g_i) > f_3(g_i) > f_3(g_i) > \dots > f_j(g_i),$$

де  $f_j(g_i)$  – функція оптимальності  $j$ -го критерію у  $i$ -тій альтернативі.

За алгоритмом на першому кроці необхідно знайти мінімальні або максимальні значення першого за важливістю критерію в залежності від функції оптимізації. На наступному з утвореної на першому кроці множини альтернатив необхідно обрати оптимальні альтернативи за функцією оптимізації другого критерію і так далі.

Реалізація інтерфейсу для уведення функцій оптимізації та послідовності критеріїв можлива також за допомогою предметно-орієнтованої мови. У цьому випадку можливо застосувати аналізатори розроблені для попереднього методу.

Запит для визначення найбільш оптимально сценарію можна можливо у рядку такого вигляду: minimization (“summ(actual\_hours)”), maximization (“summ(Teachers\_hours\_according\_to\_the\_plan)”), minimization (“summ(financial\_expeses)”), maximization (“summ(increasing\_percentage\_entrants)”), maximization (“avg(average\_score\_entrants)”).

Обрати з множини згенерованих сценаріїв можливо застосувавши метод головного критерію. Алгоритм методу складається з таких кроків [11, с. 57]:

1) один з множини критеріїв  $q_1(g_i), q_2(g_i), q_3(g_i) \dots q_j(g_i)$  визначається як головний, наприклад  $q_1(g_i)$  – сумарна кількість годин викладачів за планом, що будуть витрачені на вступну кампанію;

2) для всіх інших критеріїв  $q_j(g_i)$  вводиться обмеження;

3) розв’язок однокритеріальної задачі, наприклад мінімізації:

$$q_1(g_i) \rightarrow \min$$

з обмеженнями:

$$q_1(g_i) \geq q_1^0, q_2(g_i) \geq q_2^0, q_3(g_i) \geq q_3^0 \dots q_j(g_i) \geq q_j^0$$

Реалізація методу головного критерію потребує створення окремого обробника виразів. За допомогою БНФ синтаксис обробника можливо представити таким чином:

<ОписГоловногоКритерію> ::= <ФункціяОптимізації>, <Обмеження>;

<Обмеження> ::= <ОбмеженняДляКритерію> | <Обмеження>, <ОбмеженняДляКритерію>;

<ОбмеженняДляКритерію> ::= «<НазваКритерію>» <Умова> <Значення>;

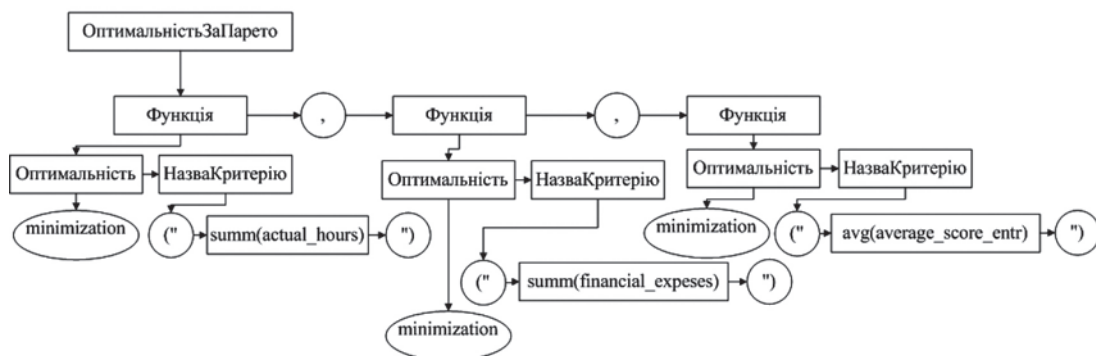


Рис. 3. Абстрактне синтаксичне дерево наведеного запиту

<Умова> ::= <> | <=> | <=> | <!=> | <=> | <=> | <=>;  
 <Значення> ::= ^[0-9]+(\.[0-9]{1,2})?;  
 <ФункціяОптимізації> ::= <Оптимальність> (<  
 <НазваКритерію>);  
 <Оптимальність> ::= minimization |  
 maximization;  
 <НазваКритерію> ::= [A-Za-z0-1]+;

Визначити оптимальні сценарії можливо ввівши запит такого вигляду: minimization("summ(actual\_hours)"), "summ(Teachers\_hours\_according\_to\_the\_plan)">24, "summ(financial\_expeses)"<9000, де обмеженнями є: сумарна кількість годин викладача за планом – Teachers\_hours\_according\_to\_the\_plan, що має бути більше ніж 24 годин та вартість всіх подій сценарію – financial\_expeses має бути менше ніж 9000, функцією оптимізації виступає мінімізація сумарна кількість фактичних годин викладачів витрачених на сценарій – summ(actual\_hours). Абстрактне синтаксичне дерево для цього запиту відображено на рис. 4.

Основою методу лінійної згортки є встановлення коефіцієнтів важливості критеріям [7, с. 25]. Сума коефіцієнтів  $\mu_1, \mu_2, \mu_3, \dots, \mu_n$  дорівнює одиниці, а функція домінування може бути представлена в такому вигляді [12, с. 75]:

$$Sc_e^* > Sc_e' \Leftrightarrow \sum_{i=1}^N q(g_i)^* > \sum_{i=1}^N q(g_i)'$$

До результуючої множини включаються лише альтернативи, що мають максимальним значенням суми критеріїв з врахуванням коефіцієнтів:

$$C(Sc_e) \subset \{Sc_e^o \in Sc_e | \sum_{i=1}^N q(g_i)^o = \max_{q(g) \in Sc_e} \sum_{i=1}^N q(g_i)\}$$

Реалізація методу для інтеграції до інформаційної системи автоматичної генерації сценаріїв вимагає створення граматики для встановлення вагових коефіцієнтів. Синтаксичні правила можна представити у вигляді БНФ:

<ЛінійнаЗгортка> ::= <КритерійЗкоефіцієнтом> | <ЛінійнаЗгортка>, <КритерійЗкоефіцієнтом>;  
 <КритерійЗкоефіцієнтом> ::= <НазваКритерію> >: <Коефіцієнт>;  
 <НазваКритерію> ::= [A-Za-z0-1]+;  
 <Коефіцієнт> ::= ^[0] (\.[0-9]{1,2});

Для визначення оптимальності можливо застосувати запит такого вигляду: summ(actual\_hours):0.3, summ(Teachers\_hours\_according\_to\_the\_plan):0.6, summ(financial\_expeses):0.1; де сумарна кількість годин викладача за планом – Teachers\_hours\_according\_to\_the\_plan, має коефіцієнт 0.6, вартість всіх подій сценарію – financial\_expeses має коефіцієнт 0.1 та сумарна кількість фактичних годин викладачів витрачених на сценарій – summ(actual\_hours) має коефіцієнт 0.3. Абстрактне синтаксичне дерево зображено на рис. 5.

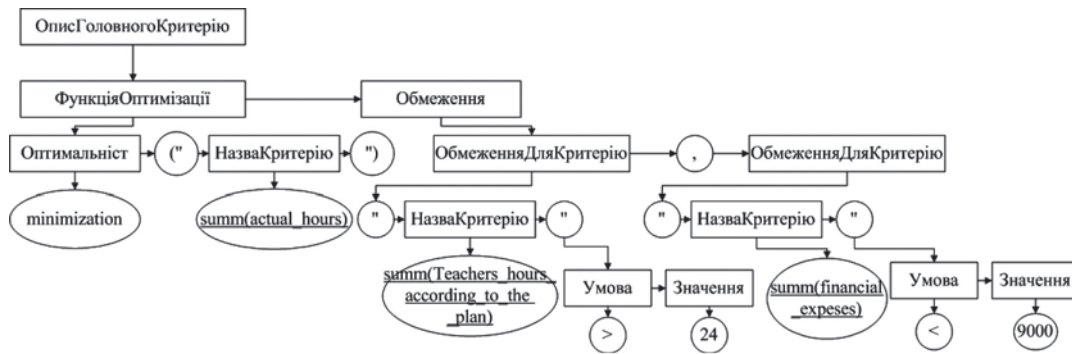


Рис. 4. Абстрактне синтаксичне дерево розбору для обробки методу головного критерію

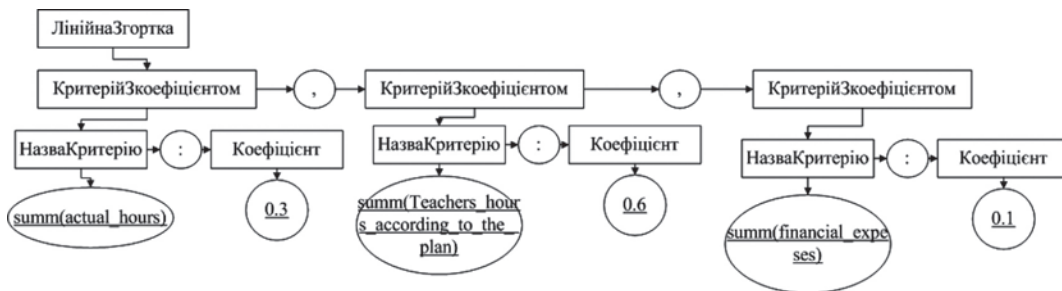


Рис. 5. Абстрактне синтаксичне дерево розбору для обробки методу лінійної згортки



Рис. 6. Приклад застосування методу головного критерію

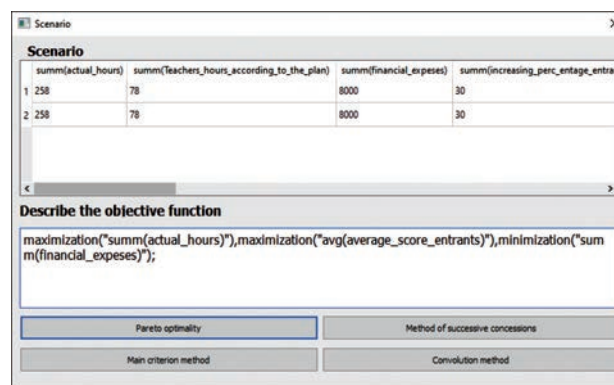


Рис. 7. Приклад застосування методу послідовних поступок

У задачах багатокритеріальної оптимізації популярним є МАІ. Цей метод на відміну від попередніх вимагає наявності експертних висновків для порівняння альтернатив за певними критеріями та попарного порівняння експертами впливу альтернатив на головну мету [13, с. 126]. Факт наявності множини згенерованих сценаріїв (альтернатив) робить неможливим реалізацію попарного порівняння та недоцільним реалізацію методу для вибору оптимального сценарію.

Інтерфейс користувача для вибору методу оптимізації реалізовано на основі модулю PyQt [14]. Для введення запиту реалізовано поле textEdit, відображення оптимальних сценаріїв реалізовано за допомогою компоненту tableWidget. Кожен метод багатокритеріальної оптимізації працює при натисканні відповідної кнопки.

Проведено вибір оптимального сценарію з множини згенерованих, що частково представлена на рисунку 1, з використанням методу головного критерію: головним критерієм визначено фактичну суму годин викладача, що має мінімізуватись, а у якості обмежень встановлено загальні фінансові витрати на сценарій в університеті, де

працює автор (менш ніж 9000 грн), та загальну кількість абітурієнтів, що будуть зацікавлені спеціальністю внаслідок подій сценарію (більш ніж 30) (рис. 6).

Також застосовано метод послідовних поступок для відбору оптимальних сценаріїв при максимізації сумарної фактичної кількості годин викладача витрачених на вступну кампанію, максимізації середнього балу викладача та мінімізації фінансових витрати на реалізацію сценарію (рис. 7).

**Висновки.** Проведено аналіз методів багатокритеріальної оптимізації. Розроблено інформаційну систему для реалізації методів: лінійної згортки, послідовних поступок, головного критерію та оптимальності за Парето. Розроблено граматики для опису функцій оптимізації кожного методу багатокритеріальної оптимізації. Представлено інтерфейс користувача, що дозволяє ОПР застосувати один з реалізованих методів.

В подальшому планується інтеграція підсистеми обробника мови реляційної алгебри до розробленої системи для розширення можливостей маніпуляції множиною згенерованих сценаріїв та підмножиною оптимальних.

#### Список літератури:

1. Згуровський М.З. Сценарный анализ как системная методология предвидения. Систем. дослідж. та інформ. технології. 2002. № 1. С. 7–38.
2. Fisun M.T., Kandyba I.O., Borovlyova S.Y., Falenkova M.V. Development of software platforms for scenario generation using DSL and Neo4j graph database. SYSTEMY ZARZĄDZANIA I SPOŁECZNOGOSPODARSTWO: NAUKOWE I PRAKTYCZNE ASPEKTY ZRÓWNOWAŻONEGO ROZWOJU ADMINISTRATIVE AND SOCIO-ECONOMIC SYSTEMS: SCIENTIFIC AND PRACTICAL ASPECTS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT : Monograph. Opole : The Academy of Management and Administration in Opole, 2021. P. 146–155.
3. Гожий А.П., Коваленко И.И. Системные технологии генерации и анализа сценариев. Автоматика. Автоматизация. Електротехнічні комплекси та системи. 2005. № 2. С. 89–96.
4. Щурова З.С., Жиров О.Л. Програмна реалізація задачі багатокритеріального вибору потенційного постачальника. Актуальні проблеми економіки та управління : збірник наукових праць молодих вчених. 2015. № 19. С. 568–575.

5. Задоров В.Б., Федусенко Е.В., Федусенко А.О. Застосування методів багатокритеріальної оптимізації до планування вантажних перевезень. Управління розвитком складних систем. Київський національний університет будівництва і архітектури. 2010. № 2. С. 27–30.
6. Марко М.Я., Цегелик Г.Г. Використання методу послідовних поступок для розв'язування задачі підвищення рентабельності виробництва малого підприємства. Наукові записки «Української академії друкарства». 2017. № 1. С. 141–146.
7. Леснік С.В., Хижняк Т.А. Застосування методу лінійної згортки для вибору джерела альтернативної енергії. Електроніка та Зв'язок. 2013. Т. 18. № 3. С. 24–30.
8. Ногин В.Д. Множество и принцип Парето. Санкт-Петербург : Издательско-полиграфическая ассоциация высших учебных заведений, 2020. 100 с.
9. Використання методу аналізу ієрархій для вибору засобів розробки синтаксичних аналізаторів при створенні DSL / М.Т. Фісун, І.О. Кандиба, Г.В. Горбань та ін. Наукові праці Вінницького національного технічного університету. 2021. № 1. URL: <https://praci.vntu.edu.ua/index.php/praci/article/view/628>.
10. Fowler M. Domain-Specific Languages. Boston : Addison-Wesley Professional, 2010. 640 p.
11. Файнзільберг Л.С., Жуковська О.А., Якимчук В.С. Теорія прийняття рішень. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. 246 с.
12. Ногин В.Д. Линейная свертка критериев в многокритериальной оптимизации. Искусственный интеллект и принятие решений. 2014. № 4. С. 73–82.
13. Методы системного анализа в задачах морских кластеров : монография / И.И. Коваленко, С.К. Чернов, А.В. Швед, Л.С. Чернова, Е.А. Антипова. Харьков : Новое слово, 2017. 268 с.
14. What is PyQt? Riverbank Computing : web-site. URL: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/> (дата звернення: 12.07.2021).

#### **Kandyba I.O. MULTI-CRITERIA SELECTION OF THE BEST SCENARIO FOR A UNIVERSITY ENTRANCE CAMPAIGN**

*The article gives an overview of modern multi-criteria optimization methods: Pareto optimality, method of successive concessions, main criterion method and linear convolution method. The possibility of implementing multicriteria optimization methods in a graph structure based scenario generation information system is investigated. Domain-specific language for description of target functions is proposed. The description of grammar for writing target functions in the application of Pareto optimality is given. The abstract syntactic trees of the given gramars are reflected. The lexical and syntactic parsers for processing of incoming string with description of optimality functions are created. An algorithm for finding Pareto set of optimal solutions from the set of generated scenarios is presented. The main principle and algorithm of realization of the method of successive concessions for selecting the best scenarios among the set of generated scenarios are described. The peculiarities of implementation of the main criterion method in an information system during generating a set of scenarios are presented. The grammar for processing incoming string containing optimization function and constraints of the main criterion method are given. The description of linear convolution method and implementation algorithm for information system of scenario generation based on graph structures are given. The syntax of grammar rules for the input string implementation of linear convolution method is proposed. A software implementation of all investigated multicriteria optimization methods is proposed. Description of the interface that allows a decision maker to choose one of the implemented methods of multicriteria optimization with the possibility of describing optimization functions and viewing optimal scenarios is given. The best scenarios for the admission campaign of the university based on the implemented methods of multicriteria optimization are selected.*

**Key words:** multi-criteria optimization, successive concessions method, linear convolution method, main criterion method, Pareto optimality, domain-specific language.

**Кишенько В.Д.**

Національний університет харчових технологій

**Кучер А.Є.**

Національний університет харчових технологій

**Крищенко Д.О.**

Національний університет харчових технологій

**Білецький М.С.**

Національний університет харчових технологій

## МЕТОДИ НЕЛІНІЙНОЇ ДИНАМІКИ І ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ ПІД ЧАС ОЦІНКИ ПОВЕДІНКИ ПРОЦЕСІВ РЕКТИФІКАЦІЇ СПИРТУ

*У статті розглядаються процеси ректифікації на спиртовому заводі, які можна характеризувати як складну динамічну систему. Метою роботи є підвищення ефективності виробництва спирту шляхом створення автоматизованої системи моніторингу процесу перегонки й на основі аналітичної обробки в режимі онлайн реалізація ефективної стратегії управління ресурсами за допомогою інтелектуальних механізмів. Аналіз часових рядів змінних процесу проводився методами нелінійної динаміки, що дозволило визначити значення випадковості, які ґрунтуються на глибині прогнозу поведінки об'єкта. На основі аналізу часових рядів провідних технологічних параметрів функціонування ректифікаційної установки виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переміжністю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних і хаотичних режимів в умовах нестационарності. Проведено оцінку хаотичності процесів ректифікації спирту: показники трендустійкості Херста, кореляційної та фрактальної розмірності. Представлено алгоритми визначення типів режимів функціонування ректифікаційної установки як динамічного нелінійного об'єкта керування. Процеси дистиляції характеризуються наявністю як стохастичних, так і хаотичних режимів, розмірності атракторів яких лежать в діапазоні від 3 до 8. Цей об'єкт має значну стабільність тенденції (стійкість), що характеризується високим значенням показника Херста в діапазоні від 0,7 до 0,96. Отримані результати забезпечать ефективну ідентифікацію відповідних моделей для прогнозування та прийняття рішень під час керування. Результати досліджень указують на наявність переміжності в технологічних процесах, що вимагає створення систем моніторингу для діагностичних режимів роботи дистиляційної установки. Оперативна ідентифікація детермінованих, стохастичних або хаотичних режимів методами нелінійної динаміки дає змогу реалізувати ресурсозберігаючі стратегії управління в алгоритмах управління технологічними процесами дистиляції, що підвищить ефективність функціонування дистиляційної установки.*

**Ключові слова:** виробництво спирту, ректифікаційна установка, об'єкт керування, нелінійна динаміка, детермінований хаос, часовий ряд.

**Постановка проблеми.** Процеси ректифікації спирту відносять до складних технологічних комплексів [1] через властиві для таких об'єктів керування особливості як багатофакторність, нестационарність, суттєва нелінійність взаємозв'язків між параметрами, великий рівень шумів та перешкод, значна невизначеність [2]. Такі чинники вимагають застосування відповідних методів аналізу оцінки стану та поведінки об'єкта керування для забезпечення адекватних реальним виробничим ситуаціям ефективних керуючих стратегій. Виняткову увагу заслуговують питання оцінки

характеру поведінки, що в значній мірі визначається складною взаємодією нелінійних зв'язків між факторами вдалині від стану рівноваги, через що виникають критичні та хаотичні режими [3]. Розпізнавання та ідентифікація таких особливих режимів можливі при умові використання методів синергетики, нелінійної динаміки та теорії детермінованого хаосу [4].

Нелінійна динаміка є науковою методологічною платформою, що дозволяє аналізувати рух різноманітних складних динамічних систем на основі об'єктивних законів їх розвитку.

Для ефективного управління складними нелінійними об'єктами виникає необхідність визначення наявності стійких різноманіть (атракторів) – областей притягання фазових траєкторій об'єкта, а в разі хаотичної поведінки – дивних атракторів, які мають фрактальну розмірність.

Найбільш перспективним додатком теорії нелінійних систем із хаотичною поведінкою є прогнозування динаміки породжуваних цими системами часових рядів.

Аналіз часових рядів істотно ускладнюється нелінійністю динамічних характеристик складного об'єкта управління, які призводять до різноманітних проявів в поведінці, включаючи кардинальні зміни.

Виходячи з теореми Такенса [4], за часовим рядом єдиної змінної складної нелінійної системи, можна встановити багато властивостей поведінки системи, визначити топологію атратора, оцінити розмірність (ємність) об'єкта, ідентифікувати структуру й параметри прогнозуючих предиктор-функцій.

Часові ряди технологічних змінних – це, власне, модель поведінки, яка визначає атрибути об'єкта керування, установлює його структурні зв'язки та причинно-наслідкові залежності, а також вплив зовнішніх дій [5]. Задача встановлення цих специфічних ознак вимагає розробки та вжитку таких методів і технологій, які направлені на оцінку характеристик об'єкта, що відтворюють ситуаційні прояви поведінки технологічних процесів ректифікації в умовах переміжності, тобто наявності послідовного чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів [3; 6].

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

Дослідження технологічних систем все більше ґрунтується на глибокому використанні математичних методів, які втілюються в математичних моделях, що дозволяють дослідити реальні процеси як аналітичним, так і експериментальним шляхом. Основними традиційними рисами моделей, які натеper застосовуються зарубіжними і вітчизняними вченими для аналізу та керування технологічними системами, є їх рівноважність, стаціонарність, лінійність, тобто розглядаються тільки окремі аспекти складних виробничих процесів в статичній і динамічній. До того ж ступінь нерівноважності сучасних технологічних процесів вимагає розробки нелінійних методів моделювання виробничих систем. Постановка цієї проблеми має сенс в зв'язку з тим, що сучасний бурхливий розвиток методів математичного моделювання та їх впровадження в практику керування технічними системами обумовлюється можливостями сучасних комп'ютерних технологій і достатніми потужнос-

тями комп'ютерного потенціалу виробництва, що забезпечує необхідний рівень відтворення всіх своєрідних проявів складної поведінки об'єктів керування, включаючи й хаотичний рух.

Методологія нелінійної динаміки і хаотичних систем форсує глибоке вивчення поведінки та структури складних технічних систем як об'єктів моделювання. Нелінійна динаміка згідно з концепцією русел і джокерів [4] встановлює горизонти прогнозування тільки на певних інтервалах часу (сегментах), від однієї точки біфуркації до іншої, або тільки на ділянках русел, де система змінюється більш-менш стабільно, а виникнення біфуркацій (джокерів) носить імовірнісний характер. Виходячи з цього, проблема коректного розбиття фазового простору складної динамічної системи з хаосом і ідентифікації на основі цього розбиття необхідних характеристик для задач прогнозування та управління шляхом побудови локальних моделей, що оптимізуються для конкретного характеру поведінки об'єкта, є досить актуальною.

Конкретне розбиття фазового простору на області визначення локальних моделей ґрунтується на методах виявлення змін деяких характеристик об'єкта. Для того, щоб успішно впоратись із завданнями моделювання, прогнозування та управління складними нелінійними об'єктами була розроблена теорія «русел» і «джокерів» [4]. «Джокери» є областю в фазовому просторі, в якій поведінка системи є погано передбачуваною і носить випадковий характер. На противагу «джокеру» «русла» – це області досить стійкої і, відповідно, прогнозованої поведінки.

Серйозною проблемою в моделюванні і прогнозуванні часових рядів, що містять хаотичну компоненту, є їх нестійкість до шумових збурень. Ця варіабельність призводить до необхідності фільтрації часових рядів від шуму, причому з урахуванням різноманітності і різного ступеня інтенсивності дії шумів, їх нерівномірного спектра на різних часових проміжках [4].

Значний внесок у розробку методів моделювання та прогнозування поведінки складних систем внесли роботи зарубіжних і вітчизняних вчених Х. Кантца [7], Ф. Такенса [8], П. Грасбергера й І. Прокачія [9], С.П. Курдюмова [10], Г.Г. Малинецького [4; 10], Л.Н. Сергєєвої [5; 11]. Однак у роботах перерахованих вчених і в результатах інших авторів, які аналізувалися під час проведення дослідження, не повною мірою розв'язана проблема побудови моделей, які б враховували ефекти самоорганізації, виникнення критичних режимів та кардинальних змінювань в технологічних об'єктах.

Теорія хаосу як один із напрямів нелінійної динаміки, винятковий інструмент, що дозволяє виявити глибинну сутність технологічних процесів, яка часто є прихованою і неявною.

Завдання управління складними технологічними системами ускладнено внаслідок нелінійності характеристик об'єкта, його багатовимірності, наявності численних складних зв'язків, протікання складних перехідних процесів, виникнення критичних і хаотичних режимів, і полягає в оперативному своєчасному розпізнаванні критичних станів у поведінці об'єкта і створення превентивних дій, спрямованих на усунення причин появи цих змін.

Сучасна теорія управління, побудована на кібернетичних принципах успішно освоїла методи достатньо грубого зовнішнього впливу примусового характеру на різні технічні об'єкти, що приводить до значущих затрат ресурсів для потреб керування.

Синергетичний підхід дозволяє розробити нові методи досягнення цільового стану об'єктивного управління, заснованого на процесах самоорганізації в нелінійних динамічних системах, та побудувати універсальні об'єктивні закони телеономного управління на основі вивчення фізико-хімічних властивостей, що мають об'єкти управління. При цьому основну увагу зосереджують на кооперативних, когерентних та взаємно узгоджувальних процесах, властивих складним нелінійним системам управління.

Важливим аспектом побудови синергетичних алгоритмів управління є необхідність створення методів аналізу причин виникнення, формування та дії внутрішніх сил резонансного характеру, прив'язки до виникнення у фазовому просторі

системи управління дисипативних просторово-часових структур, що відображають природні властивості об'єкта управління.

Ця принципово нова проблема теорії управління породжує необхідність вирішення самостійних конкретних завдань у конкретній предметній області – відповідній технології харчових виробництв. Тому розробка методів побудови моделей складних технологічних систем з урахуванням джерел складності і особливостей інформації щодо поведінки таких систем є актуальною науковою проблемою.

**Постановка завдання.** Мета статті полягає в розробці й обґрунтуванні алгоритмів розрахунку основних характеристик нелінійної динаміки та детермінованого хаосу, що дозволяють проводити ефективне дослідження властивостей складної динамічної системи як технологічного комплексу ректифікації спирту на основі часових рядів технологічних змінних, а також для ефективної інтерпретації результатів і вибору методики обробки, адекватної наявним даним, які свідчать про наявність хаотичних режимів в умовах переміжності.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Досліджувались часові ряди технологічних змінних функціонування брагоректифікаційної установки спиртового заводу: витрати бражки, спирту-ректифікату, нагріваючої пари; температури низу та верху колон, на контрольних тарілках колон, тиску низу та верху колон; міцності бражки. Встановлено наявність хаотичних атракторів, що є фракталами (рис. 1).

Виявлення хаотичної поведінки об'єкта керування в умовах переміжності, яка полягає в послідовному змінюванні режимів (детермінованих, стохастичних та хаотичних) внаслідок утворення дисипативних просторово-часових структур [4], здійснювалось за кореляційною розмірністю та показником Херста [4,5].

Кореляційна розмірність  $D_c$ , заснована на обчисленні кореляційного інтеграла, є важливою кількісною характеристикою атратора, що несе інформацію про ступінь складності поведінки динамічної системи.

Кореляційний інтеграл  $C(r)$  обчислює середню розбіжність між точками реконструйованого фазового простору, координатами якого служать значення самого часового ряду з наростаючим числом запізнень за часом. Якщо часовий ряд повністю детермінований, то

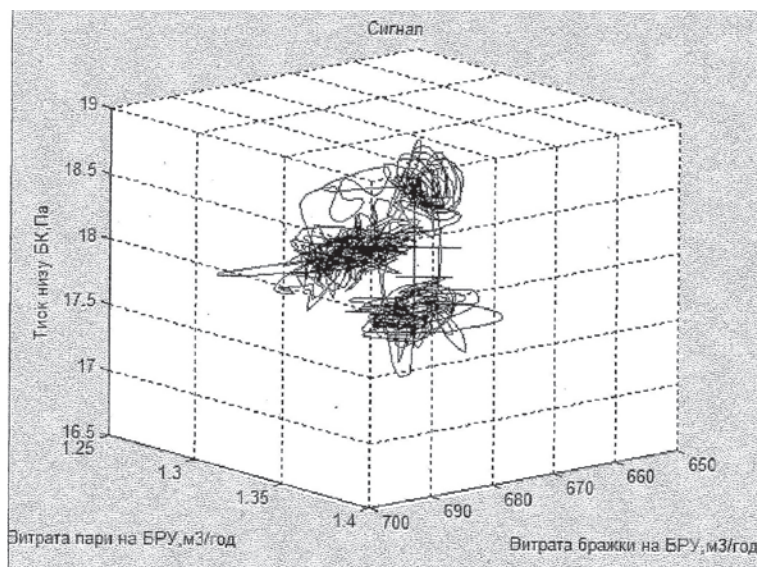


Рис. 1. Атрактивні зони в брагоректифікаційній установці (БРУ)



його поведінка визначається деякими залежностями, що містять  $k$  змінних. Тоді зі збільшенням порядку запізнення порядок зростання кореляційного інтеграла стабілізується між числом  $k$  і  $k+1$ , і його приймають за оцінку фрактальної розмірності часового ряду. Якщо ряд хаотичний, випадковий, то порядок зростання кореляційного інтеграла зростає приблизно з такою ж швидкістю, як і розмірність фазового простору.

Функція  $C(r)$  для кожного  $r$  дорівнює нормованому числу пар точок  $y_i$  та  $y_j$  розглянутої множини (об'єкта), відстань між якими не перевершує  $r$

$$C(r) = \frac{1}{n^2} \sum_{\substack{i,j=1 \\ i \neq j}}^n H(r - |y_i - y_j|),$$

де функція Хевісайда  $H(x)=0$ , якщо  $x < 0$ ;  $H(x)=1$ , якщо  $x \geq 0$ , для всіх пар значень  $i$  і  $j$ , якщо  $i \neq j$ ,  $|y_i - y_j|$  – абсолютна величина відстані між точками множини,  $i, j = 1, 2, 3, \dots, n$ , де  $n$  – кількість точок. Величина суми залежить від  $r$ , причому  $C(r) \sim r^{D_c}$ , де  $D_c$  – кореляційна розмірність. Для практичного обчислення розмірності на графіку  $\ln(C(r))=f(\ln(r))$  виділяють область лінійної залежності (область скейлінга) і функція апроксимується прямою лінією методом найменших квадратів. Тоді тангенс кута нахилу графіка є розмірністю  $D_c$  [3].

На рис. 2 показано визначення за допомогою програми Fractan кореляційної розмірності часового ряду тиску низу бражної колоні.

Показник Херста  $H$  являє собою міру персистентності – схильності процесу до трендів [5]. Значення  $H > 1/2$  означає, що спрямована в певну сторону динаміка процесу в минулому, найімовірніше, спричинить продовження руху в тому ж напрямку. Якщо  $H < 1/2$ , то прогнозується, що процес змінить спрямованість.  $H = 1/2$  означає невідзначеність – броунівський рух.

Відомо, що він пов'язаний із фрактальною розмірністю  $D$  простим співвідношенням [5]:

$$D + H = 2$$

Для обчислення показника Херста необхідно визначити  $x_{cp}$  – середньоарифметичне значення за:

$$x_{cp} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

де  $N$  – число періодів спостереження;  $x_i$  – значення спостереження в конкретний момент часу, та знайти  $Z_u$  – накопичене відхилення ряду від середнього  $x_{cp}$  за:

$$Z_u = \sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})$$

За такими значеннями можна визначити значення розмаху  $R$  часового ряду на певному проміжку та середньоквадратичне відхилення  $S$  за:

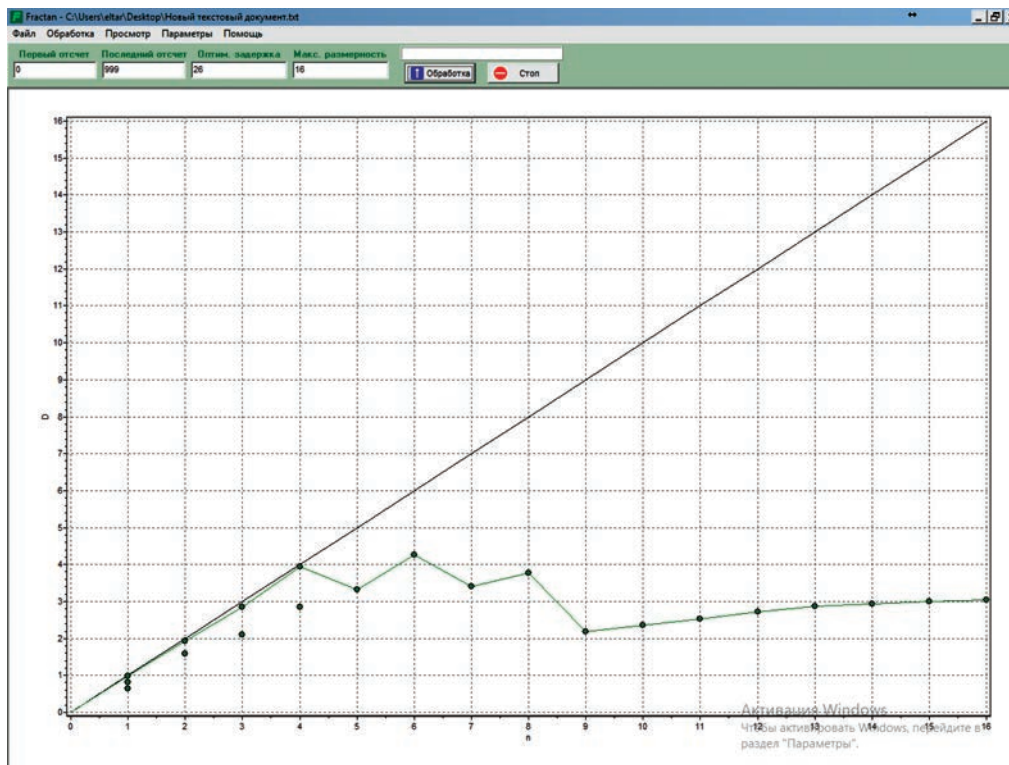


Рис. 2. Залежність кореляційної розмірності  $D_c$  від розмірності вкладення  $n$  для часового ряду величини тиску низу бражної колоні ( $D_c=3,94$ ;  $n=4$ )

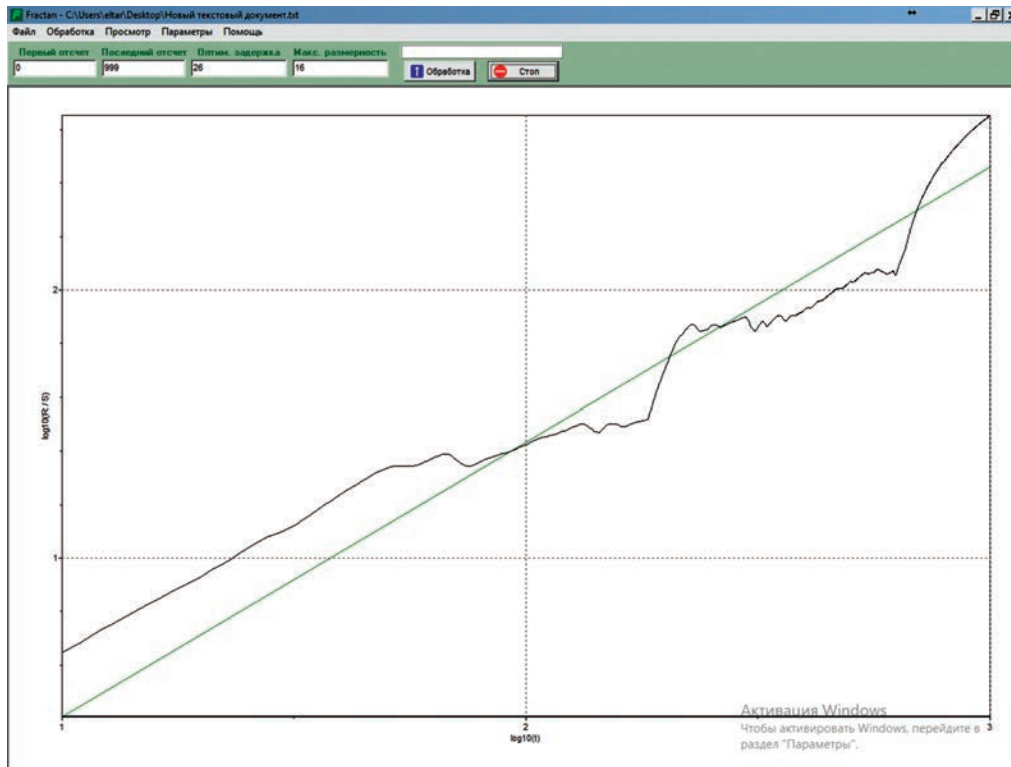


Рис. 3. R/S – аналіз числового ряду для часового ряду величини тиску низу бражної колони ( $H=0,74$ ;  $D=1,26$ )

$$R = \max(Z_u) - \min(Z_u)$$

де  $1 \leq u \leq N$ ,

$$S = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - x_{cp})^2}$$

Показник Херста обчислюється для часового ряду й визначається її фрактальною структурою.

$$R / S = (\alpha N)^H \rightarrow H = \frac{\lg(R / S)}{\lg(\alpha N)}$$

де  $\alpha$  – задана константа ( $0,5 \div \pi/2$ ).

Обчислені за допомогою програми Fractal показники Херста  $H > 0,5$  (рис.3), що свідчить про характерну персистентність розглянутих змінних, та можливу достатньо глибоку прогнозованість.

**Висновки.** В результаті дослідження встановлено, що поведінка технологічної системи приготування спирту-ректифікату характеризується ефектом інтермітансу (переміжності) з наявністю

хаотичної складової частини. детермінованого хаосу. Дослідження часових рядів значень технологічних параметрів роботи брагоректифікаційної установки за значеннями показника Херста й кореляційної s фрактальної розмірностей дозволяють зробити висновок про можливість здійснення короткострокового прогнозування поведінки динамічної системи такого технологічного об'єкта.

З огляду на природні особливості процесів приготування спирту-ректифікату, зокрема, в здатності створення дисипативних просторово-часових структур самоорганізації, доцільно для ефективного управління цими процесами використовувати синергетичні механізми, що забезпечують оптимальний перехід процесів від непередбачуваної поведінки і силових управляючих впливів примусового характеру до ресурсозберігаючих технологій управління, адаптованих до природньої поведінки об'єкта.

#### Список літератури:

1. Ладанюк А.П., Решетюк В.М., Кишенько В.Д., Смітюх Я.В. Інноваційні технології в управлінні складними біотехнологічними об'єктами агропромислового комплексу. Київ : «Центр учбової літератури», 2014. 280 с.
2. Смітюх Я. В., Кишенько В. Д. Оптимізація управління процесами брагоректифікації. *Автоматика. Автоматизація. Електротехніческие комплексы и системы*. 2006. № 2. С. 117–124.
3. Павлов А.Н., Сосновцева А.Н., Зиганшин А.Р. Мультифрактальный анализ хаотической динамики взаимодействующих систем. *Известия вузов. Прикладная нелинейная динамика*. 2003. Т. 11. № 2. С. 39–54.
4. Малинецкий Г.Г., Потапов А.Б. Современные проблемы нелинейной динамики. Москва : Эдиториал УРСС, 2000. 336 с.

5. Сергеева Л.Н. Анализ экономических часовых рядов методами теории хаоса. *Экономика: проблемы теории та практики*. Збірник наукових праць. Вип. 161. Дніпропетровськ : ДНУ, 2002. С. 212–221.
6. Яновский Л.П. Контролирование хаоса в моделях экономического роста. *Экономика и математические методы*. 2002. Т. 38. Вып. 1. С. 16–23.
7. Kantz H. A robust method to estimate the maximal Lyapunov exponent of a time series. *Physics Letters A*. 1994. Volume 185. Issue 1. P. 77–87.
8. Takens F. Detecting strange attractors in turbulence. *Dynamical systems and turbulence* / Eds. D. Rand and L. Young. Berlin : Springer-Verlag, 1981. P. 366–382.
9. Grassberger P., Procaccia I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signal. *Phys. Rev. A*. 1983. Vol. 28. № 4. P. 2591–2593.
10. Курдюмов С.П., Малинецкий Г.Г. Нелинейная динамика и проблемы прогноза. *Вестник РАН*. 2001. Т. 71. № 3. С. 210–224.
11. Сергеева Л.Н. Моделирование поведения экономических систем методами нелинейной динамики (теории хаоса). Запорожье : ЗГУ, 2002. 227 с.

**Kyshenko V.D., Kucher A.E., Kryshchenko D.O., Biletskiy M.S. METHODS OF NONLINEAR DYNAMICS AND DETERMINATED CHAOS WHEN ESTIMATING THE BEHAVIOR OF ALCOHOL RECTIFICATION PROCESSES**

*The article deals with the processes of rectification at an alcohol factory, which can be characterized as a complex dynamic system. The purpose of the work is to improve the efficiency of alcohol production by creating an automated system process monitoring distillation department, and based on online analytical processing to realize efficient resource-management strategy using intelligent mechanisms. The analysis of time series of the process variables was conducted by methods of nonlinear dynamics, which allowed to determine the randomness values that are based on the depth of an object prediction. On the basis of the analysis of time series of the main technological parameters of the functioning of the distillation unit, the features of the behavior of complex technological complexes are characterized, which is characterized by intermittence, which is an alternation of deterministic, stochastic and chaotic regimes under non-stationary conditions. The estimation of the chaoticity of alcohol rectification processes is carried out: indicators of Hurst's trend stability, correlation and fractal dimension. The algorithms for determining the types of operating modes of the distillation unit as a dynamic nonlinear control object are proposed. Distillation processes are characterized by the presence both stochastic and chaotic regimes, the dimension of attractors of which lies in the range of 3 to 8. This object have significant trend stability (persistence), that characterized by high value of Hurst exponent in the range of 0.7 to 0.96. The results obtained will ensure the effective identification of the relevant models for the purposes of forecasting and decision-making in management. The results of research pointed to the presence of intermittency in the technological processes that requires the monitoring systems creation for diagnostic regimes of operation of distillation unit. The operative identification of deterministic, stochastic or chaotic regimes by the methods of nonlinear dynamic makes it possible to implement resource-saving control strategies in the algorithms of control of distillation technological processes, which will increase the efficiency of distillation unit functioning.*

**Key words:** alcohol production, distillation plant, control object, nonlinear dynamics, deterministic chaos, time series.

**Козак Є.Б.**

GAN Inc.

## ОРГАНІЗАЦІЯ ЗАХИЩЕНОГО ІНТЕРФЕЙСУ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ НА ОСНОВІ M-АРНОГО АЛГОРИТМУ «TREE-BASED ORAM»

*У статті розглянуто принципи організації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі m-арного алгоритму “Tree-based ORAM”. Сформовано поняття “Tree-based ORAM”, зазначається, що ORAM являє собою обумовлений симулятор оперативної пам’яті – компілятор, який перетворює алгоритми таким чином, що алгоритми, які виникають в результаті, зберігають поведінку вводу-виводу вихідного алгоритму, але схема розподілу пам’яті трансформованого алгоритму не залежить від схеми доступу до пам’яті оригінального алгоритму. Наголошено, що, оскільки хмарні обчислення стають дедалі популярнішими, конфіденційність персональних даних користувачів стає основною проблемою під час аутсорсингу обчислень. Доведено, що шаблон доступу до пам’яті програми виявляє великий відсоток її поведінки або зашифрованих даних, на яких вона обчислює. Здійснено визначення безпеки (конфіденційності) для ORAM. Зазначено, що кожен запит DRAM, зроблений під час доступу до ORAM, відбувається в певний час, і, отже, інформація не витікає. Підкреслено, що апаратно ORAM складається з двох компонентів: надійний – вбудований контролер ORAM і ненадійний – зовнішня пам’ять. Сформовано дерево ORAM та описано кожний із рівнів реалізації. Наголошено, що контролер ORAM складається з карти позицій, сховища й логіки управління, водночас карта позицій (або блок позиціонування), коротше PosMap, є таблицею пошуку, яка пов’язує кожен блок даних із випадковим листом і в дереві ORAM, а управління та оптимізація блоку позиціонування є головною умовою для ефективної роботи. Підкреслено, що безпека ORAM полягає в тому, що кожен пошук у блоці позиціонування дає новий випадковий лист для доступу до дерева ORAM, це робить послідовність шляхів дерева ORAM доступною незалежною від фактичного трасування адреси програми. Доведено, що кількість записів у блоці позиціонування масштабується лінійно з кількістю блоків даних в ORAM, що приводить до значного обсягу вбудованого сховища (від сотень кілобайтів до сотень мегабайтів).*

**Ключові слова:** захист, криптографія, інтерфейс, передача даних, алгоритм, Tree-based ORAM.

**Постановка проблеми.** Невидима оперативна пам’ять (ORAM) – це обумовлений симулятор оперативної пам’яті – компілятор, який перетворює алгоритми таким чином, що алгоритми, які виникають в результаті, зберігають поведінку вводу-виводу вихідного алгоритму, але схема розподілу пам’яті трансформованого алгоритму не залежить від схеми доступу до пам’яті оригінального алгоритму. Нещодавно ORAM перетворився на безпечні процесори. Великою проблемою для апаратних схем ORAM є питання, як ефективно управляти картою позицій (блоком позиціонування), центральним компонентом сучасних алгоритмів ORAM. Запроваджений раніше, блок позиціонування призводить до того, що ORAM принципово не піддається масштабуванню з точки зору мікросхеми. З іншого боку, техніка під назвою «Рекурсивний ORAM» вирішує проблему області, але значно збільшує накладні витрати ORAM.

Оскільки хмарні обчислення стають дедалі популярнішими, конфіденційність конфіденційних даних користувачів стає основною проблемою при аутсорсингу обчислень. В ідеалі корис-

тувачі хотіли б «перекинути свої зашифровані дані через стіну» на хмарну службу, яка повинна виконувати обчислення цих даних без вивчення службою будь-якої інформації з цих даних. Проте добре відомо, що шифрування недостатньо для отримання конфіденційності. Доведено, що шаблон доступу до пам’яті програми виявляє великий відсоток її поведінки або зашифрованих даних, на яких вона обчислює [1].

ORAM – це криптографічний примітив, який повністю усуває витік інформації у трасі доступу до пам’яті програми (складається з читання / запису в пам’ять). Концептуально ORAM працює, підтримуючи всю пам’ять у зашифрованому та перемішаному вигляді. При кожному доступі пам’ять зчитується, а потім перетасовується. У рамках ORAM будь-який шаблон доступу до пам’яті обчислювально не відрізняється від будь-якого іншого шаблону доступу тієї ж довжини. Уперше ORAM був запропонований Голдрейхом [2], і була проведена значна подальша робота, яка призвела до більш ефективних та криптографічно безпечних схем ORAM.

Важливою складовою частиною використання ORAM постає надійне обладнання. У цьому обладнанні вбудований контролер ORAM, який захоплює кеш останнього рівня пропускає / виселяє та перетворює їх на заплутані запити основної пам'яті (тобто шаблон адреси рандомізований, дані, зчитувані / записані, шифруються). Оскільки продуктивність програми дуже чутлива до затримки кеш-пам'яті, логіка контролера ORAM реалізована безпосередньо в апаратному забезпеченні.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На сьогодні, питання організації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі  $m$ -арного алгоритму "Tree-based ORAM" здійснили чимало науковців.

Г.П. Семченко [3] дослідила особливості організації автоматизованих систем захисту даних при застосуванні програмних додатків та інформаційних сховищ хмарних сервісів у військовій сфері. Авторкою узагальнено модель захищеного інтерфейсу взаємодії програмного додатку й апаратної платформи мережевого ресурсу, що дозволяє приховати послідовність виконання процедур зчитування та запису даних на фізичному рівні роботи з оперативною пам'яттю серверу. Науковиця зазначає, що пріоритет у розвитку сучасних схем ORAM полягає не тільки в забезпеченні надійної передачі «чутливих даних», але й в оптимізації алгоритмів їх захисту за умови збереження великих обсягів даних у середовищі хмарного сервісу.

Спосіб організації захищеного каналу передачі даних про стан об'єкта водопостачання у реальному часі з використанням бездротових технологій розробили В.В. Сидоренко й К.О. Буравченко [4]. Авторами продемонстровано можливість роботи системи диспетчеризації з використанням лише однієї глобальної статичної IP-адреси у сервера збору даних. Запропоновано використовувати одноплатний комп'ютер з операційною системою на точці збору сигналів.

О.А. Суліма [5] здійснила аналіз методів оцінок рівня доступу до даних, завдяки чому з'явилась можливість кількісно оцінювати небезпеку і відповідно необхідний рівень безпеки, які забезпечуються певними засобами захисту системи.

Із зарубіжних авторів варто відзначити такі роботи як: M. Islam, M. Kuzu and M. Kantarcioglu [6]; Xiao Wang, Hubert Chan and Elaine Shi [7]; C. Fletcher, M. van Dijk and S. Devadas [8]; Craig Gentry, Shai Halevi, Charanjit Jutla and Mariana Raykova [9]; M. Maas, E. Love, E. Stefanov, M. Tiwari, E. Shi, K. Asanovic, J. Kubiawicz and D. Song [10]; Craig Gentry, Kenny A Goldman, Shai Halevi, Charanjit Jutla, Mariana Raykova and

Daniel Wichs [11]; E. Stefanov, M. van Dijk, E. Shi, C. Fletcher, L. Ren, X. Yu and S. Devadas [12]; E. Shi, T.-H. H. Chan, E. Stefanov and M. Li [13] та інші.

Незважаючи на масштабність наукових досліджень за темою роботи, питання організації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі  $m$ -арного алгоритму "Tree-based ORAM" є актуальним і потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Мета статті – здійснити дослідження щодо організації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі  $m$ -арного алгоритму "Tree-based ORAM".

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В умовах сьогодення, враховуючи сучасність і рівень розвитку інформаційних технологій, надійне обладнання (наприклад, захищений процесор) працює в ненадійному середовищі (наприклад, центр обробки даних) від імені віддаленого користувача. Процесор запускає приватну або загальнодоступну програму на приватних даних, поданих користувачем, і взаємодіє з надійним мікросхемним контролером ORAM під час пропусків кешу останнього рівня для доступу до даних у ненадійній зовнішній пам'яті.

Центр обробки даних розглядається як пасивний і активний супротивник. По-перше, центр обробки даних буде пасивно спостерігати, як процесор взаємодіє з DRAM, щоб дізнатись інформацію про зашифровані дані користувача. По-друге, він може додатково спробувати втрутитися у вміст DRAM, щоб вплинути на результат програми та / або дізнатись інформацію про зашифровані дані.

Визначення безпеки (конфіденційності) для ORAM:

Для послідовності запитів даних  $\vec{a}$ , нехай ORAM ( $\vec{a}$ ) буде результуючою рандомізованою послідовністю запитів даних алгоритму ORAM. Кожен елемент у послідовності запитів даних відповідає стандартному інтерфейсу оперативної пам'яті, тобто є кортежем (адреса, операція, запис даних). Для будь-якої довжини поліномів  $\vec{a}$  та  $\vec{a}'$  отримані послідовності довжини поліномів ORAM ( $\vec{a}$ ) та ORAM ( $\vec{a}'$ ) обчислювально неможливо розрізнити, якщо  $|\text{ORAM}(\vec{a})| = |\text{ORAM}(\vec{a}')|$ .

Тут  $|\text{ORAM}(\vec{a})|$  позначає довжину ORAM ( $\vec{a}$ ). Іншими словами, послідовність запитів пам'яті, видима для супротивника, витікає лише з його довжиною. Важливо те, що це визначення дозволяє процесору використовувати звичайний вбудований кеш.  $\vec{a}$  – це послідовність завантаження/зберігання інструкцій у програмі. При визначенні  $|\text{ORAM}(\vec{a})|$ , визначається, кількість пропусків кешу останнього рівня в  $\vec{a}$ , але не  $|\vec{a}|$ . Визначення охоплює суть гарантії конфіденційності ORAM: ORAM

приховує окремі елементи у послідовності запитів даних, маючи при цьому витік невеликої кількості інформації, виставляючи довжину послідовності. З інформаційно-теоретичної точки зору перший зростає лінійно з довжиною послідовності запитів, тоді як другий зростає лише логарифмічно.

ORAM поводить як справжня пам'ять із переважною ймовірністю з точки зору процесора. Пам'ять виконує запис відповідно до дій, якщо значення, яке процесор читає з певної адреси, є найновішим значенням, яке він записав на цю адресу (тобто справжнім та новим), то ORAM здійснює оновлення запису.

У присутності активних супротивників ORAM поводить як діюча пам'ять і результуюча послідовність запитів ORAM обчислювально не відрізняється до того моменту, поки фальсифікація не визначиться контролером ORAM (тобто, послідовність запитів ORAM забезпечує гарантії конфіденційності описані вище).

Коли виявлено фальсифікацію, процесор отримує виняток, після чого він може знищити програму або вжити певних заходів для запобігання витoku щодо виявлення порушення цілісності.

Кожен запит DRAM, зроблений під час доступу до ORAM, відбувається в певний час, і, отже, інформація не витікає.

Апаратно ORAM складається з двох компонентів: (надійний) вбудований контролер ORAM та (ненадійний) зовнішня пам'ять.

Ненадійне зовнішнє сховище логічно структуровано у вигляді двійкового дерева, як показано на рисунку 1, яке називається деревом ORAM.

З рисунку 1 видно  $L = 3$  рівнів і  $Z = 4$  слотів. Припустимо, блок *a* (затінений чорним кольором) відображається на шляху  $L = 1$  раз, тобто  $L=1$ . У будь-який час блок *a* може бути розташований у будь-якій із затінених структур (тобто на шляху 1 або у сховищі).

Рівні дерева ORAM коливаються від 0 (корінь) до  $L$  (листя). Кожен вузол у дереві називається сегментом і має фіксовану кількість слотів (позначається  $Z$ ), які можуть зберігати блоки, які є одиницею даних, запитуваних процесором (наприклад, рядком кешу). Слоти можуть бути порожніми в будь-який момент і заповнені фіктивними блоками. Всі блоки у дереві, включаючи фіктивні блоки, зашифровані за допомогою імовірнісної схеми шифрування, наприклад режиму лічильника AES, із рандомізованим ключем сеансу. Таким чином, будь-які два блоки (фіктивний або реальний) неможливо розрізнити після шифрування. Шлях від кореня до будь-якого листа  $L$  є шляхом  $L$ .

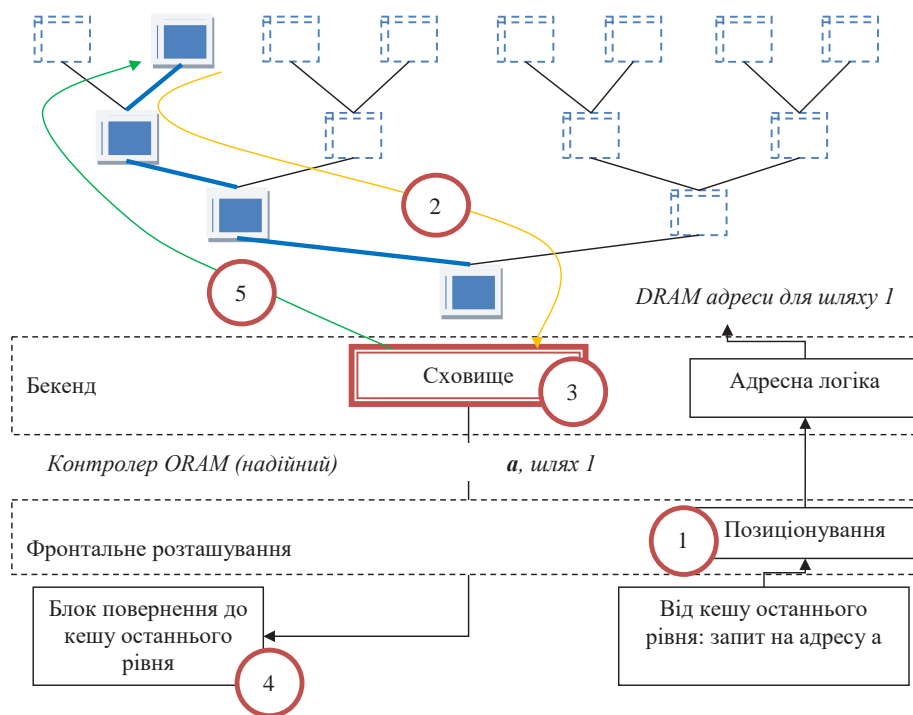


Рис. 1. Дерево (граф) ORAM

Контролер ORAM складається з карти позицій, сховища та логіки управління. Карта позицій (або блок позиціонування), коротше PosMap, є таблицею пошуку, яка пов'язує кожен блок даних із випадковим листом  $i$  в дереві ORAM. Управління та оптимізація блоку позиціонування є головною умовою, для ефективної роботи. Якщо  $n$  – максимальна кількість реальних блоків даних в ORAM, місткість блоку позиціонування становить  $n \cdot L$  біт: одне зображення на блок. Сховище – це пам'ять, яка тимчасово зберігає невелику кількість блоків.

У будь-який час кожен блок даних у ORAM зображується у випадковому листі через блок позиціонування. Шлях ORAM підтримує такий інваріант: якщо блок зіставляється з листом  $L$ , то він повинен бути або в якомусь осередку/блоку на шляху  $L$ , або в сховищі. Блоки зберігаються в сховищі або дереві ORAM разом із поточною адресою листа та блоку.

Щоб зробити запит на блок із адресою  $a$  (коротко блок  $a$ ), кеш останнього рівня викликає контролер ORAM через доступ ORAM  $(a, op, d')$ , де  $op$  або зчитується, або записується, а  $d'$  – це нові дані  $op =$  записуються (кроки також показані на рисунку 1):

Крок 1. Перегляд блоку позиціонування з  $a$ , встановлення позначки листа  $L$ . Випадкова генерація нового листа  $L'$  і оновлення блоку позиціонування для  $a$  з  $L'$ .

Крок 2. Читання та розшифровка всіх блоків вздовж шляху  $L$ . Додавання дійсних блоків до

сховища (недійсні відкидаються). Через інваріант шляху ORAM, блок  $a$  повинен знаходитись у сховищі на цьому етапі.

Крок 3. Оновлення блоку  $a$  у сховищі, щоб мати лист  $L'$ .

Крок 4. Якщо  $op =$  прочитано, повертаємо блок  $a$  у кеш останнього рівня. Якщо  $op =$  записано, заміняємо вміст блоку  $a$  даними  $d'$ .

Крок 5. Витягуємо та зашифруємо максимальну кількість блоків зі сховища до шляху  $L$  у дереві ORAM (щоб зберегти низьку завантаженість сховища), зберігаючи інваріант. Заповнюємо залишковий простір на шляху зашифрованими фіктивними блоками.

Безпека ORAM полягає в тому, що кожен пошук у блоці позиціонування (Крок 1) дає новий випадковий лист для доступу до дерева ORAM. Це робить послідовність шляхів дерева ORAM доступною незалежно від фактичного трасування адреси програми. Імовірнісне шифрування приховує, до якого блоку здійснюється доступ на шляху. Крім того, ймовірність переповнення записів незначна, якщо  $Z \geq 4$ .

Кількість записів у блоці позиціонування масштабується лінійно з кількістю блоків даних в ORAM. Це призводить до значного обсягу вбудованого сховища (від сотень кілобайт до сотень мегабайт). Для вирішення цього питання у [13] запропонована схема під назвою рекурсивний ORAM, яка була вивчена при моделюванні надійних апаратних реалізацій. Основна ідея полягає в

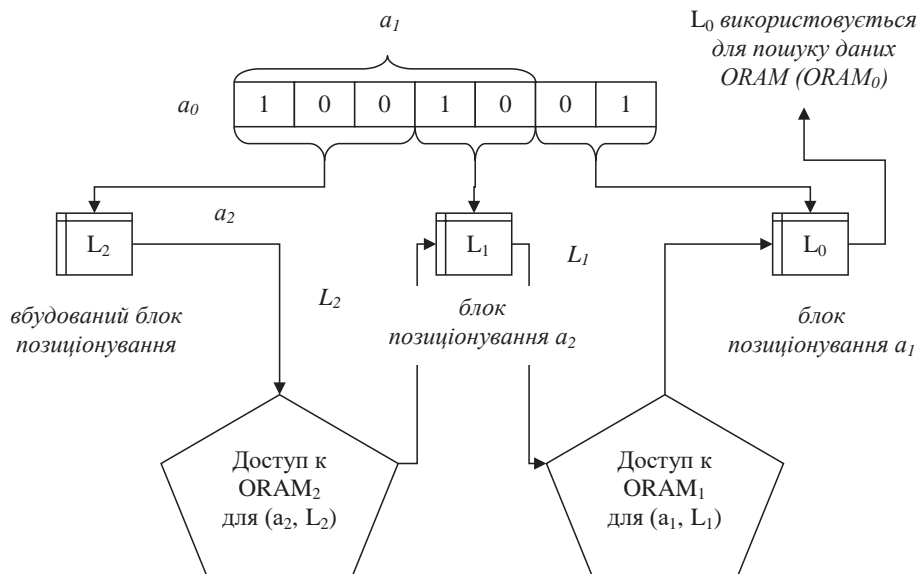


Рис. 2. Рекурсивний ORAM із розміром блоку позиціонування 4, що робить доступ до блоку даних з адресою програми  $a_0 = 1001001_2$ . Рекурсія зменшує ємність блоку позиціонування з 128 до 8 записів

тому, щоб зберігати блок позиціонування в окремому ORAM і зберігати новий (менший) блок позиціонування на мікросхемі. Механізм рекурсивного ORAM надзвичайно схожий на багаторівневі таблиці сторінок у традиційних системах віртуальної пам'яті.

На рисунку 2 наведено рекурсивний ORAM, який використовує дві рівні рекурсії. Тепер система містить 3 окремі дерева ORAM: дані ORAM, позначені як  $ORAM_0$ , і два блоки лоступу, позначені як  $ORam_1$  та  $ORam_2$ . Блоки в ORAM схожі на таблиці сторінок, які зберігають  $X$  мітки листків, що посилаються на  $X$  блоки в  $ORam_{i-1}$ . Це схоже на наявність покажчиків  $X$  на таблицю сторінок наступного рівня, де  $X$  є параметром.

Припустимо, що кеш останнього рівня запитує блок  $a_0$ , що зберігається у  $ORam_0$ . Назва листа  $L_0$  для блоку  $a_0$  зберігається в блоці позиціонування  $a_1 = a_0 / X$   $ORam_1$ . Як і таблиця сторінок, блок  $a_1$  зберігає листя для сусідніх блоків даних (тобто,  $\{a_0, a_{0+1}, \dots, a_0 + X - 1\}$  у випадку, коли  $a_0$  кратно  $X$ ). Лист  $L_1$  для блоку  $a_1$  зберігається в блоці  $a_2 = a_0 / X^2$ , що зберігається в  $ORam_2$ . Нарешті, лист  $L_2$  для блоку  $a_2$  зберігається у вбудованому блоці позиціонування. Вбудований блок позиціонування тепер подібний до таблиці кореневих сторінок.

Щоб зробити доступ до даних ORAM, спочатку потрібно переглянути вбудовані блоки позиціонування,  $ORam_2$  та  $ORam_1$ . Таким чином, рекурсивний доступ до ORAM подібний до повної таблиці. Додаткові ORM-адреси блоку позиціонування ( $ORam_3, ORam_4, \dots, ORam_{n-1}$ ) можуть бути додані за необхідності для подальшого зменшення вбудованого блоку позиціонування.  $H$  позначає загальну кількість ORAM, включаючи дані ORAM у рекурсії та  $H = \log(N/p) / \log X + 1$ , якщо  $p$  – кількість записів у блоці позиціонування. Усі логарифми будуть з основою 2 для решти листів.

Рекурсивний ORAM збільшує загальну затримку доступу до ORAM. Не інтуїтивно, малі розміри блоків ORAM можуть сприяти більш ніж половині загальної затримки ORAM. Для ємності ORAM даних 4 ГБ 39% і 56% пропускної здатності витрачається на пошук блоку позиціонування ORAM (залежно від розміру блоку), а збільшення вбудованого блоку позиціонування лише трохи зменшує ефект.

З асимптотичної точки зору це виглядає таким чином: є єдиний ORAM шлях (без рекурсії) з розміром блоку  $B$  бітів, що передає  $O(B \log N)$  бітів за доступ. У рекурсивному ORAM найкращою стратегією мінімізації пропускної здатності є встановлення константи  $X$  постійною, в результаті чого розмір блоку позиціонування ORAM становить  $B_p = \Theta(\log N)$ . Потім необхідна кількість ORAM становить  $\Theta(\log N)$ , і отримані накладні витрати на смугу пропускання дорівнюють

$$O\left(\log N + \frac{HB_p \log N}{B}\right) = O\left(\log N + \frac{\log^3 N}{B}\right)$$

Перший частина стосується даних ORAM, а друга – усіх блоків позиціонування ORAM разом узятих. Таким чином, на блок позиціонування ORAM припадає приблизно половина витрат на пропускну здатність.

**Висновки.** У роботі здійснено дослідження щодо організації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі  $m$ -арного алгоритму “Tree-based ORAM”. Запропоновано рекурсивний ORAM із розміром блоку позиціонування 4, що робить доступ до блоку даних з адресою програми  $a_0 = 1001001_2$ . Рекурсія зменшує ємність блоку позиціонування з 128 до 8 записів.

Перспективи подальших досліджень ґрунтуються на програмній реалізації захищеного інтерфейсу передачі даних на основі  $m$ -арного алгоритму “Tree-based ORAM” із застосуванням мови програмування високого рівня.

#### Список літератури:

1. Гулак Г.М., Бурячок В.Л., Складанний П.М., Кузьменко Л.В. Криптовірологія: загрози безпеки гарантоздатним інформаційним системам і заходи протидії шифрувальним вірусам. *Кибербезпека: освіта, наука, техніка*. 2020. № 2 (10). С. 6–28.
2. Казарин О.В. Теория и практика защиты программ. Москва, 2004. 450 с.
3. Семченко Г.П. Розробка моделі захищеного інтерфейсу передачі даних при роботі з хмарними сервісами. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2021. Вип. № 43. С. 139–144.
4. Сидоренко В.В., Буравченко К.О. Розробка способу організації захищеного каналу передачі даних у системі диспетчеризації водопостачання. *ТАПІ*. 2016. № 3 (30). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/rozrobka-sposobu-organizatsiyi-zahischenogo-kanalu-peredachi-danih-u-sistemi-dispetcherizatsiyi-vodopostachannya> (дата звернення: 25.06.2021).
5. Суліма О.А. Аналіз методів оцінок рівня безпеки доступу до даних. *Моделювання та інформаційні технології*. 2017. Вип. 79. С. 35–42.
6. Islam M., Kuzu M., Kantarcioglu M. Access pattern disclosure on searchable encryption: ramification, attack and mitigation. *Ndss*. 2012. Vol. 20. P. 12.



7. Wang X., Chan H., Shi E. Circuit oram: On tightness of the goldreich-ostrovsky lower bound. *Proceedings of the 22nd ACM SIGSAC Conference on Computer and Communications Security*. 2015. P. 850–861.
8. Fletcher C.W., Dijk M.V., Devadas S. A secure processor architecture for encrypted computation on untrusted programs. *Proceedings of the seventh ACM workshop on Scalable trusted computing*. 2012. P. 3–8.
9. Gentry C., Halevi S., Jutla C., Raykova M. Private database access with he-over-oram architecture. *International Conference on Applied Cryptography and Network Security*. Springer, Cham, 2015. P. 172–191.
10. Gentry C., Goldman K.A., Halevi S., Jutla C., Raykova M., Wichs D. Optimizing ORAM and using it efficiently for secure computation. *International Symposium on Privacy Enhancing Technologies Symposium*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2013. P. 1–18.
11. Stefanov E., Van Dijk M., Shi E., Fletcher C., Ren L., Yu X., Devadas S. Path ORAM: an extremely simple oblivious RAM protocol. *Proceedings of the 2013 ACM SIGSAC conference on Computer & communications security*. 2013. P. 299–310.
12. Shi E., Chan T.H.H., Stefanov E., Li M. Oblivious RAM with  $O((\log N)^3)$  worst-case cost. *International Conference on The Theory and Application of Cryptology and Information Security*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2011. P. 197–214.

### **Kozak Ye.B. ORGANIZATION OF A SECURE DATA TRANSMISSION INTERFACE BASED ON THE M-AR ALGORITHM “TREE-BASED ORAM”**

*The article considers the principles of organization of a secure data transmission interface based on the m-array algorithm “Tree-based ORAM”. The concept of “Tree-based ORAM” is formed, it is noted that ORAM is a conditional memory simulator – a compiler that converts algorithms so that the resulting algorithms retain the I/O behavior of the original algorithm, but the memory allocation scheme The transformed algorithm does not depend on the memory access scheme of the original algorithm. It is emphasized that as cloud computing becomes more popular, the confidentiality of users’ confidential data is becoming a major issue in computing outsourcing. It has been proven that a program’s memory access pattern detects a large percentage of its behavior or the encrypted data on which it computes. Security (confidentiality) definition for ORAM. It is noted that each DRAM request made during access to ORAM occurs at a certain time and, therefore, the information does not leak. It is emphasized that the hardware ORAM consists of two components: (reliable) built-in ORAM controller and (unreliable) external memory. An ORAM tree is generated and each of the implementation levels is described. It is emphasized that the ORAM controller consists of a position map, storage and control logic, with the position map (or positioning block), shorter PosMap, is a search table that associates each data block with a random sheet in the ORAM tree, and management and optimization The positioning unit is the main condition for efficient operation. It is emphasized that the security of ORAM is that each search in the positioning block gives a new random letter to access the ORAM tree, which makes the sequence of paths of the ORAM tree available independent of the actual trace of the program address. It is proved that the number of records in the positioning block scales linearly with the number of data blocks in the ORAM, which leads to a significant amount of built-in storage (from hundreds of kilobytes to hundreds of megabytes).*

**Key words:** protection, cryptography, interface, data transfer, algorithm, Tree-based ORAM.

**Коцун В.І.**

ПВНЗ «Європейський університет»

## НАВЧАЛЬНА ПРОГРАМА ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ФІЗИКИ «МЕХАНІКА. ОСНОВИ КІНЕМАТИКИ»

У статті розглядається реалізація навчальної програми для вивчення фізики «Механіка. Основи кінематики». Мета створення програми полягає в допомозі учням і студентам у вивченні фізики. Створено API-додаток для узгодження локальної програми з базою даних на віддаленому сервері. API-додаток розроблено мовою програмування JavaScript. Node.js – платформа для виконання високопродуктивних мережевих застосунків, написаних мовою JavaScript. Протоколом передачі даних обрано REST. Як файли для передачі інформації обрано файли у форматі JSON. Для створеного API-додатка була використана бібліотека Sequelize, яка здійснює зіставлення таблиць у базі даних і співвідношень між ними й класами. Фреймворк Express.js був обраний для створення API-додатку.

Протягом усієї історії людства основним рушієм його розвитку було пізнання світу й себе в цьому світі. З давніх-давен людина прагнула дослідити навколишній світ, намагаючись пояснити ті явища, які бачила. З плином часу людство почало не лише споглядати за природою, а й намагалось застосовувати її закони, знаходячи закономірності певних явищ, розкриваючи їх причину. Так з'являлись перші винаходи: різноманітні механізми, пристрої тощо. За допомогою цих засобів людина змогла полегшити свою працю, вдосконалити свою майстерність. Навчившись прогнозувати фізичні явища й керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, які розширили можливості науки, техніки й мистецтва.

Проаналізовано наявні онлайн-ресурси й додатки для вивчення різних наук і показано їх основні переваги й недоліки. Наведено основні фактори необхідності реалізації програмного засобу для вивчення фізики. Обґрунтовано доцільність використання обраних технологій для розробки навчальної програми.

У роботі реалізована можливість перегляду навчальних матеріалів, після вивчення яких користувач зможе провести експерименти й побачити їхні результати у вигляді зображень, графіків і таблиць. Також користувачі можуть зареєструватися та авторизуватися в програмі, що дозволить зберігати результати свого навчального прогресу.

Показано, що завданням створеної навчальної програми є допомога у вивченні теоретичних матеріалів і закріплення знань за допомогою інтерактивного експерименту.

**Ключові слова:** фізика, програмування, навчальна програма, клієнт-сервер, C#, Windows-додаток.

**Постановка проблеми.** Протягом усієї історії людства основним рушієм його розвитку було пізнання світу й себе в цьому світі. З давніх-давен людина прагнула дослідити навколишній світ, намагаючись пояснити ті явища, які бачила. З плином часу людство почало не лише споглядати за природою, а й намагалось застосовувати її закони, знаходячи закономірності певних явищ, розкриваючи їх причину. Навчившись прогнозувати фізичні явища й керувати ними, людина стала «велетнем»: вона створила двигуни, у мільйони разів потужніші за людські руки, комп'ютери, які розширили можливості науки, техніки й мистецтва, об'єднала всіх жителів Землі надійними системами зв'язку.

Відбулися глибокі, якісні зміни в багатьох галузях науки й техніки, пов'язані з важливими відкриттями в галузі фундаментальної фізики. Відкриття радіоактивності, електромагнітних

хвиль, ультразвуку, реактивного руху тощо сприяли тому, що людина, застосовуючи ці знання, просунула розвиток техніки далеко вперед. Наука стала безпосередньою продуктивною силою. Однак справа не лише в «практичній» цінності фізики: знання фізики необхідне кожному з нас, щоб задовольнити природну цікавість у розумінні навколишнього світу.

Саме тому розроблення програмного засобу для вивчення фізики стало б засобом покращення розуміння або вивчення фізичних явищ, як для прикладу кінематичного прямолінійного руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У світі існує величезна кількість онлайн-ресурсів та додатків для вивчення різних наук. Але мені вдалося з'ясувати, що для вивчення матеріалів з фізики існує не так і багато програмних засобів.

Одним із ресурсів, що дозволяє вивчити основи фізики, є Get a Class – це збірка онлайн-курсів із

математики й фізики. Цей онлайн-ресурс має багато переваг: він є безкоштовним, на ньому міститься багато навчальних матеріалів з фізики, доступні відео з поясненнями та експериментами [1]. Ще однією перевагою є наявність тестів на перевірку знань. GetAClass можна використовувати як інструмент для підготовки до зовнішнього незалежного оцінювання / державної підсумкової атестації.

До недоліків цих онлайн-курсів можна віднести відсутність інтерактивних вправ та ігор для вивчення фізики, доступність матеріалу лиш на російській мові, поверхові вивчення тем з фізики. Попри ці недоліки, Get a Class чудовий безкоштовний онлайн-ресурс для вивчення фізики.

Нижче наведено інші відомі сервіси, які використовуються для вивчення фізики.

Сайт the Physics Classroom існує ще з 1996 року [2]. Протягом років цей сайт розвивався та збільшувався та став великим онлайн-ресурсом, що надає студентам, викладачам та іншій аудиторії, готові матеріали з фізики, що використовують просту та зрозумілу мову навчання.

До переваг цього ресурсу можна віднести величезну кількість навчальних матеріалів, безкоштовність цих матеріалів та інтерактивні пояснення та експерименти які можна проводити.

З недоліків онлайн-ресурсу можна виокремити застарілий, не сучасний дизайн, доступність матеріалів лише англійською мовою.

Вебплатформа для навчання eduMedia мабуть поєднує у собі переваги попередньо згаданих онлайн-ресурсів [3]. На ній розміщена велика кількість тем для вивчення фізики, які доступні багатьма мовами, зокрема російською та англійською. Більшість матеріалу з фізики мають інтерактивні вправи, що дозволяє ефективніше вивчати матеріал. Платформа має сучасний зрозумілий дизайн. На мою думку, eduMedia має лише один недолік – ціну. Підписка на користування вебплатформою коштує недешево.

Brilliant.org – сайт і спільнота, що надає курси й задачі з математики, фізики, числових фінансів та інформатики [4]. Brilliant має на меті відкривати й розвивати математичні й наукові навички студентів, професіоналів та аматорів зі всього світу.

Brilliant має дуже багато переваг. Він має сучасний зрозумілий дизайн і багато тем і матеріалів для вивчення. Окрім вебсайту, Brilliant має мобільний додаток, який є дуже зручним і зрозумілим. Попри ряд переваг, на мою думку, Brilliant має лише два недоліки: це відсутність української мови й ціна. У безкоштовній версії додатку доступна невелика кількість навчального матеріалу.

Мобільний додаток 4Physics – це унікальний у своєму роді додаток, що дозволяє проводити фізичні дослідження, використовуючи датчики мобільного телефону [5].

Цей додаток інтегрує потужність чотирьох датчиків у понад 25 суворих лабораторних досліджень, які дозволяють студентам вчитися за допомогою експериментів. Інтерактивність і можливість проведення досліджень та є основною перевагою 4Physics. Він також містить основні навчальні матеріали з фізики, але їхня кількість невелика. Як і в більшості вищенаведених додатків, недоліками 4Physics є відсутність української мови й ціна.

Загалом, усі досліджені мною програмні засоби для вивчення фізики можна поділити на дві категорії: безкоштовні й платні. У кожній категорії є ряд своїх недоліків. Наприклад, серед недоліків безкоштовних засобів для вивчення фізики є незрозумілий дизайн і відсутність інтерактивних вправ. Платні ресурси для вивчення фізики мають високу ціну й в основному недоступні українською мовою.

Оскільки кожен із цих програмних засобів має свої недоліки, розробка аналогу актуальна, якщо врахувати недоліки конкурентів і виправити їх.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка навчальної програми, який допоможе учням і студентам у вивченні фізики, а саме розділу «Механіка. Основи кінематики».

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Для створення будь-якого програмного забезпечення правильно буде спочатку проаналізувати наявні методи й рішення, а також схоже програмне забезпечення. Це дозволить переглянути, які методи використовують розробники для створення програмного забезпечення. Оскільки варіантів реалізації програмного засобу є досить багато, це означає, що й проєкт може бути написано абсолютно на різних мовах програмування.

Для реалізації проєкту мною було обрано об'єктно-орієнтовану мову програмування C# [6]. Оскільки програмне забезпечення було призначено виключно на операційну систему Windows, то C# є найкращим варіантом мови програмування для реалізації проєкту [7]. Саме з використанням цієї технології було створено програмний продукт.

Додаток розроблено, використовуючи клієнт-серверну архітектуру, де в ролі сервера виступає REST API [8] написаний на Node.js мовою програмування JS із підключенням бібліотек Express і Sequelize [9], а на стороні клієнту – Windows-додаток, створений мовою програмування C#.

Оскільки серверна частина додатку працює як REST API, то було визначено, що дані мережею будуть передаватися у форматі JSON [10].

Для більш наглядного представлення компонентів, їх фізичного знаходження та варіантів комунікації між компонентами було побудовано діаграму розгортання (рис. 1).

Одним із найскладніших в відповідальних етапів в процесі проєктування було визначити й розробити структуру бази даних, оскільки від цього значною мірою залежить успіх майбутнього програмного продукту.

Тому було спроектовано таку структуру бази даних із таблиць:

- “Users” – для зберігання персональних даних користувачів;
- “User\_Progress” – для зберігання прогресу навчання користувачів;
- “Materials” – для зберігання навчальних матеріалів;
- “Themes” – буде містити навчальні матеріали згідно з обраними темами;
- “Resources” – для зберігання дрібних частинок матеріалу у формі відео, текстів, формул, експериментів.

Кожна таблиця має свою специфічну структуру даних, яка дає змогу зберегти інформацію в тому вигляді, в якому вона потрібна розробнику для виконання поставлених завдань. У базі даних використались різні зв’язки, які надали змогу структурно зв’язати дані між собою.

Оскільки це навчальна програма з фізики, яку і так не легко розуміти, то інтерфейс користувача повинен бути максимально простим і зрозумілим. Через те, що програма буде реалізована для ОС Windows, її дизайн буде схожим до Windows і не буде вирізнятися чимось особливим.

Для створення користувацького інтерфейсу використовується бібліотека MaterialSkin [11], в якій є багато стандартних компонентів інтерфейсу. Нижче на рис. 2 наведено форму й меню додатку, створені за допомогою бібліотеки MaterialSkin.

Кожна вкладка має панель меню, яка розміщується в лівому кутку форми, що дає змогу швидко переключатися між вкладками додатку. Далі розглянемо створення інтерфейсу вкладки вибору тем. Для швидкого й зручного переміщення між темами було використано великі кнопки з назвами тем (рис. 3). У результаті натискання на кнопку «Теми» можна перейти до вкладки матеріалів обраної теми.

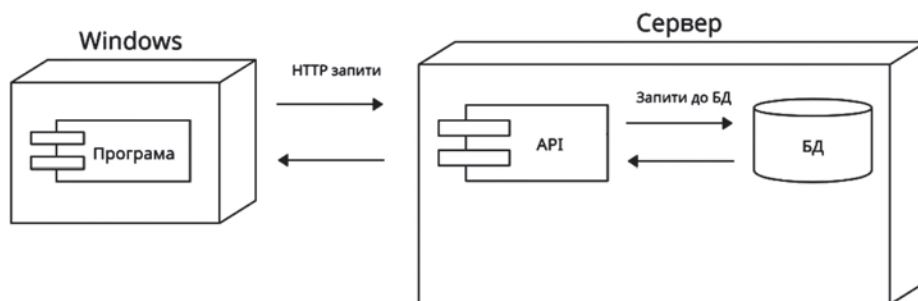


Рис. 1. Діаграма розгортання

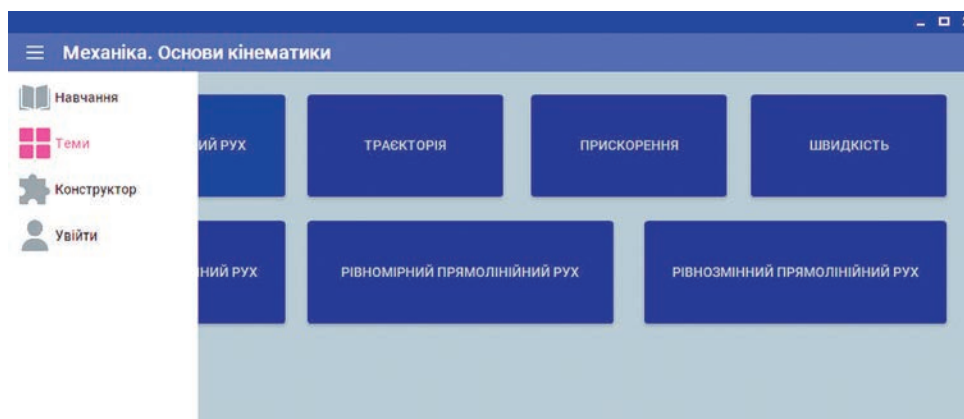


Рис. 2. Меню додатку

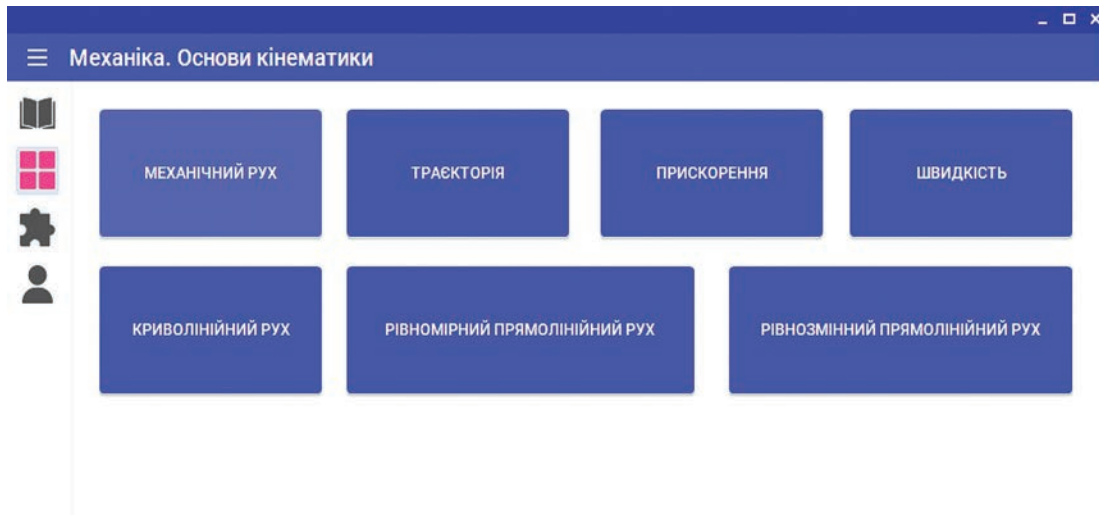


Рис. 3. Вкладка вибору тем

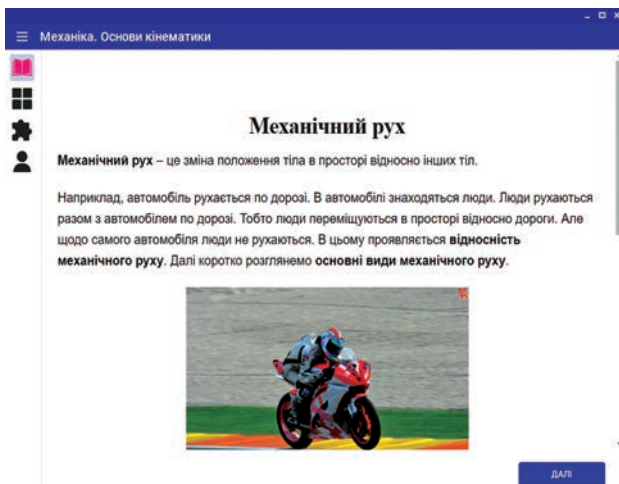


Рис. 4. Вкладка навчальних матеріалів



Рис. 5. Вкладка навчальних матеріалів із відео

Також нижче можна побачити інтерфейс вкладки навчальних матеріалів із використанням технології WebView.

Також для зображення навчальних відео в цій вкладці використовується iFrame [12] з відео. Це дає змогу швидко та якісно відбивати відео для користувачів. Для прикладу наведемо інтерфейс зображення iFrame з навчальним відео на рис. 5.

Авторизації та аутентифікація в додатку виконується за допомогою сервісів Google, тобто увійти в систему чи зареєструватися в додатку можна лише за допомогою облікового запису Google. Для цього в додатку використовується технологія Google OAuth2. Вкладка авторизації зображена на рис. 6.

Після отримання токена доступу до облікового запису Google цей токен зберігається в додатку. Для

кращого засвоєння навчальних матеріалів користувач може проводити інтерактивний експеримент, задаючи початкові характеристики об'єкту. Вигляд вкладки експериментів наведений на рис. 7.

Для прикладу, експеримент складається з об'єкта, який переміщається, координатної площини, де він переміщається, векторів (швидкості, прискорення, переміщення), графіків і таблиці, котрі описують рух об'єкта й зображують його числові характеристики. На рисунку нижче можна побачити траєкторію руху, числові характеристики об'єкта й результати експерименту.

Після розробки було проведено модульне й функціональне тестування додатку, яке допомогло виявити його недоліки й помилки. Після цього помилки було виправлено й додаток ще раз був наданий для тестування кільком реальним користувачам.

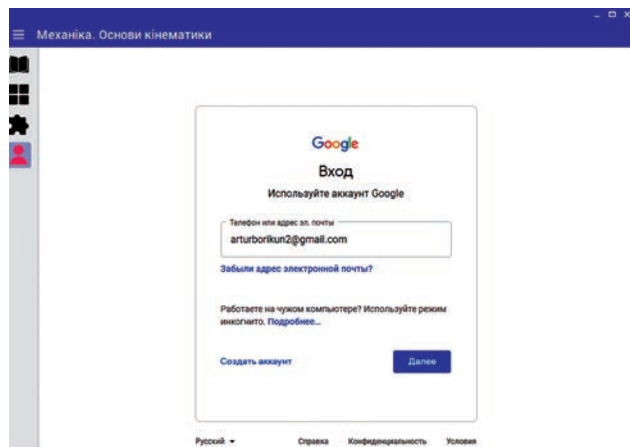


Рис. 6. Вкладка авторизації

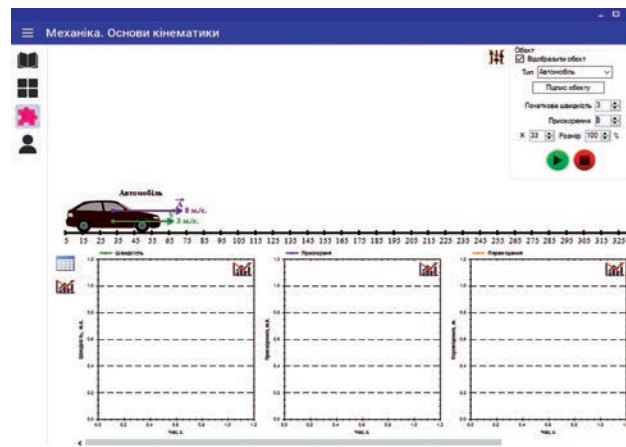


Рис. 7. Вкладка експериментів

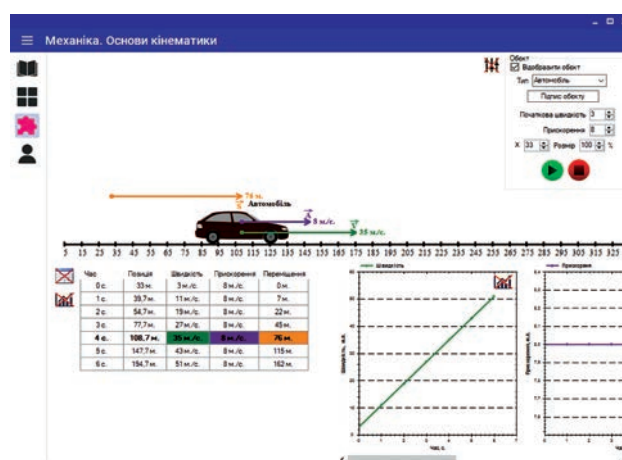


Рис. 8. Вкладка результатів експерименту

**Висновки.** У результаті проведеної роботи було створено навчальну програму, яка допомагає вивченню теоретичних основ окремих тем із фізики й засвоєнню набутих знань за допомогою інтерактивного експерименту. Програмний засіб є

багатофункціональним, містить багато корисних функцій котрі допоможуть пришвидшити обробку і проведення експериментів, а повноцінне графічне зображення фізичних процесів допоможе користувачеві краще засвоїти навчальний матеріал.

**Список літератури:**

1. GetAClass. URL: <https://www.getaclass.ru> (дата звернення: 01.06.2021).
2. The Physics Classroom. URL: <https://www.physicsclassroom.com> (дата звернення: 01.06.2021).
3. EduMedia. URL: <https://www.edumedia-sciences.com/en> (дата звернення: 01.06.2021).
4. Brilliant. URL: <https://brilliant.org> (дата звернення: 01.06.2021).
5. Lab4Physics. URL: <https://apps.apple.com/us/app/lab4physics/id104940508> (дата звернення: 01.06.2021).
6. Скит Дж. С#. Программирование для профессионалов / пер. В. Коваленко. Второе издание. Киев : Вильямс, 2011. 544 с.
7. Троелсен Э. Язык программирования C#5.0 и платформа .NET 4.5. 6-е издание. Киев : Вильямс, 2013. 1312 с.
8. Cantelon M., Harter M., Holowaychuk T., Rajlich N. Node.js in Action. Manning Publications, 2013. 416 с.
9. Бібліотека Sequelize. URL: <https://sequelize.org/master/manual> (дата звернення: 02.06.2021).
10. Анотація JSON. Вікіпедія: вільна енциклопедія. URL: <https://uk.wikipedia.org/wiki/JSON> (дата звернення: 02.06.2021).
11. MaterialSkin. URL: <https://github.com/IgnaceMaes/MaterialSkin> (дата звернення: 02.06.2021).
12. Що таке iFrame? URL: <https://www.hostinger.com.ua/rukovodstva/shto-takoje-iframe> (дата звернення: 02.06.2021).

**Kotsun V.I. CURRICULUM FOR THE STUDY OF PHYSICS “MECHANICS. FUNDAMENTALS OF KINEMATICS”**

*The article takes into account the curriculum implementation for the possibility of studying the chapter of physics named “Mechanics. Fundamentals of kinematics”. The program development goal is to help students in the learning of physics. Developed API-application is implemented for communications of the local program with basic data on a remote server. The API-application developed in the JavaScript programming language. The Node.js platform, used to run high-performance networking applications, is written in JavaScript. REST is selected as the data transfer protocol. A file in JSON format is generated as files for information transfer. To create a new API-application, the Sequelize library is used, which provides collaboration of tables in the database and the relationship between them and classes. The Express.js framework is used to create an additional API-program.*

*The world knowledge and human beings in this world was the main reason which permitted humanity to develop themselves during all historical moments. From time immemorial, humanity has sought to explore the outworld, try to explain the surrounding phenomena. Over time, humanity started to use the laws of nature and not only observed them by finding the main principles of certain phenomena and discovering their causes. This phenomena investigation caused the development of various mechanisms, devices, etc. By means of using these tools, humanity was able to facilitate their work by improving their skills.*

*By learning to predict and control physical phenomena, humanity became a “giant”, by creating engines that are millions of times more powerful than human hands, computers that expanded the opportunities of science, technology, and art.*

*In the article, for studying various sciences the existing online resources and applications are analyzed as well as their main advantages and disadvantages are shown. For the study of physics, the main reasons for the necessity of software implementation are shown. For curriculum development, the expediency of using the chosen technologies is substantiated.*

*In the developed application, the possibility of reviewing the educational materials is realized during the study process. Also users have the ability to provide the experiment and observe their results in images, graphical and tables formats. For sure, from a user perspective, the developed application can provide the ability to register, login and save the results of the user`s learning progress.*

*The goals of the developed application are learning the theoretical materials and consolidating the knowledge through an interactive experiment.*

**Key words:** *physics, programming, curriculum, client-server, C#, Windows`s application.*

**Кошель А.В.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

## МОДУЛЬНІ ЕЛЕКТРОННІ СИСТЕМИ В УМОВАХ УПРОВАДЖЕННЯ ІННОВАЦІЙНОГО МАШИННОГО НАВЧАННЯ

*У статті досліджено модульні електронні системи в умовах впровадження інноваційного машинного навчання. Розкрито принципи й необхідність застосування машинного навчання з урахуванням сучасних розробок. Сформовано перелік функцій, систем і методів реалізації, які графічно наведені у вигляді схеми, що дозволяє наочно представити взаємозв'язок застосування машинного навчання на базі модульних електронних систем. Відокремлено три основні рівні: штучний інтелект, функціональний рівень і модульні електронні системи як окремий рівень. Штучний інтелект представлено чотирма напрямками: експертна система, нечітка логіка, метаевристичні методи й машинне навчання. Як функціональний рівень між штучним інтелектом і модульними електронними системами основні функції штучного інтелекту класифікуються як оптимізація, класифікація, регресія та дослідження структури даних. Кожен елемент кожного окремого рівня описано з боку структури, сутності й функцій. Підкреслено, що більшість задач оптимізації в модульних електронних системах вирішують популяційні методи, а вибір кожного із них залежить від сфери й напрямку застосування, тобто приналежності модульної експертної системи. Окрему увагу приділено опису машинного навчання як основної складової частини інноваційної модульної електронної системи сьогодення. Описано машинне навчання трьох основних видів: навчання з вчителем, навчання без вчителя та навчання з підкріпленням. Наголошено, що машинне навчання призначене для автоматичного виявлення принципів і закономірностей із накопиченими даними або взаємодії методом спроб і помилок. Як результат дослідження відзначено, що до задач оптимізації можна застосувати як метаевристичні методи, так і машинне навчання, зокрема оптимізація на основі машинного навчання (тобто навчання з підкріпленням) фокусується на динамічній оптимізації, пов'язаній із прийняттям рішень, що дозволяє підвищити якість реалізації сучасних модульних систем.*

**Ключові слова:** модульні електронні системи, машинне навчання, інновації, штучний інтелект, розумний контролер.

**Постановка проблеми.** В умовах сьогодення штучний інтелект (далі – ШІ) швидко розширюється та є однією з найпомітніших дослідницьких областей за останні кілька десятиліть [1]. Метою ШІ є розширення систем з інтелектом, здатним до людського навчання та міркувань. Він має надзвичайні переваги і успішно застосовується в багатьох промислових областях, включаючи класифікацію зображень, розпізнавання мови, автономні машини, комп'ютерний зір тощо. Завдяки величезним можливостям модульні електронні системи отримують вигоду від розвитку ШІ. Існують різні додатки, включаючи оптимізацію конструкції радіатора модуля живлення, інтелектуальний контролер для різнокольорового світлодіода (LED), контроль точки максимальної потужності для систем перетворення енергії вітру, виявлення аномалій для інвертора, прогноз залишкового терміну корисного використання для суперконденсаторів, тощо. Завдяки впровадженню ШІ, модульні електронні системи отримують можливість до самосвідомості та

самоадаптації, а отже це може покращити автономність модульних електронних систем.

Тим часом бурхливий розвиток науки про дані, включаючи сенсорні технології, Інтернет-речей (IoT), обчислювальні технології та аналіз великих даних [2], забезпечує широкий спектр даних для модульних електронних систем протягом різних фаз свого життєвого циклу. Збільшення обсягу даних відкриває величезні можливості та закладає міцну основу для штучного інтелекту в електроніці. ШІ може використовувати дані для покращення конкурентоспроможності продукції за допомогою глобальної оптимізації дизайну, інтелектуального контролю, оцінки стану системи тощо. Як результат, дослідження електроніки можна проводити з точки зору даних, що вигідно особливо для складних систем.

Через специфічні сфери застосування модульних електронних систем та їх характеристики, наприклад, високу швидкість налаштування в керуванні, високу чутливість контролю стану для виявлення старіння тощо, впровадження ШІ



в електроніку має свої особливості, які відрізняються від інших областей техніки [3], наприклад, класифікація зображень. Тому існує нагальна потреба в огляді ШІ в модульних електронних системах для пришвидшення досліджень синергії та міждисциплінарних застосувань.

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

На основі огляду літератури в цій роботі застосування машинного навчання в електроніці поділено на три аспекти, тобто проектування, управління та технічне обслуговування.

О.І. Старобор [4] розглянув особливості використання такої підсистеми штучного інтелекту, як машинне навчання та її використання в ігрових додатках. Автором розглянуто Core ML, продемонстровано приклад його використання, який може полегшити бізнес логіку ігрового продукту. Проаналізовано плюси та мінуси фактори застосування такої системи в побудові ігрових механік.

Методи інтелектуального аналізу даних та їх застосування у сфері електронної комерції дослідили О.М. Михайлуца, А.В. Пожуєв і В.В. Тищенко [5]. Науковцями досліджено основні методи та інструменти Data Mining, які застосовуються у високопродуктивній інтелектуальній аналітичній обробці даних. Досліджено проблему автоматизованого аналізу покупок. У статті представлені результати застосування методів інтелектуального аналізу даних – Data Mining, зокрема, розробленого парсеру та системи попередньої обробки даних.

У [6] розкрито принципи підвищення функціональної ефективності інтелектуальної системи керування розподілом ресурсів інформаційно-телекомунікаційного середовища за умов апріорної невизначеності.

Із зарубіжних авторів варто відзначити таких науковців, як: J.L.B. Garcia [7], A. Soualhi, M. Makdessi, R. German, F.R. Echeverria, H. Razik, A. Sari, P. Venet and G. Clerc [8], M. Taddy [9], Y.F. Yin, J.X. Liu, J.A. Sanchez, L.G. Wu, S. Vazquez, J.I. Leon and L.G. Franquelo [10], P. Mateo, D.S. Ruiz, G.M. Perez [11], Q. Yang, Y. Liu, T. Chen, Y. Tong [12] та інші.

Проте, враховуючи описані наукові набутки за темою, питання розкриття модульних електронних систем в умовах впровадження інноваційного машинного навчання залишається відкритим з потребує детального опрацювання.

**Постановка завдання.** Дослідити модульні електронні системи в умовах впровадження інноваційного машинного навчання.

**Викладення основного матеріалу дослідження.** На рис. 1 наведено короткий опис мето-

дів, функцій та застосувань ШІ для електроніки. З наведеного рисунку видно, що ШІ широко застосовується до трьох характерних фаз життєвого циклу модульних електронних систем, включаючи проектування, управління та обслуговування.

У якості функціонального рівня між ШІ і електронними додатками, основні функції ШІ класифікуються як оптимізація, класифікація, регресія та дослідження структури даних:

**Оптимізація:** пошук оптимального рішення, що максимізує або мінімізує цільові функції із набору доступних альтернатив з урахуванням обмежень, рівності або нерівностей, яким повинно відповідати рішення. Наприклад, в проектному завданні оптимізація служить інструментом для дослідження оптимального набору параметрів, які максимізують або мінімізують цілі проектування з обмеженнями проекту.

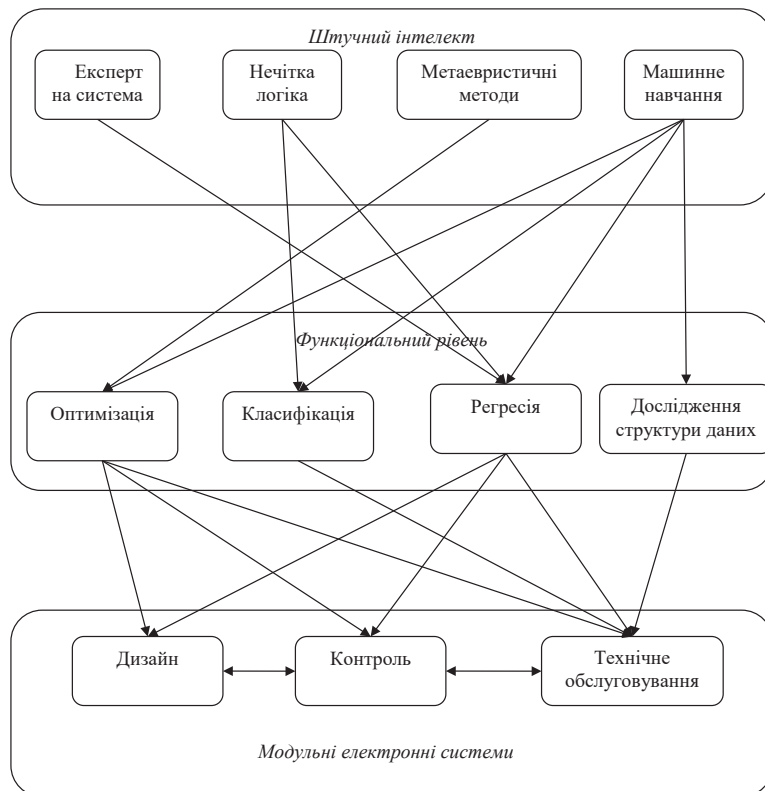
**Класифікація:** присвоєння вхідної інформації або даних міткою, що вказує на один з  $k$  дискретних класів. Зокрема, виявлення аномалій і діагностика несправностей при технічному обслуговуванні є типовим завданням класифікації для визначення міток несправностей з інформацією про моніторинг стану.

**Регресія:** ідентифікація взаємозв'язка між вхідними змінними та цільовими змінними, метою регресії є передбачення значення однієї або декількох безперервних цільових змінних з урахуванням вхідних змінних. Наприклад, інтелектуальний контролер може бути вдосконалений за допомогою моделі регресії між вхідними електричними сигналами та вихідними змінними управління.

**Дослідження структури даних:** кластеризація даних, яка виявляє групи схожих даних у наборі даних, оцінка щільності, що визначає розподіл даних у вхідному просторі, та стиснення даних, що проектує дані великих розмірів до даних низького розміру для функції скорочення. Наприклад, при технічному обслуговуванні кластеризація станів деградації входить до категорії дослідження структури даних.

Методи ШІ можна класифікувати як експертну систему, нечітку логіку, метаевристичні методи та машинне навчання. Відсотки їх застосування складають 0,9%, 21,3%, 32,0% та 45,8% відповідно. Це свідчить про те, що найбільша частина ШІ в модульних електронних системах припадає на машинне навчання.

Експертна система – це найдавніший метод ШІ, який ефективно застосовується в промислових додатках [13]. Експертна система, по суті,



**Рис. 1. Методи, функції та застосування машинного навчання на базі модульних електронних систем**

є базою даних, яка інтегрує експертні знання в булеву логічний каталог, на основі якого моделюються правила у міркуваннях мозку людини. Це інтелектуальна система, що моделює процес виведення, яка відповідає на запитання «чому та як» на основі бази даних. База даних складається або з досвіду експертів на місцях, або з даних моделювання, фактів і тверджень. Її можна постійно оновлювати.

Варто зазначити, що застосування експертної системи становить лише 0,9%. Це тому, що експертна система, як правило, базується на системних принципах та правилах, що в значній мірі пов'язано із системою інтересів та відсутністю універсальності. Це стосується чітко визначених доменів лише з чіткими експертними правилами. Крім того, завдяки швидкому розвитку обчислювальних платформ, функції експертної системи можуть бути замінені іншими вдосконаленими методами ШІ (наприклад, нечіткою логікою та машинним навчанням) із чудовими можливостями у виведенні та наближенні.

Подібно до експертної системи, нечітка логіка також є методом, заснованим на правилах. Нечітка логіка є ідеальним інструментом для усунення невизначеності системи. Замість того, щоб безпосередньо використовувати точне чітке значення,

нечіткість спочатку виконується з нечіткими наборами, що складаються з декількох функцій приналежності в діапазоні від 0 до 1. Потім нечіткі входні сигнали агрегуються з нечіткими правилами на етапі виведення. Потім розмивання виконується для результату висновку, враховуючи ступінь виконання та виводячи чітке значення. Як результат, чітке значення маніпулюється в нечіткому просторі, який завершує нелінійне зображення між входом та виходом на основі визначених принципів.

У більшості додатків метод нечіткої логіки в основному складається із чотирьох частин: нечіткість, вивід правил, база знань і дефузофікація. По-перше, розмиття виконується на вході лінгвістичних змінних із функціями приналежності, включаючи трикутну, трапецієподібну, гауссову, однотонну та інші спеціальні форми. По-друге, модуль виводу інтегрує сигнали разом відповідно до нечітких правил у базі знань, отриманій з досвіду експертів. По-третє, розмивання проводиться на сигналі для виходу. Як для попереднього, так і для наступного, ступінь виконання визначається функціями членства. Тип схеми нечіткого висновку класифікується як Мемдені тип і тип Такагі-Сугено-Канга (далі – тип ТСК). Метод Мемдені був серед перших систем управління, створених за допомогою теорії нечітких множин. Модель Такагі-Сугено-Канга – це нечітка система адаптивного типу.

Для схеми нечіткого виводу типу Мемдені функція приналежності попереднього і наступного є функціями на основі фігури, наприклад, трикутника. Для схеми нечітких виводів типу ТСК функція належності попередньої частини ідентична типу Мемдені, тоді як функція наступної є одиночною при декількох постійних значеннях. Зазвичай для схеми типу Мемдені потрібно більше нечітких наборів порівняно зі схемою типу ТСК для того самого завдання. Порівняно з нечіткими членами типу Мемдені, функція належності в схемі типу ТСК може бути функціональним типом як лінійна, так і постійна, що є більш потужним і точним у нелінійному наближенні.

Після того, як сформульовано завдання оптимізації конкретних додатків, оптимальне рішення можна отримати або методом детермінованого

програмування (наприклад, лінійне або квадратне програмування), або методом не детермінованого програмування, тобто мета евристичним методом. Детерміновані методи програмування потребують обчислення градієнтних матриць, що є складною для більшості завдань оптимізації в електроніці через складність. Метаевристичні методи слугують загальним наскрізним інструментом, який потребує менше досвіду експертів і є ефективним та масштабованим для різних завдань оптимізації.

Метаевристичні методи, як правило, розробляються для біологічної еволюції, наприклад, генетичного алгоритму шляхом природного відбору, алгоритм оптимізації колонії мурашок (далі – АСО) шляхом імітації мурах у пошуку ефективного шляху для продуктів. Розробка оптимального рішення мотивована процесом спроб і помилок. Метаевристичні методи можна класифікувати як методи, що базуються на траєкторії (метод пошуку табу, метод імітованого відпалу та ін.) та популяційні (генетичний алгоритм, оптимізація рою частинок, оптимізація колонії мурах, диференціальна еволюція, імунний алгоритм тощо). Для методів, заснованих на траєкторії, кожна стадія розвідки включає лише одне рішення-кандидат, і воно перетворюється в інше рішення відповідно до певного правила. Ефективність цього методу в основному базується на якості та ефективності правила. Як результат, швидкість збіжності методів, заснованих на траєкторії, як правило, є повільною, і остаточне рішення схильне до локального, а не глобального рішення для не опуклих задач оптимізації. Для методів, що базуються на популяції, випадковим чином генеруються декілька рішень-кандидатів. Під час кожного ітеративного дослідження ці рішення-кандидати диверсифікуються (наприклад, кросингвер у генетичному алгоритмі) або включаються та замінюються новими рішеннями-кандидатами для поліпшення якості популяції в сучасному поколінні. Як результат, придатність населення ітеративно покращується для наближення до оптимального рішення. У порівнянні з методами, заснованими на траєкторії, вони перевершують швидкість збіжності, можливостями глобального пошуку та особливо корисні для масштабних завдань оптимізації. Тим не менше, обчислювальний тягар методів, заснованих на популяції, є більш інтенсивним. Цю проблему потрібно розглянути для випадків онлайн-заявок, де ефективність та швидкість є найбільш важливими.

Завдяки величезним перевагам, більшість задач оптимізації в модульних електронних системах вирішують популяційні методи. Варто зазначити,

що вибір найкращого методу не є простим завданням, яке залежить від застосування. Генетичний алгоритм та оптимізація рою частинок є двома найпопулярнішими метаевристичними методами, що застосовуються до силової електроніки. Вони є основами й представниками еволюційних алгоритмів та алгоритмів інтелекту рою, відповідно, на основі яких розробляються різні варіанти.

На сьогодні, не існує жодних гарантій загального оптимуму для метаевристичних методів, але рішення, як правило, є задовільним та прийнятним для більшості практичних застосувань.

Машинне навчання призначене для автоматичного виявлення принципів та закономірностей із накопиченими даними або взаємодією методом спроб і помилок. Для застосувань у модульних електронних системах воно класифікується як навчання з вчителем, навчання без вчителя та навчання з підкріпленням.

1. Навчання з вчителем: завдяки навчальному набору даних, що складається з пар вхідних і вихідних даних, навчання з вчителем має на меті встановити відображення та функціональні взаємозв'язки між вхідними та вихідними даними. Ця функція особливо корисна для випадків в електроніці, коли системні моделі складно сформулювати. Як правило, завдання навчання з вчителем включають класифікацію та регресію. Для класифікації вихідні дані вхідних і вихідних пар у навчальному наборі даних стосуються кінцевої кількості дискретних категорій, які слід позначити. Наприклад, діагностика несправностей для багаторівневого інвертора є типовим завданням класифікації, де дискретна мітка несправності повинна бути ідентифікована з урахуванням вхідної інформації про несправність. Для завдання регресії вихід пари вводу-виводу складається з однієї або декількох безперервних змінних. Прикладом регресії є передбачення залишкового терміну корисного використання інвертора, де вихід, тобто залишковий термін корисного використання, є безперервною змінною. Після навчання моделі вона готова оцінити нові точки даних, які відрізняються від набору даних навчання. Можливості моделі у роботі з новими точками даних, тобто тими, що містяться в наборі даних тестування, називають узагальненням. Оскільки навчальний набір даних у більшості випадків містить лише обмежену кількість можливих пар вхідних і вихідних даних, його узагальнення на нових вхідних даних є одним із найважливіших факторів ефективності навчання з вчителем.

Як правило, навчання з вчителем можна класифікувати на методи, засновані на методі нейронної

мережі, імовірнісних графічних методах та методах на основі пам'яті (тобто метод ядра). Щодо методів нейронної мережі, знання, отримані з навчального набору даних, полегшуються та передаються як ваги з'єднання та структури мережі. Численні дослідження були присвячені вдосконаленню роботи нейромережевих методів. Ці вдосконалення стосуються двох аспектів застосування в модульних електронних системах. Перший аспект стосується забезпечення можливості невизначеності при обробці шумового сигналу нейронної мережі для підвищення надійності методу. Зазначеній властивості сприяє інтеграція нечіткої логіки у нейронну мережу як нечіткої нейронної мережі або її варіантів (наприклад, адаптивна система нечіткого виводу). Другий аспект – це вдосконалення динамічної продуктивності нейронної мережі для вирішення випадків набору даних часових рядів, наприклад, інтелектуального контролера, передбачення терміну корисного використання. Порівняно зі звичайною нейронною мережею, де ваги мережі є незалежними, перехідні характеристики полегшуються завдяки розподілу ваг між різними шарами й комітками мережі. Спільне використання ваги може бути реалізоване або в дрібному масштабі із згортковою структурою, або в повному та глибокому масштабі, використовуючи повторювану одиницю як повторюваний нейрон мережі. Як правило, можливість моделювання повторної реалізації блоку перевершує модель із згортковою структурою.

Імовірнісні графічні методи отримують знання з бази даних, використовуючи схематичне представлення пар вхід-вихід. Схематичне представлення передбачає наявність умовної залежності між змінними рішення. Основний взаємозв'язок у моделі сформульовано в байєсівських рамках і можна зробити імовірнісний висновок. Таким чином, інтерпретована модель набагато краща в порівнянні з нейромережевими методами. Окрім того, імовірнісна графічна модель перевершує рішення щодо невизначеності та неповного знання. Одним із типових імовірнісних графічних методів є байєсівська мережа.

Щодо методів нейронної мережі й графічних методів, набір навчальних даних відкидається після завершення навчання. Поки навчальний набір даних у методах ядра зберігається та використовується на етапі тестування, а засвоєні знання полегшуються як ідентифікація критичних точок даних (наприклад, опорних векторів у машині векторної підтримки) або підмножини

в навчальному наборі даних. Одним із типових методів ядра є гаусові процеси, це процеси які були застосовані до прогнозування терміну корисного використання інвертора. Звичайні методи ядра (наприклад, гаусові процеси) є обчислювально інтенсивними, оскільки на етапі тестування застосовується весь навчальний набір даних. Щоб уникнути надмірного обчислювального навантаження, пропонуються розріджені рішення такі як машина з підтримкою векторів та машина з релевантністю, де оцінка параметрів покращена на основі байєсівських методів. За допомогою розрідженого рішення на етапі тестування застосовується лише підмножина навчального набору даних, і, отже, він є ефективнішим в порівнянні зі звичайними методами ядра.

Як правило, вимога до набору навчальних даних щодо методів ядра нижча, ніж до методів нейронної мережі. Тому методи ядра більше підходять для випадків з невеликим набором даних. Хоча через навчальний набір даних необхідний на етапі тестування, потреба в пам'яті ядерних методів вища, ніж у нейронних мережевих методів. Залучення навчального набору даних також обмежує швидкість на етапі тестування. Це слід враховувати для онлайн-додатків, де час виконання є критичним, наприклад, контрольний додаток.

2. Навчання без вчителя: порівняно з навчанням з вчителем, де набором даних є пари вхідних і вихідних даних, неконтрольоване навчання не має вихідних даних для цілі навчання під час навчального процесу. Як правило, завдання неконтрольованого навчання в додатках силової електроніки можна класифікувати як кластеризацію даних і стиснення даних.

Для кластеризації даних він досліджує закономірності змазаного набору даних та розділяє набір даних на кілька різних груп або кластерів відповідно до їх подібності. Таким чином, характеристики даних всередині одного кластера схожі між собою та відрізняються від характеристик інших кластерів. Одним із типових застосувань кластеризації даних є ідентифікація дискретного стану працездатності за даними безперервної деградації під час моніторингу стану електронних перетворювачів. Метою стиснення даних є усунення надмірної інформації в наборі даних, щоб зменшити кількість функцій набору даних. Наприклад, використовуючи аналіз основних компонентів, отримують зменшене представлення набору даних із набагато меншою кількістю функцій, які все ж підтримують цілісність набору даних.

Як правило, ці неконтрольовані алгоритми навчання служать попередньою обробкою даних, перш ніж вона переходить до подальшої аналітики (наприклад, діагностика несправностей). Хоча цей крок є необов'язковим, він корисний для зменшення обчислювального навантаження та підвищення точності аналітики.

3. Навчання з підкріпленням: На відміну від навчання з вчителем і навчання без вчителя, навчання з підкріпленням не вимагає набору навчальних даних. Натомість воно спрямовано на пошук відповідної стратегії дій, яка максимізує винагороду за конкретне завдання, яке, по суті, є завданням динамічного програмування або оптимізації. Теоретично навчання з підкріпленням – це процес прийняття рішення Маркова. Навчання з підкріпленням має на меті розробити таблицю Q з точки зору політики вибору дій, яка може максимізувати загальну очікувану винагороду протягом майбутнього. Q-таблиця є інформативною матрицею політики, яка записує оптимальні дії, які слід вжити з урахуванням конкретних змінних умов.

**Висновки.** У роботі досліджено модульні електронні системи в умовах впровадження іннова-

ційного машинного навчання. До задач оптимізації можна застосувати як метаевристичні методи, так і машинне навчання. Зокрема, оптимізація на основі машинного навчання (тобто навчання з підкріпленням) фокусується на динамічній оптимізації, пов'язаній з прийняттям рішень. Метаевристичний метод, як правило, застосовується для статичної оптимізації. І нечітка логіка, і машинне навчання можуть бути використані для класифікаційних завдань. Як правило, машинне навчання є більш точним і гнучким, ніж нечітка логіка. Завдання регресії може бути реалізоване за допомогою експертної системи, нечіткої логіки та машинного навчання. Впровадження експертної системи є простим, але менш потужним у порівнянні з нечіткою логікою та машинним навчанням. Реалізація нечіткої логіки потребує досвіду експерта. Машинне навчання – найпопулярніший метод, на основі нього були розроблені різні варіанти алгоритмів реалізації модульних електронних систем. Його можна поєднати з нечіткою логікою для підвищення продуктивності. До завдання дослідження структури даних можна застосувати лише машинне навчання.

#### Список літератури:

1. Скринник О.В. Концепція штучного інтелекту для організаційного розвитку. *Вісник Сумського державного університету. Серія Економіка*. 2019. № 1. С. 123–128. DOI: 10.21272/1817-9215.2019.1-16.
2. Литвин В.В., Пасічник В.В., Яцишин Ю.В. Інтелектуальні системи : підручник. Львів : «Новий Світ-2000», 2019. 406 с.
3. Ситнік Б.Т. Основи інформаційних систем і технологій : навчальний посібник. Харків : УкрДУЗТ, 2019. 175 с.
4. Старобор І.О. Використання машинного навчання в розробці ігрових механік. 2020. URL: <https://phm.cuspu.edu.ua/ojs/index.php/SNYS/article/download/1764/pdf> (дата звернення: 17.03.2021).
5. Михайлуца О.М., Пожуєв А.В., Тищенко В.В. Методи інтелектуального аналізу даних та їх застосування у сфері електронної комерції. *Математичне моделювання*. 2020. № 1 (42). С. 154–162.
6. Звіт про науково-дослідну роботу «інтелектуальна система керування навантаженням і ресурсами розподіленого обчислювального середовища з підвищеною інформаційною безпекою». 2019. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf/141456507.pdf> (дата звернення: 17.03.2021).
7. Garcia J.L.B. Improved Self-management of DataCenter Systems Applying Machine Learning : Ph.D.Thesis. Barcelona, Catalunya (Spain) : Polytechnic University of Catalonia, 2013. 155 p.
8. Soualhi A., Makdessi M., German R., Echeverria F.R., Razik H., Sari A., Venet P., Clerc G. Heath monitoring of capacitors and supercapacitors using the neo-fuzzy neural approach, *IEEE Trans. Ind. Informat.* January 2018. Vol. 14. No. 1. P. 24–34.
9. Taddy M. Business Data Science: Combining Machine Learning and Economics to Optimize, Automate, and Accelerate Business Decisions. New York : McGraw-Hill, 2019. 90 p.
10. Yin Y.F., Liu J.X., Sanchez J.A., Wu L.G., Vazquez S., Leon J.I., Franquelo L.G. Observer-based adaptive sliding mode control of NPC converters: An RBF neural network approach, *IEEE Trans. Power Electron.* April 2019. Vol. 34. No. 4. P. 3831–3841.
11. Mateo P.A., Ruiz D.S., Perez G.M. Context-aware Model for the Analysis of User Interaction and QoE in Mobile Environments. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2014. Vol. 30. I. 12. Norwood, N.J, USA : Ablex Pub. P. 946–964.
12. Yang Q., Liu Y., Chen T., Tong Y. Federated machine learning: Concept and applications, *ACM Trans. Intell. Syst. Technol.* January 2019. Vol. 10. No. 2. P. 1–19.
13. Аверкина М.Ф., Приступа М.Б. Експертні системи в автоматизованих інформаційних системах. *Інфраструктура ринку*. 2019. Вип. 37. С. 801–806.

**Koshel A.V. MODULAR ELECTRONIC SYSTEMS IN THE CONDITIONS OF INTRODUCTION OF INNOVATIVE MACHINE LEARNING**

*The article investigates modular electronic systems in the conditions of introduction of innovative machine learning. The principles and necessity of application of machine learning taking into account modern developments are revealed. A list of functions, systems and methods of implementation is formed, which are graphically presented in the form of a diagram that allows you to clearly present the relationship between the use of machine learning based on modular electronic systems. There are three main levels: artificial intelligence, functional level and modular electronic systems as a separate level. Artificial intelligence is represented by four areas: expert system, fuzzy logic, metaheuristic methods and machine learning. As the functional level between artificial intelligence and modular electronic systems, the main functions of artificial intelligence are classified as optimization, classification, regression and data structure research. Each element of each level is described in terms of structure, essence and functions. It is emphasized that most optimization problems in modular electronic systems are solved by population methods, and the choice of each of them depends on the scope and direction of application, ie the affiliation of the modular expert system. Particular attention is paid to the description of machine learning as the main component of today's innovative modular electronic system. Machine learning of three main types is described: learning with a teacher, learning without a teacher and learning with reinforcement. It is emphasized that machine learning is designed to automatically detect the principles and patterns of accumulated data or interaction by trial and error. As a result of the research it is noted that both metaheuristic methods and machine learning can be applied to optimization problems, in particular, optimization based on machine learning (ie learning with reinforcement) focuses on dynamic optimization related to decision making, which improves the quality of implementation modern modular systems.*

**Key words:** modular electronic systems, machine learning, innovation, artificial intelligence, smart controller.

**Макарова Л.М.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Латанська Л.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Пухалевич А.В.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

**Приходько К.С.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## НЕЛІНІЙНА РЕГРЕСІЙНА МОДЕЛЬ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ ТРИВАЛОСТІ ВИКОНАННЯ РОБІТ З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДОЛОГІЇ AGILE

У роботі побудовано однофакторну нелінійну регресійну модель для оцінювання тривалості виконання робіт із розробки програмного забезпечення з використанням методології Agile шляхом застосування одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона сім'ї  $S_B$ , що дозволило підвищити достовірність оцінювання тривалості виконання робіт у порівнянні з існуючими моделями. Використання нормалізуючого перетворення Джонсона сім'ї  $S_B$  дозволило зменшити довірчий інтервал та інтервал прогнозування нелінійного рівняння регресії в порівнянні з одновимірним нормалізуючим перетворенням на основі десятичного логарифма й лінійної моделі.

Проблема достовірного оцінювання необхідних трудових витрат на розробку є однією з ключових проблем під час управління проектами розробки програмного забезпечення. У статті розглянуті питання оцінювання тривалості виконання робіт із розробки програмного забезпечення з використанням гнучкої методології розробки Agile, яка останнім часом отримує все більшу популярність у розробників і має певні особливості, унаслідок чого важко отримати в достатньому обсязі необхідну інформацію для оцінювання тривалості розробки й використовувати найпоширеніші методи для оцінювання тривалості проектів із розробки програмного забезпечення.

Гарні результати, які дає застосування нелінійних регресійних моделей з використанням методу нормалізуючих перетворень для рішення задач оцінювання тривалості й трудомісткості програмних проектів, дозволили вжити зазначений підхід для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт із розробки програмного забезпечення з використанням методології Agile.

Також було розроблено програмне забезпечення для прогнозування часу виконання робіт на основі побудованої нелінійної регресійної моделі, що дозволило скоротити час проведення відповідних розрахунків.

**Ключові слова:** регресійна модель, нелінійна регресія, нормалізуюче перетворення Джонсона, інтервал прогнозування, методологія Agile.

**Постановка проблеми.** Нині розробка програмного забезпечення (далі – ПЗ) ведеться з використанням різних мов програмування, платформ та методологій в умовах обмеження часу й ресурсів і потребує достовірного оцінювання необхідних трудових витрат на розробку, що є однією з ключових проблем при управлінні проектами розробки ПЗ.

Існуючі на сьогодні моделі оцінювання трудомісткості виконання робіт використовують різні фактори, такі, як: кількість рядків коду, кількість

функціональних точок, кількість сторінок документації, досвід розробників та інші [1; 2]. На основі оцінки трудомісткості можна отримати оцінку безпосередньо тривалості виконання робіт.

Основними методами оцінювання тривалості виконання робіт з розробки ПЗ є експертні, навчально-орієнтовані, алгоритмічні, математичні, статистичні та змішані методи [3]. Найбільш використовувані методи, такі як COCOMO, COCOMO II, PERT та ISBSG, належать до алгоритмічних або математично-статистичних [4].

Все більшу популярність у розробників ПЗ отримує методологія Agile, яка має певні особливості, в наслідок чого важко отримати інформацію для оцінювання тривалості розробки на основі деяких з перелічених факторів в достатньому обсязі [5; 6]. Також не враховується час на виправлення знайдених помилок. Тому необхідність побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт з розробки ПЗ із використанням методології Agile є актуальною. Така модель дозволить підвищити достовірність оцінювання часу розробки ПЗ.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Методологія Agile відноситься до сімейства гнучкої методології розробки ПЗ. Її основою є ітеративна розробка. Ця методологія має певні особливості [7]:

- розробка базується на коротких циклах – ітераціях, які зазвичай тривають один-два тижні та мають вигляд програмного проекту в мініатюрі;
- неможливість одразу сформулювати вичерпний та актуальний набір варіантів використання через постійні зміни вимог до ПЗ;
- необхідність швидко й чітко визначити, скільки часу й ресурсів потрібно використати для розробки в умовах коротких та інтенсивних ітерацій, щоб мати можливість якомога скоріше надати бізнесу інформацію про стан розробки ПЗ.

Унаслідок цих особливостей методології Agile, використання найбільш поширених методів для оцінювання тривалості проектів із розробки ПЗ не завжди дозволяє достовірно оцінити трудомісткість і час розробки ПЗ.

Під час побудови регресійних моделей для оцінювання тривалості виконання робіт із розробки ПЗ виникає ряд труднощів:

- випадкові величини, що входять до регресійної моделі, здебільшого не підпорядковуються гаусівському закону розподілу, тому маємо нелінійну регресію;
- залежна випадкова величина залежить від двох і більше факторів одночасно, тому маємо множинну регресію.

Для побудови нелінійних регресійних моделей існує кілька методів:

- метод простого перебору полягає в завданні різних видів рівняння регресії та вибору найкращого наближення за певним критерієм. Недоліки методу – велика кількість обчислень і неможливість отримання найкращого рішення – роблять такий метод неефективним [8].
- метод лінеаризуючих перетворень полягає у переході від нелінійної регресії до лінійної завдяки заміні вихідних змінних і коефіцієнтів. Недоліки методу – не завжди можливо підібрати таку заміну [9–11] та спрощення регресійної моделі й втрата частини інформації, що пов'язана з нелінійністю.
- метод нормалізуючих перетворень полягає у пошуку перетворень, за допомогою яких можна здій-

снити перехід від вихідних негаусівських випадкових величин до гаусівських. Для отриманих гаусівських випадкових величин будують лінійне рівняння регресії, яке далі перетворюють на нелінійне рівняння за допомогою зворотних нормалізуючих перетворень [10].

Використання методу нормалізуючих перетворень для рішення задач оцінювання тривалості та трудомісткості програмних проектів дає гарні результати [12; 13]. Це дозволяє застосувати такий метод для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт з розробки ПЗ з використанням методології Agile.

**Постановка завдання.** Метою роботи є побудова однофакторної нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт із розробки ПЗ з використанням методології Agile шляхом застосування одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона, що дозволило підвищити достовірність оцінювання тривалості виконання робіт у порівнянні з існуючими моделями.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Регресійна модель у загальному вигляді може бути представлена таким рівнянням:

$$y = \bar{y} + \varepsilon_t = f(x) + \varepsilon_t, \quad (1)$$

де  $y$  – залежна змінна (результативна ознака);  $f(x)$  – функція, що визначає вид регресійної моделі (лінійна або нелінійна);  $x$  – незалежна змінна (фактор);  $\varepsilon_t$  – випадкова помилка (збурення).

У разі гаусівського закону розподілу випадкових величин регресійна модель є лінійною і може бути представлена таким рівнянням:

$$z_y = b_1 z_x + b_0 + \varepsilon, \quad (2)$$

де  $b_1, b_0$  – коефіцієнти лінійної регресії, які знаходяться методом найменших квадратів;  $\varepsilon$  – випадкова величина, що розподілена за гаусівським законом,  $\varepsilon \sim N(0, 1)$ .

Для оцінювання точності рівняння регресії намагаються знайти його довірчий інтервал. У разі гаусівського закону розподілу випадкових величин довірчий інтервал лінійного рівняння регресії може бути представлений таким рівнянням [14]:

$$y = \hat{y} \pm t_{(\alpha/2, n-2)} \cdot S \cdot \sqrt{1 + \frac{(x - \bar{x})^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}, \quad (3)$$

де  $\hat{y}$  – розрахункове значення  $y$  за рівнянням регресії;  $t_{(\alpha/2, n-2)}$  – квантіль  $t$ -розподілу Стюдента;  $\alpha$  – рівень значущості;  $n$  – кількість випадкових величин;

$$S = \sqrt{\frac{1}{n-2} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}.$$

Аналогічно може бути представлений таким рівнянням інтервал прогнозування лінійного рівняння регресії:

$$y = \hat{y} \pm t_{(\alpha/2, n-2)} \cdot S \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n} + \frac{(x - \bar{x})^2}{n \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}}. \quad (4)$$



Як було показано в [12], розподіл емпіричних даних тривалості й трудомісткості розробки ПЗ відрізняється від гаусівського закону розподілу випадкових величин. Тому застосуємо метод нормалізуючих перетворень для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт з розробки ПЗ із використанням методології Agile.

Як нормалізуюче перетворення можна використовувати перетворення на основі логарифма (десятькового або натурального), Бокса-Кокса, Джонсона. У роботі використовується чотирьохпараметричне нормалізуюче перетворення Джонсона, яке дозволяє врахувати особливості емпіричних даних, зокрема асиметрію та ексцес.

У загальному вигляді нормалізуюче перетворення Джонсона може бути представлено таким рівнянням [15]:

$$z = \gamma + \eta h(x, \phi, \lambda); \quad \eta > 0; -\infty < \gamma < \infty; \lambda > 0; -\infty < \phi < \infty; \quad (5)$$

де  $z$  – нормована нормально розподілена випадкова величина;  $\gamma, \eta, \phi, \lambda$  – параметри перетворення Джонсона;  $x$  – випадкова величина, яка нормалізується;  $h$  – функція певної сім'ї Джонсона:

$$S_L \quad h_1(x, \phi, \lambda) = \ln(\tilde{x}), \quad x > \phi;$$

$$S_B \quad h_2(x, \phi, \lambda) = \ln\left(\frac{\tilde{x}}{1 - \tilde{x}}\right), \quad \phi < x < \phi + \lambda; \quad (6)$$

$$S_U \quad h_3(x, \phi, \lambda) = \text{Arsh}(\tilde{x}), \quad -\infty \leq x \leq +\infty;$$

$$\text{де } \tilde{x} = \frac{x - \phi}{\lambda}.$$

Перетворення, зворотне до (5), може бути представлено таким рівнянням:

$$x = \phi + \lambda h^{-1}(z, \gamma, \eta);$$

$$\eta > 0; -\infty < \gamma < \infty; \lambda > 0; -\infty < \phi < \infty; \quad (7)$$

де  $x$  – випадкова величина з розподілом Джонсона;  $\gamma, \eta, \phi, \lambda$  – параметри перетворення Джонсона;  $z$  – нормально розподілена випадкова величина;  $h^{-1}$  – функції певної сім'ї Джонсона:

$$S_L \quad h_1^{-1}(z, \gamma, \eta) = e^z,$$

$$S_B \quad h_2^{-1}(z, \gamma, \eta) = \frac{1}{1 + e^{-z}}, \quad (8)$$

$$S_U \quad h_3^{-1}(z, \gamma, \eta) = \frac{e^z - e^{-z}}{2},$$

$$\text{де } \zeta = \frac{z - \gamma}{\eta}.$$

Для вибору конкретної сім'ї розподілу Джонсона скористаємося аналітичною залежністю ексцесу від квадрату асиметрії, яка наведена в [16].

Для перевірки якості побудованого рівняння регресії використаємо коефіцієнт детермінації  $R^2$ , середню величину відносної похибки  $MMRE$  та рівень прогнозування  $Pred(0,25)$ .

Для побудови нелінійної регресійної моделі були використані такі дані про тривалість виконання робіт з розробки ПЗ з використанням мето-

дології Agile: кількість  $n=886$ , випадкова величина  $X$  – трудомісткість (людино-годин), випадкова величина  $Y$  – тривалість (годин).

Перевірка емпіричних даних на викиди проводилася за допомогою квадрата відстані Махалано-біса, методика виконання якої наведена, зокрема, в [17], після чого скоригована вибірка склала  $n=761$ .

Ймовірнісні характеристики скоригованої вибірки емпіричних даних наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Характеристики вибірки емпіричних даних**

Параметр	ВВ $X$	ВВ $Y$
$\hat{m}$	179,0394	21,3459
$\hat{D}$	207312,45	116,2418
$\hat{\sigma}$	455,3158	10,7816
$\hat{A}$	6,0339	0,9018
$\hat{\varepsilon}$	50,0488	2,8680

Сім'я розподілів Джонсона для випадкових величин  $X$  та  $Y$  була обрана у відповідності з [16] за значенням оцінок  $A^2$  та  $\varepsilon$  – сім'я розподілів  $S_B$ .

Нормалізація випадкових величин  $X$  та  $Y$  була виконана у відповідності з (5) для сім'ї  $S_B$  Джонсона (6). Знайдені параметри перетворення Джонсона наведені в таблиці 2.

Таблиця 2

**Параметри перетворення Джонсона**

Параметр	ВВ $X$	ВВ $Y$
$\gamma$	3,1023	0,9954
$\eta$	0,5724	0,7311
$\phi$	0,4538	7,9401
$\lambda$	10925,91	50,1021

У результаті нормалізації отримали нормовані нормально розподілені випадкові величини  $Z_X$  та  $Z_Y$ .

Лінійна регресійна модель для нормалізованих даних була побудована згідно з (2) та представлена таким рівнянням:

$$Z_y = 0,1213Z_x + 0,0087 + \varepsilon.$$

Нелінійна регресійна модель була побудована з використанням лінійної регресійної моделі та зворотного нормалізуючого перетворення (7) з відповідною сім'єю  $S_B$  Джонсона (8) та представлена таким рівнянням:

$$y = \frac{e^c(\lambda_y + \phi_y) + \phi_y}{1 + e^c},$$

$$\text{де } c = \frac{1}{\eta_y} \cdot \left( b_1 \left[ \gamma_x + \eta_x \ln\left(\frac{x - \phi_x}{\lambda_x + \phi_x - x}\right) \right] + b_0 - \gamma_y + \varepsilon \right).$$

Остаточно нелінійна регресійна модель має такий вигляд:

$$y = \frac{e^c \cdot 6,5544 + 0,05}{1 + e^c},$$

де  $c = 0,1352 \cdot \ln\left(\frac{x - 0,4538}{6,9582 - x}\right) - 3,6031 + \varepsilon$ .

Порівняємо побудовану нелінійну регресійну модель на основі нормалізуючого перетворення Джонсона з такими моделями: нелінійна регресійна модель на основі десяткового логарифма й лінійна модель, побудована без використання нормалізації в припущенні про нормальність емпіричних даних, за допомогою коефіцієнту детермінації  $R^2$ , середньої величини відносної похибки  $MMRE$  та рівня прогнозування  $Pred(0,25)$ , які наведені в таблиці 3.

Таблиця 3

**Оцінка якості регресійних моделей**

	Нелінійна модель на основі нормалізуючого перетворення Джонсона	Нелінійна модель на основі десяткового логарифма	Лінійна модель
$R_2$	0,7460	0,4146	0,3779
$MMRE$	0,2063	0,3473	0,5108
$Pred(0,25)$	0,7698	0,5765	0,3088

Як видно із наведених даних, модель, побудована на основі нормалізуючого перетворення Джонсона, має кращі значення параметрів оцінки якості регресійних моделей: значення рівня прогнозування  $Pred(0,25)$  перевищує 0,75, а середня величина відносної похибки  $MMRE$  менша за 0,25. Однак значення коефіцієнту детермінації  $R^2$ , хоча й більше, ніж 0,6, та менше за 0,8. Це свідчить про необхідність застосування двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для врахування взаємного впливу випадкових величин  $X$  та  $Y$ .

95% довірчий інтервал нелінійного рівняння регресії було побудовано згідно з (3) з використанням 95% довірчого інтервалу лінійного рівняння регресії та зворотного нормалізуючого перетворення (7) з відповідною сім'єю  $S_B$  Джонсона (8):

$$y_1 = \frac{e^{k_1(\lambda_y + \phi_y)} + \phi_y}{1 + e^{k_1}},$$

де:

$$k_1 = \frac{1}{\eta_y} \cdot \left( b_1 \cdot z_x + b_0 - \gamma_y \pm t_{(\alpha/2, n-2)} \cdot S_{z_y} \cdot \sqrt{\frac{1}{n} + \frac{(z_x - \bar{z}_x)^2}{\sum_{i=1}^n (z_{xi} - \bar{z}_x)^2}} \right),$$

$$z_x = \gamma_x + \eta_x \ln\left(\frac{x - \phi_x}{\lambda_x + \phi_x - x}\right).$$

На рисунку 1 представлені рівняння регресії та відповідні довірчі інтервали, побудовані: на основі нормалізуючого перетворення Джонсона (червоний колір), на основі десяткового логарифма (чорний колір), без використання нормалізації (сірий колір). Останні два представлені для порівняння з нелінійною моделлю на основі нормалізуючого перетворення Джонсона. Представлено збільшений фрагмент рисунку,  $Y \in [12; 24]$ , в якому знаходяться рівняння регресії та довірчі інтервали.

95% інтервал прогнозування нелінійного рівняння регресії було побудовано згідно з (4) з використанням 95% інтервалу прогнозування лінійного рівняння регресії та зворотного нормалізуючого перетворення (7) з відповідною сім'єю  $S_B$  Джонсона (8) аналогічно 95% довірчому інтервалу.

На рисунку 2 представлені рівняння регресії та відповідні інтервали прогнозування, побудовані: на основі нормалізуючого перетворення Джонсона (червоний колір), на основі десяткового логарифма (чорний колір), без використання нормалізації (сірий колір). Останні два також представлені для порівняння з нелінійною моделлю на основі нормалізуючого перетворення Джонсона.

З рисунку 2 видно, що:

- після перевірки емпіричних даних на викиди й коригування вихідної вибірки, дані, що залишилися, не містять викидів (тобто знаходяться в межах інтервалу прогнозування);
- усі значення нижньої границі інтервалу прогнозування для лінійної моделі від'ємні, в той час коли нижні границі інтервалу прогнозування для обох нелінійних моделей – на основі нормалізуючого перетворення Джонсона й на основі десяткового логарифма – більші ніж нуль;
- довжини інтервалів прогнозування, отримані для лінійної моделі й моделі на основі десяткового логарифма, більші відповідних довжин, отриманих для моделі на основі нормалізуючого перетворення Джонсона.

**Висновки.** В результаті роботи було побудовано однофакторну нелінійну регресійну модель для оцінювання тривалості виконання робіт з розробки ПЗ з використанням методології Agile шляхом застосування одновимірного нормалізуючого перетворення Джонсона, що дозволило підвищити достовірність оцінювання тривалості виконання робіт у порівнянні з існуючими моделями.

Також було розроблено ПЗ для прогнозування часу виконання робіт на основі побудованої нелінійної регресійної моделі, що дозволило скоротити час проведення відповідних розрахунків.

В подальшому планується застосування двовимірного нормалізуючого перетворення Джонсона для побудови нелінійної регресійної моделі для оцінювання тривалості виконання робіт із розробки ПЗ із використанням методології Agile.

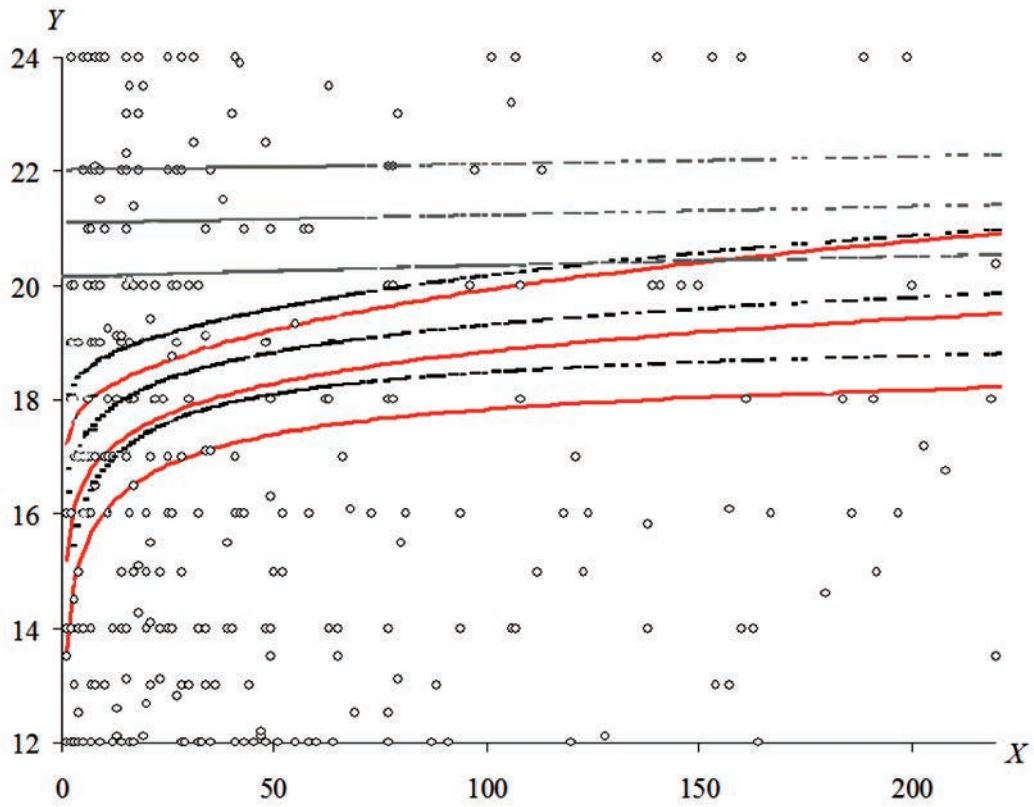


Рис. 1. Рівняння регресії та довірчі інтервали

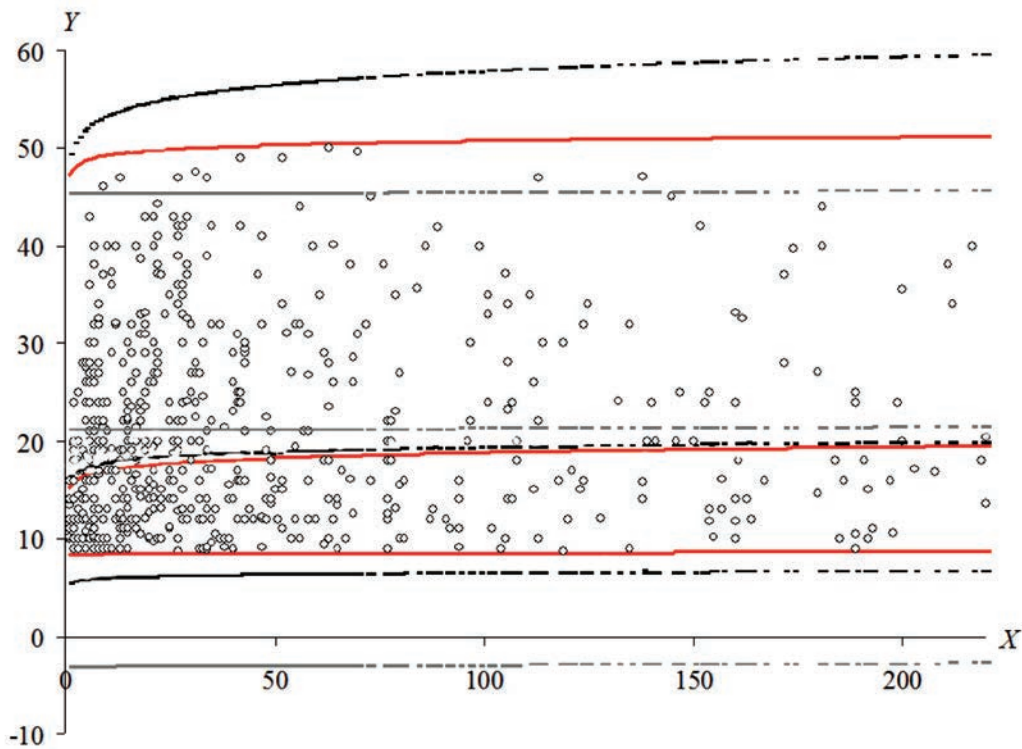


Рис. 2. Рівняння регресії та інтервали прогнозування

Список літератури:

1. Голованова М.А., Надин Е.В. Оценка трудоемкости работ на ранних стадиях создания программного обеспечения. *Системы обработки информации*. 2014. № 8 (124). С. 151–156.
2. Lazić L., Dokić I., Milinković S. Challenges in Estimating Software Testing Effort. *INFOTEH-JAHORINA : Zbornik radova XIII međunarodni naučno-stručni simpozijum, Jahorina, 19–21 mart 2014*. Sarajevo, 2014. P. 637–642.
3. Temnenco V. Software Estimation, Enterprise-Wide. URL: <http://www.ibm.com/developerworks/rational/library/jun07/temnenco/index.html> (дата звернення: 22.09.2020).
4. Bates D.M., Watts D.G. *Nonlinear Regression Analysis and Its Applications*. Wiley, 1988. 384 p.
5. Полезные метрики в Agile: Метрики производительности. URL: <http://it-study.by/philippov-agile-metrics> (дата звернення: 25.09.2020).
6. Agile Testing Process. URL: <http://www.slideshare.net/ExigenServices/agile-testing-process-26580032> (дата звернення: 25.09.2020).
7. Agile-манифест разработки программного обеспечения. URL: <http://agilemanifesto.org/iso/ru/manifesto.html> (дата звернення: 25.09.2020).
8. Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ : В 2-х кн. Москва : Финансы и статистика, 1987. Кн. 2. 351 с.
9. Айвазян С.А., Мхитарян В.С. Прикладная статистика. Основы эконометрики : Учебник для вузов : В 2 т. Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. Т. 1 : Теория вероятностей и прикладная статистика. 656 с.
10. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
11. Chatterjee S., Simonoff J.S. *Handbook of Regression Analysis*. Wiley, 2012. 240 p.
12. Приходько С.Б., Пухалевич А.В. Інтервальне оцінювання статистичних моментів часу затримок виконання програмних проєктів на основі перетворення Джонсона. *Збірник наукових праць НУК*. 2010. № 2 (431). С. 118–124.
13. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L. Estimating the Software Size of Open-Source PHP-Based Systems Using Non-Linear Regression Analysis. *Advanced Computer Information Technologies (ACIT-2018) : Proceedings of International Conference, Ceske Budejovice, June 1–3, 2018*. CEUR Workshop Proceedings, 2019. Vol. 2300. P. 199–202.
14. Xin Yan, Xiao Gang Su. *Linear regression analysis: theory and computing*. Singapore : World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd., 2009. 328p.
15. Кендалл М., Стюарт А. Теория распределений / под ред. А.Н. Колмогорова. Москва : Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1966. 588с.
16. Приходько С.Б., Макарова Л.Н., Приходько А.С. Аналитическая зависимость для выбора семейства распределений Джонсона. *Проблеми інформаційних технологій*. 2016. № 02 (020). С. 105–110.
17. Prykhodko S., Prykhodko N., Makarova L., Pukhalevych A. Outlier Detection in Non-Linear Regression Analysis Based on the Normalizing Transformations. *Proceedings of the 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), Lviv–Slavske, February 25–29, 2020*. Lviv, 2020. P. 407–410. DOI: <https://doi.org/10.1109/TCSET49122.2020.235464>

**Makarova L.M., Latanska L.O., Pukhalevych A.V., Prykhodko K.S. NON-LINEAR REGRESSION MODEL FOR DURATION ESTIMATING EXECUTION OF WORKS FOR SOFTWARE DEVELOPMENT USING AGILE METHODOLOGY**

*A univariate nonlinear regression model for estimating the duration of software development using Agile methodology based on the Johnson's univariate normalizing transform of the SB family was built in the paper. It allowed increased the reliability of estimating the duration of work compared to existing models. The use of the Johnson's normalizing transform of the SB family allowed to reduce the confidence interval and the prediction interval of the nonlinear regression equation in comparison with the univariate normalization transformation based on the decimal logarithm and the linear model.*

*The problem of reliably estimating the required labor costs for development is one of the key problems in managing software development projects. The article discussed the issues of estimating the duration of software development using a flexible development methodology Agile, which has recently become increasingly popular with developers and has certain features, making it difficult to obtain sufficient information to estimate the duration of development and use the most common methods for estimating the duration of software development projects.*

*The good results of nonlinear regression models using the method of normalizing transformations to solve problems of estimating the duration and effort of software projects, allowed to apply this approach to build a nonlinear regression model to estimate the duration of software development using Agile methodology.*

*Software to predict the time of execution of works on the basis of the built nonlinear regression model, which allowed to reduce the time of the corresponding calculations was also developed.*

**Key words:** regression model, non-linear regression, Johnson's normalizing transformation, prediction interval, Agile methodology.

УДК 378: 004

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/17>

**Нікітенко Є.В.**

Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Омецинська Н.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Медведєв М.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Гуйда О.Г.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Юсипів Т.В.**

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

## ІНФОРМАЦІЙНА СИСТЕМА SMART-УНІВЕРСИТЕТУ

*Стаття присвячена проведенню Discovery-фази бізнес-аналізу в розрізі інформаційної системи smart-університету. Метою дослідження є формування єдиного образу щодо ідеальної інформаційної системи для інформатизації вишів України. Для проведення дослідження передбачені кроки: визначення важливості бізнес-аналізу та його стандартів у разі розробки програмного забезпечення (ПЗ); визначення smart-університету та його мети в робочих процесах університетів; бенчмаркінг наявних рішень для інформатизації вишів; формування образу ідеальної інформаційної системи за допомогою методів бізнес-аналізу; створення артефактів: Lean Model Canvas, Stakeholder Register, Organizational Structure of University, Clients Portraits, Use Case Diagrams, Competitors Benchmarking, Product MindMap, Product Backlog, Non-functional requirements.*

*Навчання в smart-університеті повинне бути максимально включеним у життя слухача, носити неформальний характер, а також ґрунтуватися на технологіях, які нині звичні для всіх. Щоб встигати за змінами, що відбуваються, і зростаючими запитами студентів, smart-університетам необхідно відповідати таким вимогам, як: гнучкість, пристосованість, якісні показники, інновації.*

*Умовами впровадження Smart-освіти є використання smart-інформаційної системи, що передбачає: адаптивні освітні програми; більше інформації про студентів та її аналіз; технології спільного навчання; доступ до процесу навчання територіальний і апаратно незалежний; передачу великої кількості рутинних функцій від людини машинам штучному інтелекту; індивідуалізацію навчання на новому рівні; залучення практиків у навчальний процес.*

*Проведення такої роботи буде в нагоді для розвитку системи вищої освіти в Україні для досягнення сучасних методів побудови навчального процесу.*

**Ключові слова:** smart-університет, бізнес-аналіз, UML-діаграми, освіта, життєвий цикл розробки програмного забезпечення.

**Постановка проблеми.** Для розвитку сучасної освіти вже не досить впливу людського капіталу. Необхідно змінити освітнє середовище, а не просто нарощувати обсяги утворення трудових ресурсів. Має якісно змінитися сам зміст освіти, його методи, інструменти та середовища, необхідний перехід до smart-освіти у вишах України.

Smart-освіта у вишах передбачає:

- гнучкість навчання в інтерактивному освітньому середовищі;
- персоналізацію та адаптацію навчання;
- вільний доступ до контенту по всьому світі.

Умовами впровадження smart-освіти є використання smart-інформаційної системи, що передбачає:

- адаптивні освітні програми;
- більше інформації про студентів та її аналіз;
- технології спільного навчання – створення знань;
- територіальний і апаратно незалежний доступ до процесу навчання;
- передачу великої кількості рутинних функцій від людини машинам штучному інтелекту;
- індивідуалізацію навчання на новому рівні;
- залучення практиків у навчальний процес.

Таким чином, наявність якісної вищої освіти – необхідна умова адаптації молоді особистості до вирішення широкого класу життєво важливих завдань і адаптації в професійне середовище.

Smart-освіта і використання інформаційних систем дозволяє розширити можливості розвитку особистості у ситуаціях мінливого світу. Саме творчий потенціал майбутнього фахівця настільки необхідний у сучасних умовах. Smart-освіта реалізується з використанням технологічних інновацій та Інтернету, який дає студентам можливість придбання професійних компетенцій на основі системного багатомірного бачення і вивчення дисциплін з урахуванням їх багатоаспектності і безперервного поновлення змісту. Навчання в smart-університеті повинно бути максимально включеним в життя слухача, носити неформальний характер, а також ґрунтуватися на технологіях, які нині звичні для всіх. Щоб встигати за змінами, що відбуваються, і зростаючими запитами студентів, smart-університетам необхідно відповідати таким вимогам, як: гнучкість, пристосованість, якісні показники, інновації [1].

Велике значення набувають smart-технології в освіті. З одного боку, вони дозволяють оптимізувати витрати університету на матеріально-технічне забезпечення, з іншого боку, вивести на новий рівень якість освітніх послуг і продуктів.

Smart-технології використовуються у разі реалізації освітніх програм, які полягають не тільки в інструментальних технологіях ведення навчального процесу (смарт-дошка і т.і.), але в інноваційних навчальних планах і дисциплінах. Саме smart-технології дозволяють розробляти революційні навчально-методичні матеріали, а також формувати індивідуальні траєкторії навчання для студентів [2].

**Постановка завдання.** Концепція smart-освіти включає:

1. Створення інтелектуального середовища безперервного розвитку компетентностей учасників освітнього процесу, включаючи заходи формального і неформального процесу навчання, результатом яких є зміни поведінки шляхом застосування набутих нових компетенцій. Технічною базою реалізації такого утворення є весь наявний парк пристроїв, які належать як студентам, так і навчальним закладам: звичайні стаціонарні комп'ютери, ноутбуки, планшети, смартфони і т.і.

2. Мета smart-освіти – давати навички, необхідні для успішної діяльності в умовах цифрового суспільства і розумної економіки.

Передумовами формування smart-університету є:

1. Визнання неформальної та формальної освіти.

2. Використання нейро-агентів для збору і обробки інформації.

3. Компетентнісна орієнтованість освіти – оновлення її змісту на основі визначених роботодавцями та іншими зацікавленими сторонами моделей і профілів компетенцій.

4. Необхідні систематизовані зміни технічної архітектури та впровадження smart-пристроїв у навчальний процес. Це дає можливість безперервного управління компетенціями навчального процесу.

5. Впровадження інструментів самодіагностики освітнього середовища для забезпечення стабільного функціонування всіх елементів освітнього середовища як апаратної частини, так і контенту.

6. Для реалізації принципу безперервності необхідне впровадження кросплатформного підходу і використання програмного забезпечення для організації навчального процесу, адаптивного до всіх наявних операційних систем, у тому числі на основі використання хмарних технологій, проектування контенту на основі єдиних стандартів опису даних, наприклад, на основі специфікацій SCORM.

7. Висока швидкість оновлення освітнього контенту за рахунок використання мікромодулів, можливості оновлення контенту з різних пристроїв.

8. Використання інструментів розробки освітнього контенту з різних пристроїв.

9. У системі оцінки необхідно змістити фокус на результативність навчання, скоротивши його тривалість.

10. Необхідні точні метрики для визначення компетентності до і після навчання.

11. Всі результати метричних вимірювань розміщуються в електронному портфоліо, які є даними для аналізу стилю навчання студента.

Ідеальним варіантом ПЗ для задоволення концепції smart-університету є єдина інформаційна система, що об'єднує всі концепції та слідує передумовам.

**Виклад основного матеріалу.** Під бізнес-аналізом розуміють практику забезпечення можливостей змін у контексті роботи підприємства шляхом визначення потреб та рекомендацій рішення, яке приносить цінність зацікавленим сторонам.

Є шість ключових цінностей, що визначають природу бізнес-аналізу:

1. Зміна – акт трансформації у відповідь на потребу. Зміна спрямована на контрольоване поліпшення ефективності підприємства.

2. Потреба – це проблема або відсутність підприємства. Потреби спричиняють необ-

хідність змін, мотивуючи зацікавлені сторони діяти. При цьому зміни можуть також викликати потреби, розвиваючи або посилюючи цінність, надану наявними рішеннями.

3. Рішення – це конкретний спосіб задоволення однієї або декількох потреб у рамках контексту. Рішення задовольняє потребу шляхом вирішення проблеми, з якою стикаються зацікавлені сторони. Здебільшого рішення включає у себе програмне забезпечення як центральний елемент.

4. Зацікавлені сторони – особа або група осіб, що мають відношення до зміни, потреби або рішення, і часто можуть бути згруповані за цією ознакою. Зацікавлені сторони визначаються з точки зору зацікавленості, впливовості і впливу на зміни.

5. Цінність – це значущість, важливість або корисність чого-небудь для зацікавлених сторін у рамках контексту. Цінність може розглядатися як потенційний або реалізований прибуток і потенційні поліпшення. Здебільшого цінність може бути визначена в абсолютному вираженні, однак найчастіше вона оцінюється у співвідношенні: одне рішення або варіант більш цінний, ніж інший з точки зору такого набору зацікавлених сторін.

Контекст – це обставини, які впливають на процес або перебувають під впливом будь-яких чинників і забезпечують розуміння змін. Зміни відбуваються в рамках контексту. Також контекст – це прояви залежності змін і навколишнього середовища. Контекст може включати у себе відносини, поведінку, переконання, конкурентів, культуру, демографічний стан, цілі, уряд, інфраструктуру, мови, втрати, процеси, продукти, проекти, продажі, термінологію, технології, навіть пори року і погоду і будь-який інший елемент, що відповідає визначенню [3].

Стандарт діяльності бізнес-аналітика регламентує BABOK – акронім Business Analysis Body of Knowledge, керівництво до зводу знань від Міжнародного інституту ІВА (International Institute of Business Analysis).

Життєвий цикл розробки програмного забезпечення (SDLC) – це процес, якому слідує програмний проект у рамках організації програмного забезпечення (рис. 1). Він складається з детального плану, що описує, як розробляти, підтримувати, замінювати і змінювати або поліпшувати конкретне програмне забезпечення. Він визначає методологію підвищення якості програмного забезпечення і загального процесу розробки.

Роль бізнес-аналітика у життєвому циклі розробки програмного забезпечення складається з формування бізнес-вимог та їх перетворення на вимоги до рішення.

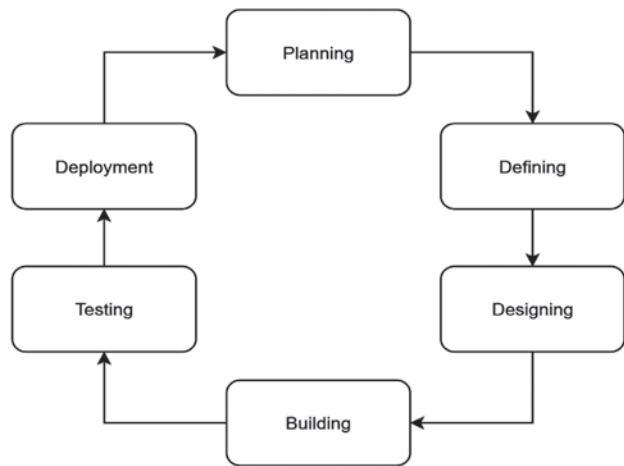


Рис. 1. Життєвий цикл розробки програмного забезпечення

Бізнес-аналітик очолює етап аналізу та проектування, диктує розробку коду, контролює процес тестування та задовольняє потреби замовника готовим продуктом (рис. 2).

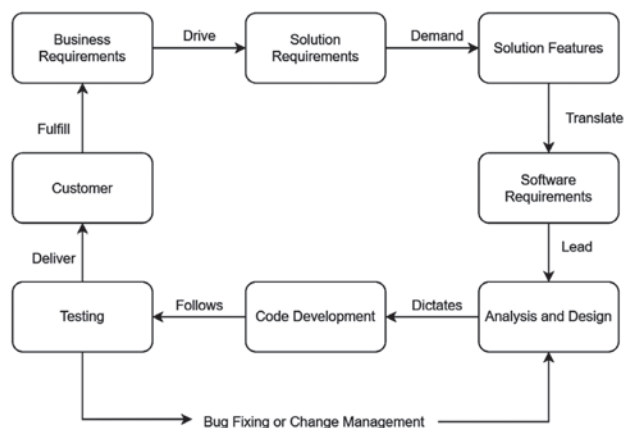


Рис. 2. Цикл розробки ПЗ та роль бізнес-аналітика у ньому

Як видно з наведеної вище діаграми, бізнес-аналітик бере участь у формуванні бізнес-вимог і перетворенні їх на вимоги до рішень.

Зазвичай перед початком розробки проекту бізнес-аналітик проводить Discovery-фазу – інтенсивну фазу дослідження на початку проекту для визначення його рамок та масштабу [4; 5].

У рамках статті буде проведено Discovery-фазу проекту smart-університету, що передбачає завдання:

1. Аналіз компанії або клієнта – основні цілі, цільова аудиторія, наявні матеріали для досліджень та маркетингу та причини змін (якщо проект розроблений не з нуля).

2. Аудиторія – демографічна інформація про цільову аудиторію, аватари клієнтів та сценарії користувачів.

## Декомповані завдання на конкретні кроки роботи бізнес-аналітика

№	Завдання	Конкретні кроки для виконання	Артефакти
1	Аналіз компанії або клієнта	1. Визначення цілей проєкту. 2. Визначення цільової аудиторії. 3. Класифікація цільової аудиторії проєкту. 4. Причини внесення змін.	– Lean Model Canvas проєкту – Stakeholder Register проєкту – Organizational Structure of University
2	Аудиторія	1. Визначення цільової аудиторії. 2. Створення аватарів клієнтів. 3. Створення діаграм варіантів використання.	– Clients Portraits – Use Case Diagram
3	Поточне рішення	1. Пошук готових інформаційних систем для університетів. 2. Їх порівняльна характеристика. 3. Аналіз готових рішень для формування вимог до унікальної системи.	– Competitors Benchmarking Document – Product MindMap
4	Технічні вимоги до унікального рішення	1. Формування переліку функцій продукту. 2. Формування нефункціональних вимог до продукту. 3. Створення технічних вимог до продукту.	– Product Backlog – Non-functional requirements

3. Поточне рішення – результати тестування на зручність використання, відгуки клієнтів, аудит вмісту, стек технологій та аналіз набору функцій.

4. Технічні вимоги до унікального рішення – специфікація системних вимог із переліком функцій, рішень, оновлений стек технологій.

Для проведення Discovery-фази проєкту виконана декомпозиція завдань на конкретні кроки та визначені їх результати – артефакти у вигляді проєктної документації, що представлена у таблиці 1.

Результати роботи Discovery-фази використовуються далі для фази Planning за згоди замовника продовжувати проєкт (займатись розробкою) [6].

#### *Stakeholder Register проєкту*

Аналіз компанії або клієнта на Discovery-фазі проєкту включає визначення зацікавлених сторін. Список повинен включати власників продуктів, адміністраторів, кінцевих користувачів, розробників, інвесторів та будь-які інші категорії, які беруть участь у створенні і використанні готового продукту [7].

Для цього використовується Stakeholder Register проєкту у вигляді матриці 2x2. Виділяються 2 параметри:

1. Інтерес – бажання впливати на організацію.
2. Вплив – здатність впливати на організацію.

На їх основі будуємо матрицю пріоритетів: по нижній шкалі відображаємо ступінь інтересу стейкхолдерів, по верхній – ступінь впливу. У самій матриці 4 блоки: нижній лівий – найменш важливі стейкхолдери (мінімальні зусилля, моніторинг час від часу), верхній правий – найбільш важливі (повинні бути завжди задоволені і залучені в проєкт). Два проміжні блоки: нижній

правий – таких стейкхолдерів треба розглянути (з'ясувати, що хвилює; інформувати), верхній лівий – треба задовольнити потреби таких стейкхолдерів (найскладніші стейкхолдери, як правило, – сильні гравці, які налаштовані нейтрально або негативно, друга по пріоритетності зона уваги) (рис. 3).

Діаграма прецедентів в UML – діаграма, на якій зображено відношення між акторами і прецедентами у системі. Також перекладається, як діаграма варіантів використання [8].

Учасник – це набір логічно пов'язаних ролей, що виконуються під час взаємодії з випадками використання або сутностями (системою, підсистемою чи класом). Учасником може бути людина або інша система, підсистема або клас, що представляє щось поза сутністю. Графічно учасник зображений у вигляді «маленької людини».

Випадок використання – це опис набору послідовних подій (включаючи варіанти), що виконуються системою, що призводять до результату, який спостерігає учасник. Випадок використання представляє поведінку сутності, що описує взаємодію між учасниками та системою. Прецедент не показує «як» досягається певний результат, а лише «що» виконується. Варіанти використання вказані дуже простим способом – у вигляді еліпса, всередині якого вказано його назву.

Для демонстрації варіантів використання підготовлені декілька діаграм прецедентів (рис. 4 та рис. 5).

Припустимо, що Міністерство освіти і науки України затвердило проєкт розробки ПЗ smart-університету.



Початком довготривалого процесу буде комунікація з відповідальними особами та формування MVP-версії продукту, пріоритезація модулів системи для ітеративної розробки.

До команди аналізу входять орієнтовно 2–3 аналітики та представники від Міністерства освіти і науки України, хто допоможе сформулювати вимоги до MVP.

До першочергової команди розробки входять:

- Business Analyst
- Project Manager
- Frontend Developer
- Backend Developer
- QA
- UX/UI developer.

**Вибір методології для розробки проекту**

Для розробки проекту smart-університету найкраще підійде гнучка

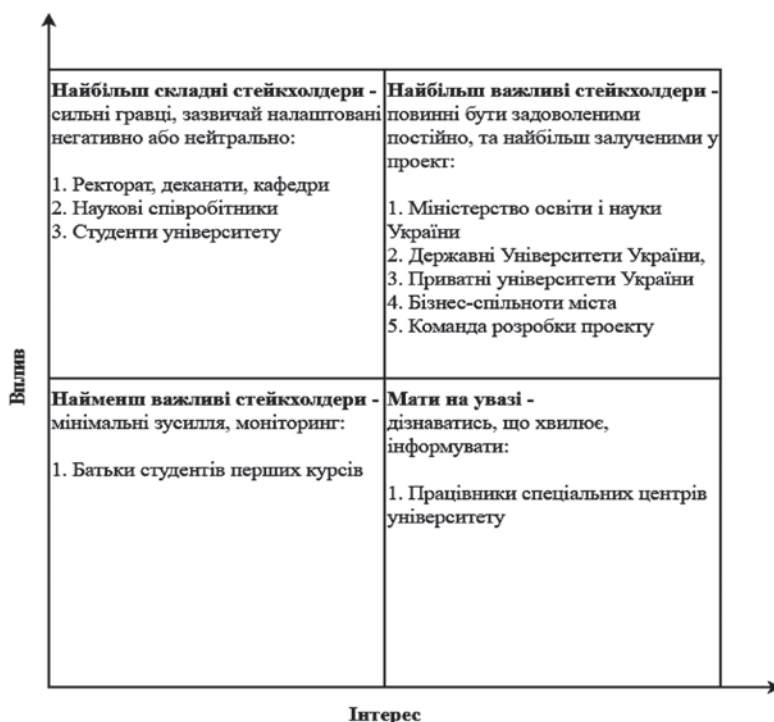


Рис. 3. Stakeholder Register проекту



Рис. 4. Діаграма прецедентів для студента, викладача та адміністратора системи

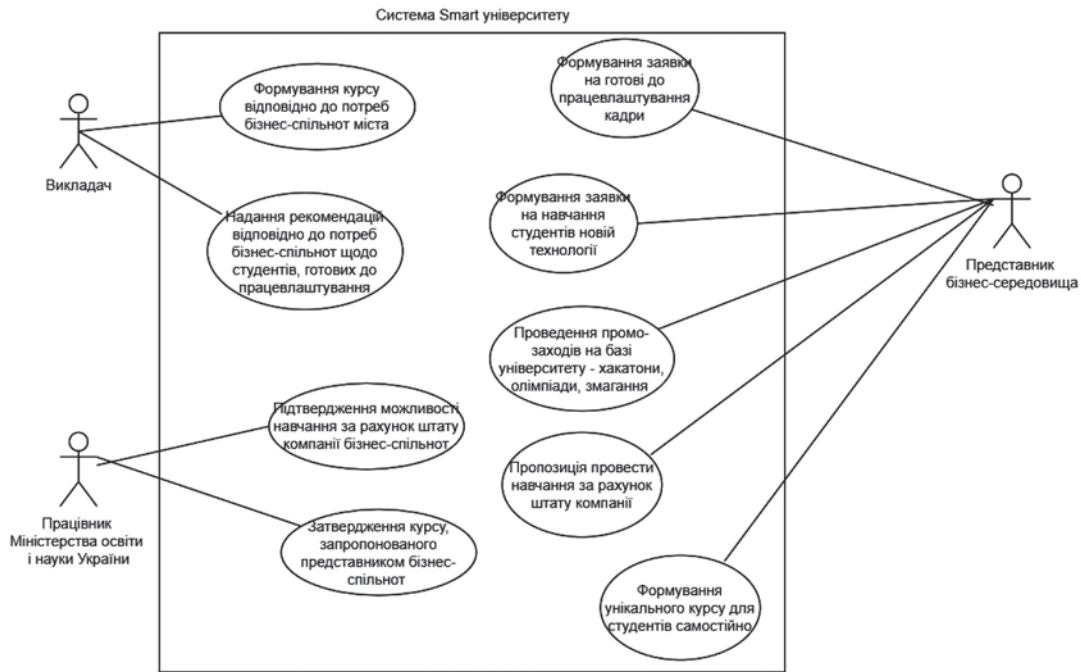


Рис. 5. Діаграма прецедентів для працівника Міністерства освіти і науки України, викладача та студента

методологія Scrum. Scrum – це фреймворк управління, згідно з яким одна чи кілька кросфункціональних самоорганізованих команд створюють продукт поетапно. У команді може бути близько семи чоловік. У Scrum є система ролей, подій, правил і артефактів. У цій моделі за створення і адаптацію робочих процесів відповідають команди. У Scrum використовуються ітерації фіксованої довжини, так звані спринти. Вони зазвичай займають 1–2 тижні (до 1 місяця). Scrum-команди прагнуть створювати готовий до постачання (якісно протестований) продукт у кожній ітерації [9; 10].

**Висновки.** Предметною галуззю дослідження було проведення Discovery-фази бізнес-аналізу в розрізі інформаційної системи smart-університету.

У результаті роботи сформований єдиний образ щодо ідеальної інформаційної системи для інформатизації вишів України.

Також визначена важливість бізнес-аналізу та його стандартів у розробці ПЗ.

Створені артефакти або надана теоретична інформація щодо них:

1. Lean Model Canvas.
2. Stakeholder Register.
3. Organizational Structure of University.
4. Clients Portraits.
5. Use Case Diagrams.
6. Competitors Benchmarking.
7. Product MindMap.
8. Product Backlog.
9. Non-functional requirements.

Проведення такої роботи може стати в нагоді у разі створення та розвитку системи інформатизації вищої освіти в Україні для досягнення сучасних методів отримання вищої освіти – smart-освіти.

Таким чином, наявність якісної вищої освіти – необхідна умова адаптації молоді до вирішення широкого класу життєво важливих завдань. Smart-освіта дозволяє розширити можливості розвитку особистості у вирішенні цих завдань у ситуаціях світу, що постійно змінюється. Саме smart-освіта, на наш погляд, формує творчий потенціал майбутнього спеціаліста, настільки важливий у сучасних умовах.

#### Список літератури:

1. Створення SMART-університету – наше стратегічне завдання. URL: <https://bit.ly/3A0uRC2>.
2. NikitenkoYe., Trunova O. Quality Testing at Evaluation of Professional Competencies in WEB Learning Management System. *Математичні машини і системи*. 2016. № 3. С. 3–14.
3. Lean Canvas: шаблон для бізнес-плану на одній сторінці. URL: [https://skillbox.ru/media/management/lean\\_canvas/](https://skillbox.ru/media/management/lean_canvas/).

4. Что делает бизнес-аналитик на discovery-фазе: анализ потребностей клиента. URL: <https://dou.ua/lenta/articles/business-analyst-discovery-phase/>.
5. «Дискавери-фаза», или что делать, когда аналитика – долго, дорого и неэффективно. URL: <https://vc.ru/dev/74412-diskaveri-faza-ili-chto-delat-kogda-analitika-eto-dolgo-dorogo-i-neeffectivno>.
6. Бизнес-анализ – Краткое руководство. URL: <https://coderlessons.com/tutorials/upravlenie/izuchite-biznes-analiz/biznes-analiz-kratkoe-rukovodstvo>.
7. Как управлять взаимоотношениями со стейкхолдерами. URL: <https://corpshark.ru/p/kak-upravlyat-vzaimootnosheniyami-so-stejkholderami/>.
8. Диаграмма вариантов использования (Use Case diagram) URL: [https://flexberry.github.io/ru/fd\\_use-case-diagram.html](https://flexberry.github.io/ru/fd_use-case-diagram.html).
9. International Institute of Business Analysis. URL: <https://www.iiba.org/>.
10. Заціфрувати 100% держпослуг. Як Diia Company досягатиме амбітної цілі та які послуги вже є онлайн. URL: <https://dou.ua/lenta/interviews/diia-company/>.

**Nikitenko Ye.V., Ometsynska N.V., Medvedev M.H., Guida O.G., Yusypiv T.V.**

#### **SMART UNIVERSITY INFORMATION SYSTEM**

*The article is devoted to the Discovery phase of business analysis in terms of information system smart-university. The aim of the research is to form a single image of the ideal information system for the informatization of Ukrainian universities. To conduct the study, steps are identified: determining the importance of business analysis and its standards in software development (software); definition of smart-university and its purpose in the work processes of universities; benchmarking of existing solutions for informatization of universities; forming the image of an ideal information system using the methods of business analysis; creating artifacts: Lean Model Canvas, Stakeholder Register, Organizational Structure of University, Clients Portraits, Use Case Diagrams, Competitors Benchmarking, Product MindMap, Product Backlog, Non-functional requirements.*

*Education at a smart university should be as involved as possible in the life of the student, be informal, and be based on technologies that are familiar to everyone today. To keep up with the changes that are taking place and the growing demands of students, smart universities need to meet the following requirements: flexibility, adaptability, quality indicators, innovation.*

*The conditions for the introduction of Smart-education are the use of smart-information system, which provides adaptive educational programs; more information and its analysis about students; joint learning technologies; access to the learning process is territorial and hardware independent; transfer of a large number of routine functions from man to machines of artificial intelligence; individualization of education at a new level; involvement of practitioners in the educational process.*

*This work will be useful for the development of higher education in Ukraine to achieve modern methods of building the educational process.*

**Key words:** smart university, business analysis, UML diagrams, education, software development life cycle.

**Олещенко Л.М.**

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

**Мовчан К.О.**

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

**Замковий І.Т.**

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

## ПРОГРАМНИЙ МЕТОД ДЛЯ ТЕСТУВАННЯ ТА АДМІНІСТРУВАННЯ МЕРЕЖ SDN

*Щодня відбувається збільшення обсягу мережевого трафіку і все частіше виникає потреба використовувати великомасштабні мережі, які потребують багато часу і ресурсів для їх налаштування та обслуговування. Автоматизація процесу управління мережею допомагає вирішити згадані проблеми. Наявні мережні архітектури орієнтовані на застарілі протоколи, що стають на заваді масштабуванню, швидкому додаванню нових пристроїв та впровадженню інновацій. Саме тому останніми роками зріс попит на нову мережну архітектуру програмно-конфігурованих мереж SDN. Основними перевагами мереж SDN є програмованість, гнучке централізоване керування та можливість масштабування.*

*У цій роботі використовується контролер OpenFlow для взаємодії між мережею та серверною частиною програмного забезпечення. Проаналізовано найбільш популярні контролери: OpenDaylight, Veason та Cisco Open SDN Controller; описано загальну концепцію програмно-конфігурованих мереж і сформульовано основні вимоги до розроблюваного програмного забезпечення. Для серверної частини вибрано мову C#, фреймворк ASP.NET Core, для клієнтської частини вибрано фреймворк Angular з мовою TypeScript. Використано контролер OpenDaylight Project як додаткова технологія для взаємодії, налаштування та роботи з програмно-конфігурованою мережею. Для програмного забезпечення використано клієнт-серверну архітектуру, описано ключові модулі та сутності системи. Реалізовано ключову функціональність та реалізовано обробку повідомлень з програмно-конфігурованої мережі. Описано загальний принцип роботи програмного забезпечення з мережею та наведено приклад роботи адміністратора мережі, змодельованої у середовищі Mininet.*

**Ключові слова:** програмне забезпечення, SDN, OpenFlow, OpenDaylight Project, мережевий пристрій, IP-адресація, Mininet.

**Постановка проблеми.** Натепер мережі SDN (Software-Defined Networking) є одним з найперспективніших та найбільш швидкозростаючих напрямів розвитку мережевих технологій. Відповідно до моделі мережі SDN мережеві пристрої переходять під контроль програмного забезпечення, що дозволяє зробити їх більш інтелектуальними та полегшувати їх управління. Але, незважаючи на стрімкий перехід іноземних компаній на таку технологію, в Україні вона натепер не є досить популярною. Причина цього полягає у відсутності відкритого програмного забезпечення та складності переходу від стандартної мережевої моделі до моделі SDN. Таким чином, метою цього дослідження є створення програмного забезпечення, яке б дозволяло здійснювати швидке нала-

штування та управління мережею SDN, моніторити мережевий трафік та підключати у мережу нових користувачів.

Поточна архітектура SDN базується на протоколі OpenFlow, який відокремлює управління та пересилання таких функцій традиційного перемикачів на окремі логічні суб'єкти [1–2]. Програмна конфігурованість – це підхід до управління мережею, що забезпечує динамічну, програмну конфігурацію мережі для покращення продуктивності та моніторингу, роблячи це більше схожим на хмарні обчислення, ніж на традиційне управління мережею. Натепер апаратна реалізація використання мереж SDN не знайшла широкого вжитку [3–5].

**Огляд наявних комерційних програмних продуктів.** Основними передумовами до вико-

ристання концепції програмно-конфігурованих мереж є зростання трафіку даних і кількості підключених до мережі пристроїв. За результатами досліджень було встановлено, що мережа SDN дозволяє підвищити ефективність мережевого обладнання на 25–30%, знизити витрати на експлуатацію мереж більш ніж на третину, підвищити гнучкість керування мережею за рахунок реалізації відповідних програм, підвищити безпеку, програмно створювати нові сервіси та оперативно завантажувати їх у мережне обладнання. Архітектурна схема мережі SDN містить рівень інфраструктури, керування та додатків (рис. 1).

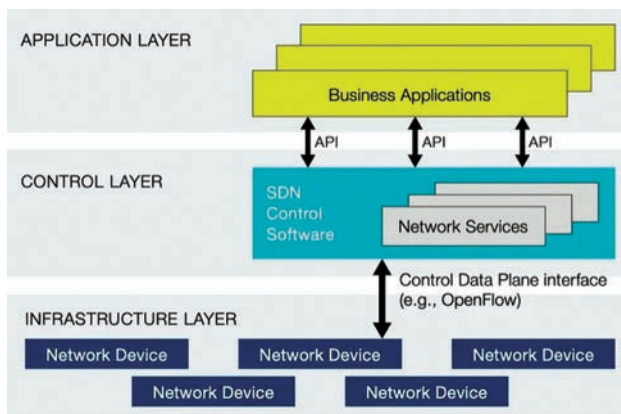


Рис. 1. Архітектурна схема мережі SDN

Керування мережними пристроями відбувається централізовано з консолі або програми на рівні керування.

OpenDaylight Project – це проєкт з відкритим кодом, який створений The Linux Foundation. Основними особливостями контролера є масштабованість та можливість налаштувати архітектуру на мікросервіси, що підвищує продуктивність роботи; контролер підтримує широкий спектр мережних протоколів: OpenFlow, P4 BGP, PCEP, LISP, NETCONF, OVSDB, SNMP; Model Driven Service Abstraction Layer (MD-SAL): рівень абстракції, які дозволяють створити схему бази даних, додатки REST API; кросплатформеність: OpenDaylight працює на багатьох сучасних платформах.

Weason – це швидкий кросплатформний модульний контролер OpenFlow на основі Java, який підтримує як подійну, так і потокову операцію. Ключовими особливостями контролера Weason є стабільність: Weason працює на експериментальному центрі обробки даних із 20 фізичними вимикачами, що має 20 перемикачів, і працює місяцями без простоїв; кросплатформеність: Weason розроблений на Java і працює на багатьох сучасних платформах; open source: Weason має комбіновану

ліцензію GPL v2 та FOSS Стенфордського університету v1.04; динамічність: Weason можна запускати, зупиняти, оновлювати, встановлювати під час виконання, не перериваючи інші незалежні операції; продуктивність: Weason є багатопоточним, що дозволяє розпаралелювати роботу; вебінтерфейс: Weason має додатково вбудований корпоративний вебсервер Jetty та власний UI інтерфейс.

Контролер Cisco Open SDN – це комерційний дистрибутив OpenDaylight, який забезпечує гнучкість бізнесу за допомогою автоматизації мережевої інфраструктури на основі стандартів. Cisco Open SDN абстрагується від складності управління різнорідними мережевими середовищами для поліпшення надання послуг та зменшення експлуатаційних витрат [6].

Такий контролер має відкритий код, а також постійно оновлюється завдяки інноваціям та активній спільноті OpenDaylight. Особливості контролера Cisco Open SDN: кластеризація (можливість високої масштабованості); придатність для обслуговування (Cisco Open SDN дає можливість моніторингу та збору різних метрик); Open Virtual Appliance (спрощена гнучкість встановлення та розгортання); велика кількість інтерфейсів (такий контролер має різні інтерфейси для роботи з мережею та інтеграції додатків).

**Архітектура та програмні модулі програмного забезпечення.** Програмне забезпечення реалізоване у вигляді вебдодатку для взаємодії з мережею. Серверна частина програмного забезпечення виконує такі функції: оброблення запитів, які надходять з клієнтської частини; реалізує роботу з програмно-конфігурованою мережею: зберігає, оброблює та видозмінює дані всередині мережі; забезпечує роботу з OpenFlow контролером, для коректної роботи мережі; проводить налаштування конфігурацій для масштабування мережі; відправка даних на клієнтську частину.

Клієнтська частина програмного забезпечення виконує такі функції, як: взаємодія з функціями системи за допомогою інтерфейса користувача; відображення даних, які надходять із сервера; візуалізація даних про програмно-конфігуровану мережу; відображення даних про трафік всередині мережі; забезпечення захищених запитів до серверної частини; ідентифікація, аутентифікація та авторизація адміністраторів. Основний сценарій використання системи з точки зору адміністратора мережі можна описати таким чином: адміністратор реєструється та авторизується у системі, перевіряє робочий стан мережі, за потреби оновлює дані всередині мережі, переглядає поточний

трафік, опрацьовує нові запити на додавання у мережу, додає новий мережевий пристрій.

Сучасні маршрутизатори виконують два основні завдання: передавання даних – просування пакета від вхідного порту на вихідний порт; керування даними – обробка пакета і ухвалення рішення про те, куди його спрямувати з огляду на поточний стан маршрутизатора. Програмне забезпечення, яке реалізує рівень керування, є досить примітивним порівняно зі складністю мережі, а також є закритим для розробників, дослідників і мережних операторів, що не дозволяє використовувати та налаштовувати мережу відповідно до потреб. Згідно з підходом програмно-конфігурованих мереж запропоновано розмежувати рівень керування та рівень передачі даних. Для ефективної взаємодії між рівнем керування та рівнем передачі даних використовується OpenFlow контролер. Для тестування програмного забезпечення створено локальну мережу за допомогою програми Mininet. Для поєднання програмно-конфігурованої мережі і контролера створено дві віртуальні мережі та налаштовано їх підключення.

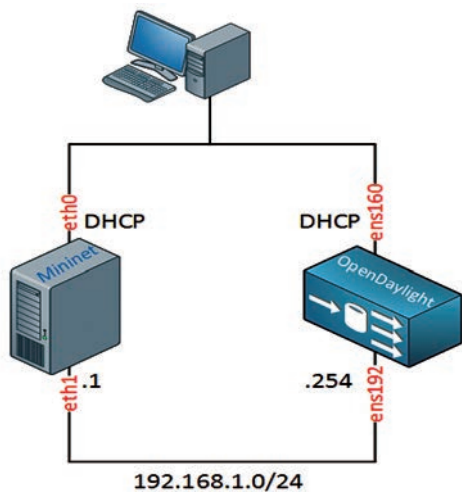


Рис. 2. Схематичне зображення системи з двома віртуальними машинами

Після поєднання мережі і контролера за допомогою протоколу DHCP ми можемо створити мережу відповідно до потреб або технічних вимог. Схематичний рисунок взаємодії мережі і контролера зображено на рис. 3.

Після створення мережі бажаної топології за допомогою контролера з нею можна взаємодіяти, використовуючи мережевий протокол управління NETCONF, який дозволяє встановлювати, маніпулювати та видаляти конфігурації мережевих пристроїв з використанням XML для кодування

даних. NETCONF може бути використаний як альтернатива CLI для налаштування мережевих пристроїв та для отримання статистики з мережевих пристроїв. Контролер OpenDaylight надає RESTCONF API інтерфейс, який дозволяє взаємодіяти через HTTP та отримувати дані з мови моделювання даних YANG, що розроблена для мережевого протоколу NETCONF. Таким чином, формуючи запис на серверній частині, ми можемо звертатися до мережі та проводити маніпуляції, оновлення або видалення конфігурацій мережевих пристроїв, а також моніторити трафік та масштабувати мережу.

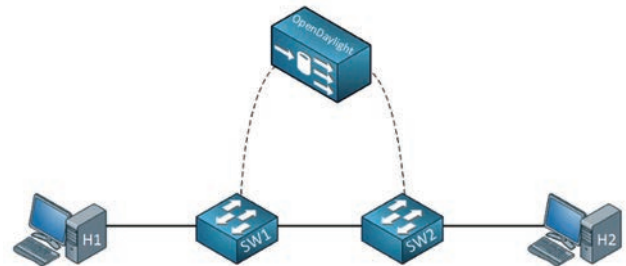


Рис. 3. Взаємодія з мережею через контролер

Змодельована мережа складається з п'яти комутаторів та п'ятнадцяти персональних комп'ютерів. Загальна кількість мережевих пристроїв – 20, що дозволяє створити відносно складну топологію та перевірити швидкість і ефективність такої мережі. Топологія створеної мережі зображена на рис. 4.

Програмне забезпечення містить модулі для роботи з мережею: модуль авторизації та реєстрації, модуль для підключення нових мережних пристроїв, модуль для взаємодії з мережею, перегляду даних про трафік, модуль безпеки.

Сутність мережевого пристрою складається з таких полів: id – унікальний ідентифікатор для кожного елемента мережі, який встановлюється безпосередньо мережею; name – ім'я комутатора, маршрутизатора або комп'ютера кінцевого користувача; ip – IP-адреса пристрою; first-seen – час додавання до мережі; mac – MAC-адреса пристрою; last-seen – час останнього виклику пристрою всередині мережі; attachments-points – список приєднаних мережних пристроїв до цього пристрою.

Поля first-seen та last-seen зберігаються у форматі DateTimeOffset, що являє собою момент часу, який зазвичай виражається у вигляді дати і часу доби щодо часу в форматі UTC та зберігається у наносекундах. У разі додавання нового пристрою до системи слід вказати його ім'я та IP-адресу

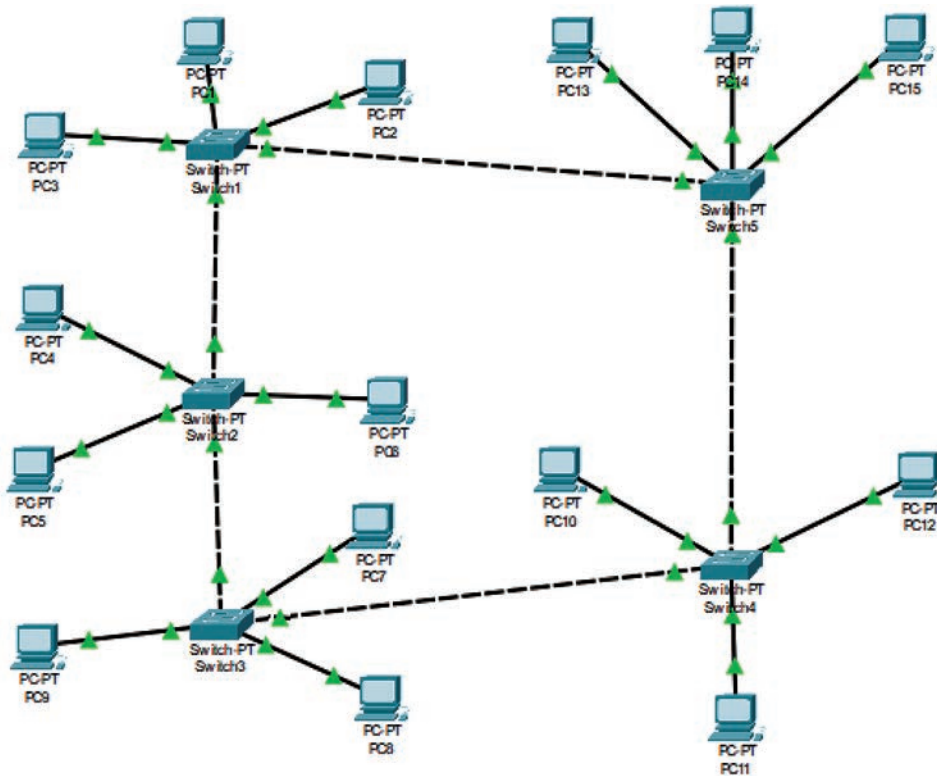


Рис. 4. Топологія мережних пристроїв для програмно-конфігурованої мережі

SDN Software

Home Your Networks About

Welcome, admin, Log Out

### List of available network

Id	Name	Created at	Updated on	Status
ebbe4649-3b14-4e83-8e12-c73747162c93	Network1	2021-06-10T01:10:10.6921783+03:00	2021-06-10T01:10:10.6931426+03:00	ON
6d0f7575-8d12-4ca4-9c1f-ee47cebde26b	test-version	2021-06-10T01:10:10.6933778+03:00	2021-06-10T01:10:10.6933821+03:00	OFF
3607e2ce-be36-419c-b9ff-ee2785a73349	SDN	2021-06-10T01:10:10.6933842+03:00	2021-06-10T01:10:10.6933851+03:00	OFF

Рис. 5. Сторінка вибору мережі

комутатора або роутера, до якого потрібно підключити такий пристрій усередині мережі. Решта полів створюються автоматично всередині мережі.

Сутність мережного пристрою пов'язана з іншою сутністю – attachments. Ця сутність має такі поля: `tr-id` – відображає ім'я приєднаного пристрою; `corresponding-tr` – є поєднанням імені цього пристрою та його MAC-адреси; `active` – булівське поле, що показує, чи є активним такий зв'язок у цей період часу.

Ці сутності зв'язані всередині мережі зв'язком One-to-Many та відображаються одночасно під час запиту на отримання сутності мережного пристрою. Модуль для взаємодії з мережею дозволяє налаштувати та вносити зміни до наявної мережі та адміністратору вносити зміни до окремих компонентів мережі: змінювати підключення між пристроями; встановлювати, налаштувати та змінювати ліцензії для мережі; змінювати конфігураційні файли для пристроїв та мережі;

здійснювати моніторинг мережі. Модуль для перегляду даних про трафік всередині мережі складається з даних про трафік, який проходить через мережу.

Отримана інформація буде відображати перехід між мережними пристроями. Наприклад: у разі пінгування з першого комп'ютера до десятого буде виведений шлях, який проходить між цими двома комп'ютерами. Сутність traffic має такі поля: number – унікальний номер взаємодії; source – IP-адреса пристрою, що посилає дані; destination – IP-адреса пристрою, що отримує дані; time – час виконання. Серверна частина розділена на три ключові модулі: Network Access Layer,

Business Logic Layer та Web API. Модульність програмного забезпечення досягається за рахунок шаблону проектування – впровадження залежностей (Dependency injection). Взаємодія користувача з інтерфейсом додатка забезпечена поєднанням шаблонів, засобів Bootstrap та Angular-модулів. У пакеті client-арі розміщено файли та шаблони розроблених вебсторінок. У разі виконання POST-запиту на додавання нового мережного пристрою Адміністратор вводить дані, які проходять валідацію на відповідність своїм форматам на клієнтській частині, далі надсилаються на серверну частину та обробляються, після чого завантажуються у програмно-конфігуровану мережу.

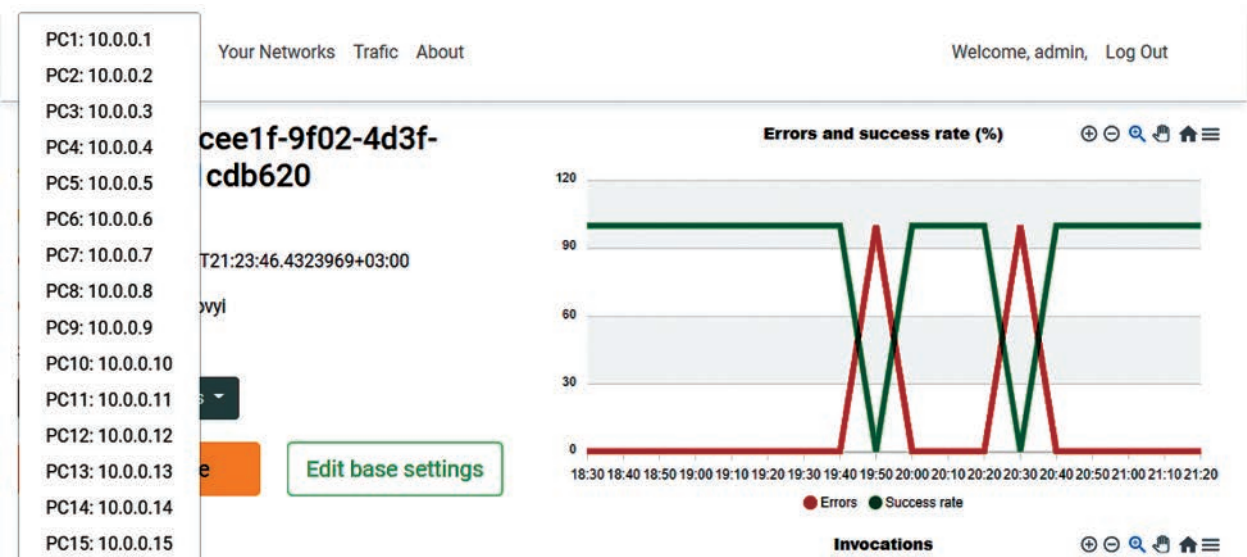


Рис. 6. Перегляд списку підключених пристроїв

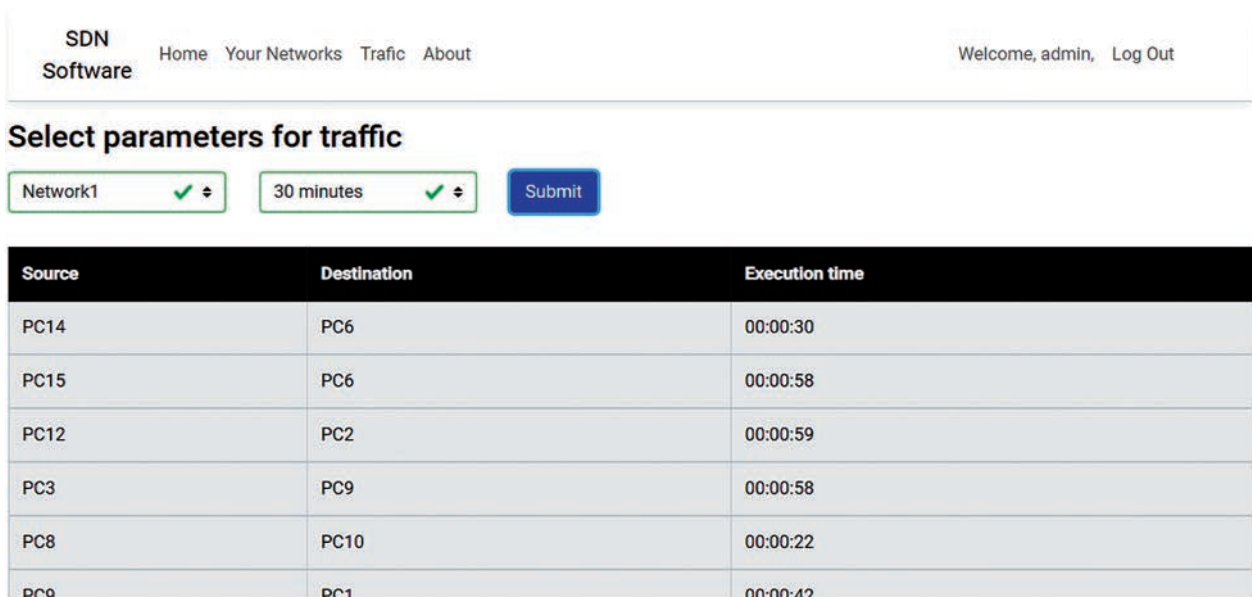


Рис. 7. Сторінка перегляду трафіку



**Висновки.** У цій роботі запропоноване програмне забезпечення для взаємодії між мережею SDN та серверною частиною з використанням OpenFlow контролера. Описано створену топологію для тестування мережі SDN та описано базові модулі програмного забезпечення. Запропонований програмний продукт забезпечує централізоване керування, збір та аналіз трафіку даних, масштабування та внесення змін у мережу. Визначено можливі напрями розширення та покращення запропонованого програмного забезпечення: роз-

роблення механізму автоматичних сповіщень, наприклад, про оновлення мережі; автоматичне оновлення ліцензій всередині мережі; створення можливості для швидкого розгортання вже наявних мереж; створення функціональності для перетворення традиційних мереж на програмно-конфігуровані; зміна способу авторизації адміністраторів з Base Auth на JWT токен; додавання модуля прогнозування трафіку мережі на основі методів машинного навчання; покращення UX/UI клієнтської частини проєкту.

### Список літератури:

1. McKeown N., Anderson T., Balakrishnan H., Parulkar G., Peterson L., Rexford J., Shenker S. and Turner J. "OpenFlow: enabling innovation in campus networks", *SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 2008.
2. Intel IXP Network Processors. URL: [http://www.intel.com/p/en\\_US/embedded/hwsw/hardware/ixp-4xx](http://www.intel.com/p/en_US/embedded/hwsw/hardware/ixp-4xx).
3. Netronome Flow Processors. URL: <http://www.netronome.com/pages/flow-processors/>.
4. Open vSwitch. URL: <http://openvswitch.org/>.
5. Software-Defined Anything (SDx) Market. URL: <https://www.marketsandmarkets.com/PressReleases/software-defined-anything.asp>
6. Cisco Open SDN Controller. URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/cloud-systems-management/open-sdn-controller/index.html>

### **Oleshchenko L.M., Movchan K.O., Zamkovyi I.T. SOFTWARE METHOD FOR TESTING AND ADMINISTRATION OF SDN NETWORKS**

*Every day we can see an increase in network traffic and IT companies increasingly need to use large-scale networks that require a lot of time and resources to set up. Automating this process helps to solve these problems. Existing network architectures focus on outdated protocols that interfere with scaling, rapid addition of new devices, and innovation. That is why in recent years the demand for a new network architecture of the software-configured SDN network has increased. The main advantages of SDN networks are programmability and flexible centralized management and scalability.*

*The proposed software uses an OpenFlow controller for interaction between the network and the server part of the program. The most popular controllers are analyzed: OpenDaylight, Beacon and Cisco Open SDN Controller. Problems and shortcomings of traditional networks are analyzed, the general concept of software-configured networks is described and the basic requirements to the software are formulated. C # language, ASP.NET Core framework is chosen for the server part, Angular framework with TypeScript language is chosen for the client part. The OpenDaylight Project controller is used as an additional technology for interaction, configuration and work with a software-configured network. The client-server architecture is used for the software, key modules and essences of the system are described. Implemented key functionality, created a software-configured network and implemented message processing from the network. The general principle of work of the software with a network is described and the example of work of the administrator of the network modelled in the Mininet environment is resulted.*

**Key words:** software, SDN, OpenFlow, OpenDaylight Project, network device, IP addressing, Mininet.

**Петренко М.В.**

Відкритий міжнародний університет розвитку людини «Україна»

## ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОЛЯ «ISBN» ТА ЇХ ВПЛИВУ НА ПРОЦЕС ОБРОБКИ БІБЛІОГРАФІЧНИХ ДАНИХ

*Стаття присвячена розгляду міжнародного книжкового номера ISBN як складової частини бібліографічного запису та бібліографічної бази даних у контексті процесів підвищення якості та інтеграції бібліографічних даних.*

*Нині актуальні процеси створення зведених електронних каталогів бібліотек та покращення якості даних, що в них зберігаються. Для забезпечення достатнього рівня якості зведених каталогів необхідно розробити, обґрунтувати та випробувати методи підготовки та обробки даних.*

*ISBN є важливою частиною бібліографічного запису та, окрім унікальності, несе у собі закодовану додаткову інформацію. Використання цієї інформації може принести багато користі. Але для цього необхідно розуміти всі нюанси ISBN як теоретичного плану, так і особливостей його застосування в реальних бібліографічних базах даних.*

*Стаття описує результати проведеного дослідження кількісних та якісних показників поля даних ISBN на основі реальних даних 141-ї публічної бібліотеки м. Києва, отриманих з двох різних джерел.*

*Відзначені особливості поля, як спільні, так і відмінні для обох бібліографічних баз. Зроблена оцінка процесів відновлення структури ISBN на основі правил. Оцінено потенціал використання поля ISBN у процесах інтеграції гетерогенних бібліографічних даних. Запропоновано стандартизацію ISBN та оцінено ефект від неї. Описано знайдену проблему з правилами ISBN, яка потребує уточнення на рівні агенції ISBN. Оцінено та пояснено динаміку змін поширеності ISBN. Багато уваги приділено дублям ISBN і зв'язку кількості дублів та унікальних записів ISBN з помилками та форматами представлення даних. Проаналізовано помилки ISBN, їх структуру та причини виникнення.*

*Отримані результати дозволять вибудувати стратегію обробки досліджуваного поля бібліографічних даних з метою досягнення кращих результатів у задачах очистки, стандартизації та інтеграції даних.*

**Ключові слова:** ISBN, структура ISBN, стандартизація ISBN, бібліографічні дані, дедублікація, помилки введення.

**Постановка проблеми.** Натепер актуальним є питання створення зведених електронних каталогів бібліотек. Їх створення можливе шляхом інтеграції гетерогенних бібліографічних даних. Більшість систем електронних каталогів є пошуковиками, а це робить питання якості даних та її підвищення надзвичайно важливими.

Одним з питань, які виникають під час такої інтеграції, є питання об'єднання записів, що стосуються одного і того ж об'єкта. У дослідженні [1, с. 27] зазначено, що проблема видалення дублікатів є найбільш актуальною з невирішених проблем зведених електронних каталогів.

Одним з поширених полів бібліографічних даних є ISBN. Це поле не часто використовується у пошуку користувачами бібліотек, але може бути використане у задачах інтеграції даних, видалення дублів та підвищення якості даних. Але для ефективного використання необхідно дослідити та використовувати особливості ISBN, яким і присвячена стаття.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** ISBN – міжнародний стандарт кодування книжок,

який забезпечує унікальність коду книги та має контрольне число для контролю відсутності помилок. До 2007 року привласнювали коди з 10 десятицифрових цифр. З 1 січня 2007-го ISBN був уніфікований з EAN, міжнародною системою кодування товарів у роздрібній торгівлі з 13 десятицифрових цифр [2, с. 11]. Також з 2008 року уніфіковано було і міжнародний стандарт кодування нотних видань (ISMN) [3, с. 6].

Після уніфікації ISBN та ISMN є повністю сумісними [3, с. 5] і по кодах і по алгоритмах контролю відсутності помилок. ISBN починається з EAN 978 або 979. Коди ISMN починаються з EAN 979, за яким слідує 0.

10-значні коди ISBN можна перетворити на новий формат, додавши перед кодом цифри «978», також необхідно за новим алгоритмом розраховувати контрольну цифру та замінити нею стару.

До 2008 року ISMN мав інший формат (коди починалися з «M-060»), але екземплярів кодів, які могли б належати до цього формату у досліджуваних базах знайдено не було).

Коди ISBN та ISMN мають структуру. Старий формат має 4 блоки, а новий – 5 (додався EAN). Блоки цифр розділяються дефісами [2, с. 11].

Структура:

– Код EAN (для нового формату) – 3 цифри (978 або 979);

– Код країни/об'єднання;

– Код видавця;

– Код видання;

– Контрольна цифра.

Незмінну довжину мають лише перший та останній блоки. Розміри інших блоків визначаються згідно з правилами. Правила можуть змінюватися з часом.

Збереження структури коду може допомогти встановити країну видання та видавця.

Один видавець може мати декілька кодів блоку видавця, кожен з відповідним діапазоном кодів, що можуть використовуватися для видань.

Для задач машинної обробки часто прибирають дефіси і зберігають дані не структуровано, що відповідає стандарту MARC 21 [4]. При цьому унікальність номерів зберігається.

В Україні за видачу кодів видавцям відповідає Книжкова палата України. Згідно з її вимогами код без поділу на блоки не є дійсним кодом ISBN [5].

Коди, як і будь-яка бібліографічна інформація, можуть містити помилки введення. Такі помилки можуть з'являтися як на етапі введення даних бібліографом, так і на етапі підготовки до друку.

Стандарт бібліографічних даних MARC визначає такі варіанти недійсності ISBN кодів, як [4]:

1) структурна недійсність:

а) неправильна довжина;

б) неправильна структура;

в) контрольна цифра не відповідає розрахованій за алгоритмом;

2) недійсність застосування:

а) однакові коди, що привласнені різним ресурсам.

У задачах інтеграції даних з різних джерел ISBN може застосовуватись для пошуку дублів через коди книг; виправлення значення поля «Видавець».

Основне та очевидне завдання використання ISBN – можливість ідентифікувати унікальні книги. В ідеальних умовах, коли всі унікальні видання мають унікальні коди, які введені без помилок, питання ідентифікації повних дублів було б вирішеним. Досить було б порівняти коди і згрупувати записи, коди яких однакові. Так, ISBN використовується у багатьох системах обробки бібліографічних даних, хоча це і пов'язано з проблемами [6].

Але пошук дублів книг через співпадіння ISBN має такі проблеми, як:

1) відсутність кодів;

2) структурні помилки;

3) код може бути неунікальним для видання, оскільки:

а) може стосуватися серії книг;

б) може стосуватися набору книг;

в) може бути помилково привласненим видавцем різним виданням;

г) може містити помилки введення.

Також код може бути представлений у 10 цифрах або у 13 цифрах, порівняння яких не дасть точного співпадіння.

Також завдяки властивостям ISBN, а саме наявності в його складі групи, що має прив'язку до видавця, з'являється можливість використовувати код у завданнях покращення поля «Видавець».

**Постановка завдання.** Мета статті – розглянути такі актуальні для описаних вище завдань пошуку дублів та виправлення значення поля «Видавець» питання, як:

– наявність ISBN;

– структурна недійсність ISBN;

– збіги ISBN;

– вплив стандартизації ISBN на пошук збігів;

– структура ISBN.

Надалі все, що стосується ISBN-13, стосуватиметься і ISMN-13. Виокремлювати його немає потреби через ідентичність алгоритмів та невелику кількість екземплярів ISMN-13.

У дослідженні використовуються 378742 бібліографічні записи двох різних каталогів публічних бібліотек м. Києва – Каталог бібліотеки ім. Тараса Шевченка для дітей [7] (далі – База 1) та Каталог публічної бібліотеки ім. Лесі Українки [8] (далі – База 2). Разом вони містять дані 141-ї публічної бібліотеки м. Києва.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

### 1. Наявність ISBN

Цікаво розглянути динаміку змін наявності номера ISBN у книгах за роком видання (рис. 1) на основі даних з обох баз, які розглядаються в цій роботі.

У колишньому СРСР стандарти використання ISBN регламентувалися і були введені в дію 1 січня 1988 р. [9]. Підтвердження цьому можна спостерігати у вигляді різкого стрибка (рис. 1, точка 1) в наявності номерів у 1988 році.

У 1996 році Україна підписала Угоду про співпрацю з Міжнародним агентством ISBN. У 1997 році вимоги щодо обов'язкового використання ISBN були закріплені у Законі України «Про

видавничу справу» від 05.06.97 р. та було створено Національне агентство ISBN (при Книжковій палаті України) [9]. Відповідне зростання відсотка книг з ISBN теж можна помітити на графіку (рис. 1, точка 2).

Останній стрибок (рис. 1, точка 3) можна пояснити запровадженням 1 січня 2007 року нового формату ISBN, що одночасно і розширив кількість доступних номерів, і став сумісним зі штрих-кодами, наявність яких зробило ISBN машинозчитуваним форматом.

Також видно, що з часом актуальність використання цього поля зростає і графік наявності ISBN прямує до 100%.

У розрізі ISBN маємо:

1) 313574 – загальна кількість записів ISBN (унікальних у межах записів книг, до яких належать);

а) База 1 – 69736;

б) База 2 – 243838;

2) 233015 унікальних ISBN у межах двох баз;

3) 51218 записів ISBN мають два чи більше дублі в межах двох баз.

У розрізі книг маємо:

4) 272831 записів книг мають хоча б один ISBN (72% від кількості загальної кількості записів книг);

а) База 1 – 69383 (68% від загальної кількості);

б) База 2 – 203488 (73% від загальної кількості);

5) 35044 записів книг мають більше одного відмінного ISBN (13% від загальної кількості книг з ISBN);

а) База 1 – 345 (0,3% від загальної кількості);

б) База 2 – 34699 (13% від загальної кількості);

б) Найбільша кількість різних ISBN у одного запису книги – 6.

Велика кількість записів книг з більш ніж одним ISBN більш характерна для Бази 2, ніж для Бази 1 (різниця у 43 рази).

Загалом у разі об'єднання записів обох баз виявлено 51218 ISBN, що мають не менше 2 співпадінь записів, що стосуються різних записів книг (19% від книг, що мають ISBN). Максимальна кількість співпадінь – 183.

## 2. Наявність у ISBN структурних помилок

Наступним важливим параметром є структурна дійсність [4]. Введемо такі класи помилок, як:

- кількість символів ISBN не відповідає формату;
- контрольна цифра вказує на помилку в коді;
- код не відповідає правилам ISBN.

Правила ISBN можна отримати у міжнародній агенції [10], а правила ISMN у інструкції міжнародної агенції ISMN [3].

Кількість записів ISBN з помилками цих видів – 9018 (2,9% від загальної кількості записів ISBN);

База 1 – 2475 (3,5% від загальної кількості);

База 2 – 6543 (2,7% від загальної кількості).

Розподіл за типом помилки:

1) кількість символів ISBN не відповідає формату – 2663 (29,5%);

а) База 1 – 1009 (41% від загальної кількості по базі);

б) База 2 – 1654 (25% від загальної кількості по базі);

2) контрольна цифра вказує на помилку в коді – 5044 (56%);

а) База 1 – 1465 (59% від загальної кількості по базі);

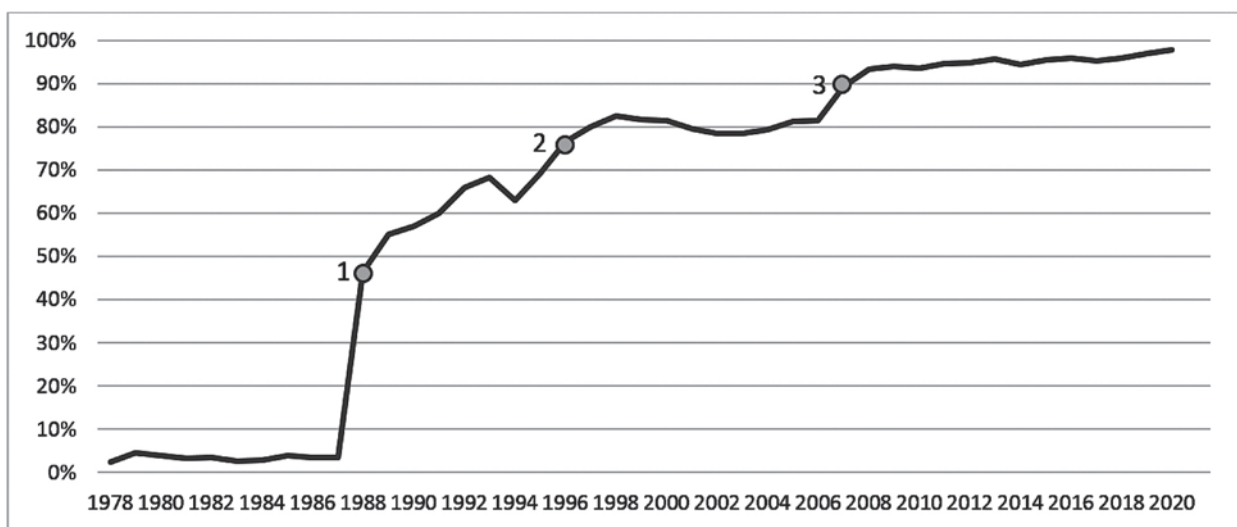


Рис. 1. Відсоток наявності в записах книг ISBN за роками видання

б) База 2 – 3579 (55% від загальної кількості по базі);

3) код не відповідає правилам ISBN – 1311 (14,5%):

а) База 1 – 1 (0,04% від загальної кількості по базі);

б) База 2 – 1310 (20% від загальної кількості по базі).

Абсолютна більшість помилок в обох базах пов'язана з тим, що контрольна цифра не відповідає коду, а отже, код містить помилку або в значимій частині, або в контрольній цифрі. Варто зазначити, що частина кодів стали помилковими ще на етапі підготовки книги до друку.

Серед записів без структурної недійсності дублі має 50107 записів ISBN (16% від загальної кількості ISBN без помилок).

Серед записів зі структурною недійсністю дублі має 1170 записів (12,3% від загальної кількості зі структурними помилками).

Помилкові ISBN не можуть мати співпадіння з правильними за визначенням (і це підтвердилося на практиці). Випадкові співпадиння кількох помилкових записів між собою малоімовірно. У разі помилок введення кількість дублів неправильних ISBN мала б прямувати до нуля. Отримані результати свідчать про велику кількість помилок, створених під час підготовки до друку.

Записи ISBN, що містять помилки, можна розділити на такі множини:

1) помилки введення даних з книги:

а) записи, які повинні були мати дублі

– мають дублі через співпадиння кількох помилкових ISBN (малоімовірно);

– не мають дублів через помилку;

б) Записи, які не повинні були мати дублів

– не мають дублів;

2) помилки підготовки книги (той самий відсоток дублів ISBN, що і в іншій базі).

Оскільки дублі серед записів ISBN з помилками можливі лише у разі, якщо джерелом помилок є неправильно надрукований номер на виданні, то мінімальна кількість ISBN з помилками підготовки книги дорівнює кількості дублів – 1170 (12,3% від кількості ISBN з помилками).

Якщо ж врахувати те, що з об'єктивних причин не всі ISBN можуть мати дублі і серед ISBN без помилок дублі мало лише 16% кодів, то ймовірний відсоток помилок видавця серед загальної кількості помилок можна розрахувати так:

$$N*0+K*16 = 12,3$$

$$K*16 = 12,3$$

$$K = 12,3/16 = 0,77 = 77\%$$

де N – кількість записів ISBN з помилками введення, а K – кількість записів ISBN з помилками підготовки книги.

Отже, маємо орієнтовну частину помилок, пов'язаних з додрукарською підготовкою, – 77% за мінімальної 12,3%.

Серед записів ISBN з дублями, що містять помилки, є такий розподіл помилок за типами:

– кількість символів ISBN не відповідає формату – 223 (20%);

– контрольна цифра вказує на помилку в коді – 642 (58%);

– код не відповідає правилам ISBN – 246 (22%).

Отже, видавець на 32% рідше використовує неправильну кількість символів, ніж у середньому в базах. Помилки з неправильною кількістю символів простіше виявити та виправити на етапі підготовки.

До помилок, спричинених неправильним введенням даних бібліографами, ймовірно належать 2074 записів ISBN з помилками. Якщо врахувати, що загальна кількість записів ISBN 313574, то їх вага незначна – 0,7%.

Існують методи усунення помилок введення із застосуванням контрольної цифри. Вони не гарантують відновлення даних, хоча здебільшого можуть допомогти. Деякі види помилок введення потребують ручного втручання або розробки інтелектуального алгоритму на базі правил ISBN.

### 3. Пошук потенційних дублів записів книжок по ISBN

Оскільки з одним записом книг може бути пов'язано декілька записів ISBN, статистика по записах книг, що мають співпадиння з іншими книгами по ISBN, суттєво відрізняється від того, що ми мали у разі порівняння ISBN:

– 121275 – усього записів книг, що мають співпадиння з іншими книгами по ISBN у межах двох баз (32% усіх записів книг, або 44% від книг, що мають ISBN);

– 118705 – записів книг, що мають співпадиння з іншими книгами по ISBN без помилок у межах двох баз (118 587 виключно на основі записів без помилок);

– 2688 – записів книг мають співпадиння з іншими книгами виключно по ISBN зі структурними помилками.

Кількість потенційних дублів книг на основі порівняння ISBN є значною. Не всі записи книг з однаковими ISBN є дублями. Але групування на основі співпадиння ISBN може допомогти перевірити відповідність інших параметрів та знайти частину справжніх дублів.

### 4. Стандартизація ISBN

Після переходу на новий стандарт ISBN продовжили перевидаватися книги, які отримали ще

10-значний код. Такі номери мали змінити формат згідно з новими вимогами. Також переведення номерів на новий формат могло відбуватися з інших міркувань. Крім іншого, як зазначає Бібліотека Конгресу [11], з 2005 по 2007 рік існував перехідний період, коли видавці могли друкувати номери різного формату, а бібліографи в різний час могли вибирати для введення в базу той чи інший формат.

Якщо порівнювати ISBN у тому вигляді, в якому він введений у БД, то з поля зору може зникнути певна кількість книжок, ISBN яких введено в іншому стандарті.

Приведемо всі 10-значні ISBN до 13-значного формату (додамо префікс «978» та замінимо значення контрольної цифри на розраховане за відповідним алгоритмом). Порівнювати будемо лише ISBN без помилок, яких є 303770 записів.

Порівняння у вихідному форматі:

- 225228 унікальних значень;
- 49766 унікальних ISBN мають дублі та об'єднують 128308 записів.

Порівняння після приведення до 13-значного формату:

- 223227 унікальних значень (-2001 запис, або -1%);
- 50266 унікальних ISBN мають дублі та об'єднують 130759 записів.

Відбулося скорочення кількості унікальних значень (-2001, або -1%) та зростання кількості кодів, що мають дублі (+500, або +1%) та кількості об'єднаних записів (+2451, або +2%).

Без приведення ми мали 118705 записів книг, що мали однакові ISBN. Після приведення стало 120573. Приріст на 1,5%, або на 1868 записів книг.

Отже, зміна формату є виправданим засобом стандартизації значень поля та дозволяє підвищити якість бази за рахунок об'єднання записів, ISBN яких знаходилися в різних форматах.

## 5. Структура ISBN

Наявність структури ISBN важлива для отримання доступу до окремих груп цього номера. Наприклад, для ідентифікації видавця.

Як зазначалося у вступі, ISBN складається з кількох блоків різної довжини, розділених дефісами. Довжина блоків варіюється і має відповідати зведенню правил, розроблених міжнародною агенцією [10].

Цікава закономірність була віднайдена у 3-му класі структурних помилок – код не відповідає правилам ISBN. Перевірка на такий клас помилок відбувалась виключно у випадках, коли код був потрібної довжини та контрольна цифра підтвер-

джувала відсутність помилок. Усього таких помилок в обох базах 992. Причому 972 (98%) з них суперечать лише одному з правил – у правилі сказано, що код з першими блоками «978-611» належить країні Таїланд та заборонений до використання. Решта 2% є проблемами введення даних, але з правильною контрольною цифрою.

На підтвердження суперечностей кодів України та Таїланду знайдено дві книги на один ISBN 978-611-01-0039-7:

- Банківські інновації С.Б. Єгоричева;
- การวิจัยดำเนินงาน (Operations Research).

Один і той самий код був знайдений у різних джерелах. Щодо українського коду можна навіть наочно пересвідчитись у тому, що це не помилка бібліографів.

Можна вважати такі ISBN умовно придатними, оскільки настільки багато однотипних помилок з правильною контрольною цифрою бути не може. Також ручною перевіркою не було знайдено випадків, коли б частина коду «978-611» була наслідком помилки введення (основний кандидат «978-617»). Усі книги, які були знайдені в Інтернеті, мали код саме «978-611».

Можливо, це є підтвердженням того, що зміни правил ISBN можуть мати наслідки. Лише за другий квартал 2021 року було впроваджено 73 зміни діапазонів, а відповідно і правил [10].

Наслідки внесення змін до правил:

- відсутня гарантія відтворення структури ISBN (щодо «978-611» це вже неможливо);
- немає певності, що відтворена структура є правильною;
- дійсні ISBN можуть не пройти перевірку за правилами.

Таким чином, правило використання у машинозчитуваних форматах даних ISBN без поділу на блоки має ризики втрати даних без можливості автоматичного відновлення. В тому числі до цього можуть призвести інструкції стандарту MARC 21 [4]. А відсутність достовірної структури суттєво ускладнює використання поля ISBN у процесах інтеграції гетерогенних бібліографічних даних.

Деякі коди ISBN введені зі збереженням структури. Для таких кодів можна проаналізувати співпадіння відновленої за правилами структури та тієї, яка була введена в бібліографічну базу.

Записів ISBN зі збереженням структури:

- усього – 71847 (23% від записів ISBN двох баз);
- у Базі 1 – 45335 (65% від наявних у Базі 1);
- у Базі 2 – 26512 (11% від наявних у Базі 2).

У Базі 2 у 6 разів менший відсоток записів зі структурою. Така невелика кількість пов'язана

з тим, що вони вводилися так лише на початку ведення бази. Серед сучасних записів таких лише кілька десятків.

У Базі 1 ISBN зі збереженням структури вводяться рівномірно, хоча третина кодів вводиться без поділу на блоки.

Така різниця вкотре показує, що при роботі з обраними бібліографічними базами ми маємо справу з гетерогенними даними.

Для записів ISBN, в яких була збережена структура, можна провести перевірку, чи автоматична генерація зможе відтворити саме таку структуру, яка була введена.

Якщо взяти ISBN, які не мають структурних помилок, то співпадіння введеної та відновленої структури буде у 69057 випадках. Відсутня вона буде у 786 записів ISBN (1,1% від загальної кількості без помилок). 2004 записи мають помилки.

Отже, спостерігається невисока наявність структурованих записів ISBN. Трапляються випадки, коли за діючими правилами відновити структуру неможливо. А наслідки відновлення за правилами в 1,1% випадків не співпали з введеним у базу значенням. Також заважають відновленню структури і помилки, які роблять ISBN недійсним.

**Висновки.** Були зібрані великі обсяги бібліографічних даних, масив правил ISBN та алгоритми перевірки ISBN. Розроблено програмне забезпечення, яке реалізовувало правила та алгоритми ISBN для використання в обробці даних. За допомогою програмного забезпечення проаналізовано дані, знайдено особливості поля. Зроблена оцінка процесів відновлення структури ISBN на основі правил. Оцінено потенціал використання поля ISBN у процесах інтеграції гетерогенних бібліографічних даних. Оцінено та пояснено динаміку змін поширеності ISBN. Проаналізовано помилки ISBN, їх структуру та причини виникнення.

Описано знайдену проблему з правилами ISBN, яка потребує уточнення на рівні агенції ISBN. Запропоновано стандартизацію ISBN та оцінено ефект від неї.

Незважаючи на те, що лише 72% книг з бібліографічних баз мають ISBN, а 2,9% наявних ISBN містять помилки, це поле несе у собі корисну інформацію та є перспективним для використання в процесах обробки бібліографічних даних. В тому числі в процесах інтеграції гетерогенних бібліографічних даних.

### Список літератури:

1. Online catalogs: what users and librarians want: an OCLC report: OCLC, 2009. URL: <https://www.oclc.org/content/dam/oclc/reports/onlinecatalogs/fullreport.pdf>.
2. International ISBN Agency. ISBN Users' Manual. URL: [https://www.isbn-international.org/sites/default/files/ISBN; International Users Manual-7th edition\\_absolutely\\_final.docx](https://www.isbn-international.org/sites/default/files/ISBN%20Users%20Manual-7th%20edition_absolutely_final.docx).
3. International ISMN Agency. ISMN Users' Manual URL: [https://www.ismn-international.org/files/Web\\_ISMN\\_Users\\_Manual\\_2016.pdf](https://www.ismn-international.org/files/Web_ISMN_Users_Manual_2016.pdf).
4. Library of Congress. MARC 21. International Standard Book Number. URL: <https://www.loc.gov/marc/bibliographic/bd020.html>.
5. Книжкова палата. ISBN/ISMN URL: <http://www.ukrbook.net/agentstvo.html>.
6. Library of Congress. Use of ISBNs and LCCNs in MARC 21 Bibliographic Records. URL: <https://www.loc.gov/marc/marbi/2004/2004-dp04.html>.
7. Електронний каталог бібліотеки ім. Тараса Шевченка для дітей (публічні бібліотеки для дітей м. Києва). URL: <http://zra.kiev.ua:8081/MarcWeb>.
8. Електронний каталог бібліотеки ім. Лесі Українки (публічні бібліотеки для дорослих м. Києва). URL: <http://ecatalog.kiev.ua>.
9. Українська бібліотечна енциклопедія. Міжнародний стандартний номер книги URL: [https://ube.nlu.org.ua/article/Міжнародний стандартний номер книги \(ISBN = International Standard Book Number\)](https://ube.nlu.org.ua/article/Міжнародний_стандартний_номер_книги_(ISBN_%3D_International_Standard_Book_Number)).
10. International ISBN Agency. ISBN Ranges. URL: [https://www.isbn-international.org/range\\_file\\_generation](https://www.isbn-international.org/range_file_generation).
11. Library of Congress. LC Plan to Accommodate 13-Digit ISBN. URL: <https://www.loc.gov/cds/notices/notisbn13.html>.

### Petrenko M.V. RESEARCH OF FEATURES OF THE "ISBN" FIELD AND THEIR INFLUENCE ON USE IN THE PROCESSES OF BIBLIOGRAPHICAL DATA PROCESSING

*The article is devoted to the consideration of the international book number ISBN as an integral part of the bibliographic record and bibliographic database in the context of the processes of quality improvement and integration of bibliographic data.*

*Today, the current processes of creating consolidated electronic catalogues of libraries and improving the quality of data stored in them. To ensure a sufficient level of quality of consolidated directories, it is necessary to develop, justify and test methods of data preparation and processing.*

*ISBN is an important part of the bibliographic record and in addition to uniqueness contains encoded additional information. Using this information can bring many benefits. But for this it is necessary to understand all the nuances of ISBN as a theoretical plan and the features of its application in real bibliographic databases.*

*The article describes the results of the study of quantitative and qualitative indicators of the ISBN data field on the basis of real data of the 141st public library of Kyiv, obtained from two different sources.*

*The features of the field, both common and different for both bibliographic databases, are noted. An assessment of the processes of restoring the structure of the ISBN on the basis of rules. The potential of using the ISBN field in the processes of integration of heterogeneous bibliographic data is estimated. ISBN standardization is proposed and its effect is evaluated. Describes a problem with ISBN rules that needs to be clarified at the ISBN level. The dynamics of changes in ISBN prevalence is estimated and explained. Much attention is paid to ISBN duplicates and the association of the number of duplicates and unique ISBN entries with errors and data presentation formats. ISBN errors, their structure and causes are analyzed.*

*The obtained results will allow to build a strategy for processing the studied field of bibliographic data in order to achieve better results in the tasks of data purification, standardization and integration.*

**Key words:** *ISBN, ISBN structure, ISBN standardization, bibliographic data, deduplication, input errors.*



УДК 004.02:681.5

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/20>**Петросян А.Р.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Петросян Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Підтиченко О.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## ОПТИМІЗАЦІЯ МОДЕЛІ ПІД-РЕГУЛЯТОРА НА БАЗІ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРУ

*Завдання ефективного управління технологічними процесами, робототехнічними системами, літальними апаратами та іншими технічними засобами залишається актуальним для багатьох галузей промисловості. З цією метою в багатьох сферах техніки використовують ПІД-регулятори.*

*Налаштування ПІД-регуляторів може бути здійснено кількома способами, в тому числі параметри регулятора можуть бути отримані в аналітичній формі. Однак більшість цих методів розроблені для аналогового ПІД-регулятора. Модель цифрового ПІД-регулятора не повністю відповідає аналоговому ПІД-регулятору, тому методи розрахунку параметрів аналогового ПІД-регулятора не завжди можуть бути використані. Основна похибка спостерігається у диференціюючій складовій частині на верхніх частотах, тобто там, де він повинен виконувати свою функцію.*

*Впровадження сучасної елементної бази вносить корективи до всіх сфер науки і техніки (в тому числі й до алгоритмів систем управління). Не став винятком і ПІД-регулятор. В основу нової моделі регулятора покладено методи цифрової фільтрації. Як фільтруючий пристрій запропоновано використати КІХ-фільтр із лінійною фазою. Це дало змогу досить точно апроксимувати диференціюючий складник. Так, для класичного цифрового ПІД-регулятора введенням одного коефіцієнта вдалося знизити відносну похибку АЧХ вдвічі.*

*Для оптимізації коефіцієнтів фільтру використано метод найменших квадратів. Результати моделювання були проведені з використанням мови програмування Python. Були проаналізовані параметри ПІД-регулятора для всіх цифрових фільтрів до 15 порядку (до 8 незалежних коефіцієнтів). Аналіз показав, що для більшості завдань систем управління досить використати фільтри з 4–6 незалежними коефіцієнтами.*

*Перспективи подальших досліджень полягають у тестуванні запропонованого методу на більш широкому спектрі завдань, пошуку інших методів оптимізації, дослідженні ефектів кінцевої розрядності, аналізі структури ПІД-регулятора.*

**Ключові слова:** ПІД-регулятор, цифровий фільтр, метод найменших квадратів.

**Постановка проблеми.** Завдання ефективного управління технологічними процесами, робототехнічними системами, літальними апаратами та іншими технічними засобами залишається актуальним для багатьох галузей промисловості. З цією метою в багатьох сферах техніки використовують ПІД-регулятори [1].

В останні роки роль і значення обчислювальної техніки в житті сучасного суспільства різко збільшилася і постійно продовжують рости, тому сучасні технічні засоби реалізуються здебільшого на базі мікропроцесорів і мікроконтролерів, а більшість рішень задач адаптують для роботи в цифрових пристроях.

Налаштування ПІД-регуляторів може бути здійснено кількома способами, в тому числі пара-

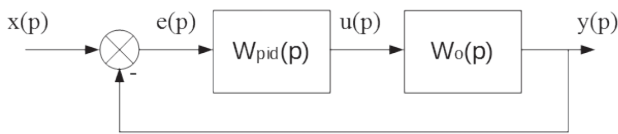
метри регулятора можуть бути отримані в аналітичній формі [1–4]. Однак більшість цих методів розроблені для аналогового ПІД-регулятора і не підходять для цифрового, тому що його модель не зовсім точно відповідає ПІД-регулятору, і, відповідно, оптимізація моделі цифрового ПІД-регулятора є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У загальному вигляді система управління будь-яким об'єктом має вигляд, наведений на рис. 1.

Алгоритм управління об'єктом у часовій області реалізується відповідно до виразу (1) [1]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (1)$$

де  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  – коефіцієнти ПІД-регулятора.



**Рис. 1. Система управління об'єктом:**  
 $W_{pid}(p)$  – передаточна функція ПІД-регулятора,  
 $W_o(p)$  – передаточна функція об'єкта управління,  
 $x(p), y(p), e(p), u(p)$  – вхідна дія,  
 вихідний сигнал, сигнал неузгодженості,  
 керуючий сигнал відповідно

ПІД-регулятор включає три складові частини: пропорційну, інтегруючу та диференціюючу. Пропорційна складова частина формує керуючий сигнал, який протидіє відхиленню (неузгодженості) вихідного сигналу від заданого значення. Чим більше неузгодженість, тим більший вплив на об'єкт управління. Якщо вихідний сигнал дорівнює заданому значенню, то сигнал неузгодженості дорівнює нулю, а отже, керуючий вплив пропорційної складової частини дорівнює нулю. Інтегруюча складова частина використовується для усунення статичної похибки. Диференціююча складова частина враховує швидкість зміни вихідного сигналу, що дозволяє отримати більш якісне управління об'єктом за рахунок прогнозування вихідної величини сигналу [1].

Існує кілька груп оцінки показників якості управління об'єктом: прямі, кореневі, частотні, інтегральні. На практиці найбільше застосування знайшли прямі показники якості. Це пов'язано з тим, що прямі показники якості управління об'єктом визначаються безпосередньо за перехідною характеристикою. Вибір показників якості регулювання залежить від задачі, в якій використовується ПІД-регулятор.

Для забезпечення необхідних показників якості регулювання необхідно розрахувати коефіцієнти ПІД-регулятора. Один із перших методів розрахунку параметрів ПІД-регуляторів запропонували Ziegler J. і Nichols N. [2, 3]. Ця методика дає не дуже гарні результати, проте дуже проста, тому досі часто використовується на практиці. Після розрахунку параметрів регулятора потрібно вручну підлаштувати їх для поліпшення якості регулювання.

У роботі [3] також розглянуто інші методи розрахунку параметрів ПІД-регуляторів, а саме: Чину-Хронеса-Ресвіка, Куна. Широко застосовуються релейні методи [4].

Якщо розглянуті методи розроблені відносно давно, то нижчезикладені методи – досить недавно.

У роботі [5, 6] розглянуті методи оптимізації параметрів ПІД-регулятора з використанням генетичного алгоритму. У цих роботах аналізується вибір: фітнес-функції, основних операторів генетичного алгоритму, показників якості.

У роботі [7] розглянуто можливість застосування нейронних мереж для оптимізації коефіцієнтів ПІД-регулятора. Основний акцент у статті робиться на аналізі стабільності таких систем.

Багато робіт пов'язані з визначенням оптимальних параметрів ПІД-регулятора під конкретні об'єкти управління [6–8].

Велика кількість робіт пов'язана з розробленням цифрового ПІД-регулятора [9–13]. Однак усі наведені статті можна розбити на дві групи.

Перша група робіт спирається на вираз (2), наведений в [9–11]:

$$u(n) = K_p e(n) + K_{id} \sum_{k=0}^n e(k) + K_{dd} (e(n) - e(n-1)), \quad (2)$$

де  $T_k$  – період дискретизації,  $K_{id} = K_i T_k$ ,  $K_{dd} = K_d / T_k$ .

Друга група робіт спирається на вираз (3), наведений в [12, 13]:

$$u(n) = u(n-1) + K_1 e(n) + K_2 e(n-1) + K_3 e(n-2), \quad (3)$$

де  $K_1 = K_p + K_i + K_d$ ,  $K_2 = -K_p - 2K_d$ ,  $K_3 = K_d$ .

Аналіз показав, що вирази (2) і (3) практично ідентичні. Основна відмінність між ними полягає в тому, що вираз (2) дозволяє визначити коефіцієнти цифрового ПІД-регулятора по аналоговому прототипу. За виразом (3) коефіцієнти  $K_1, K_2, K_3$  необхідно підбирати при ручному налаштуванні системи управління, тому що в них не врахована частота дискретизації.

З урахуванням вищесказаного впливає, що цифровий та аналоговий ПІД-регулятори не розглядаються як різні сутності, тому методи розрахунку коефіцієнтів регулятора розглядаються незалежно від того, цифровий він чи аналоговий. Однак, як показав аналіз, існує як мінімум дві реалізації цифрового ПІД-регулятора, тому методи розрахунку повинні враховувати його структуру. Крім того, як далі буде показано, цифровий регулятор не є повним аналогом класичного аналогового ПІД-регулятора. Таким чином, задача оптимізації моделі цифрового ПІД-регулятора є актуальною.

**Постановка завдання.** Метою роботи є уточнення моделі цифрового ПІД-регулятора за рахунок використання цифрового фільтру.

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: провести аналіз цифрових фільтрів; запропонувати тип фільтру для ПІД-регулятора; вибрати фітнес-функцію

для оптимізації коефіцієнтів фільтру; розрахувати коефіцієнти фільтру для моделі ПД-регулятора; зробити висновки з отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

Виконаємо перехід від часової області в частотну область представлення ПД-регулятора. Для цього необхідно виконати перетворення Лапласа для виразу (1), а потім виконати заміну оператора Лапласа  $p = j\omega$ . В результаті отримуємо вираз для частотної характеристики аналогового ПД-регулятора (4):

$$W_A(\omega) = K_p - K_i \frac{j}{\omega} + jK_d\omega, \quad (4)$$

де  $\omega$  – кругова частота.

Розглянемо амплітудно-частотну характеристику (АЧХ) регулятора при  $K_p = 10, K_i = 1, K_d = 1$  (рис. 2).

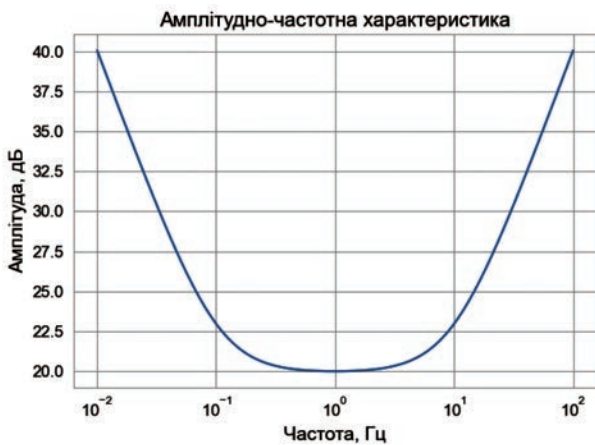


Рис. 2. Зовнішній вигляд АЧХ ПД-регулятора

АЧХ аналогового ПД-регулятора показує, що в області нижніх частот впливає інтегруюча складова частина, а в області верхніх частот – диференціююча.

А тепер порівняємо АЧХ диференціюючих складових частин аналогового і цифрового ПД-регуляторів.

Спочатку запишемо АЧХ диференціюючої складової аналогового ПД-регулятора. З формули (4) видно, що його АЧХ визначається виразом (5):

$$D_A(\omega) = K_d\omega. \quad (5)$$

Якщо виконати аналогічні перетворення, то можемо записати АЧХ диференціюючої складової частини цифрового ПД-регулятора (6):

$$D_{Ц}(\omega) = 2K_{dd} \sin\left(\frac{\omega T_k}{2}\right). \quad (6)$$

На рис. 3 показані АЧХ обох регуляторів. Для зручності порівняння частоти нормалізовані (частота дискретизації прийнята рівною одиниці), а коефіцієнти прийняті рівними  $K_d = K_{dd} = 1$ .

Очевидно, що АЧХ диференціюючих складових частин аналогового і цифрового ПД-регуляторів не збігаються. На рис. 4 показана відносна похибка. Як видно з рисунка, максимальна похибка становить понад 35%.

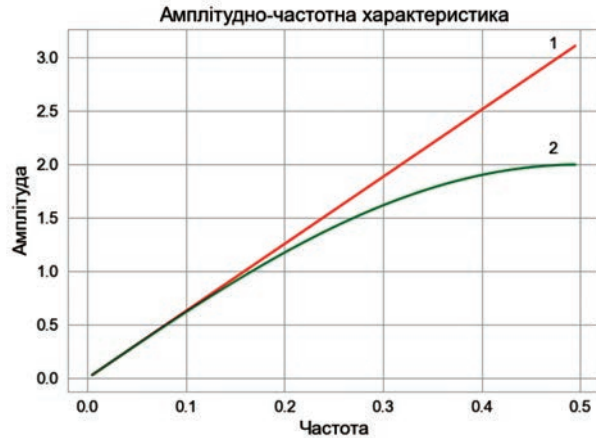


Рис. 3. АЧХ диференціюючих складових частин ПД-регуляторів: 1 – аналогового; 2 – цифрового

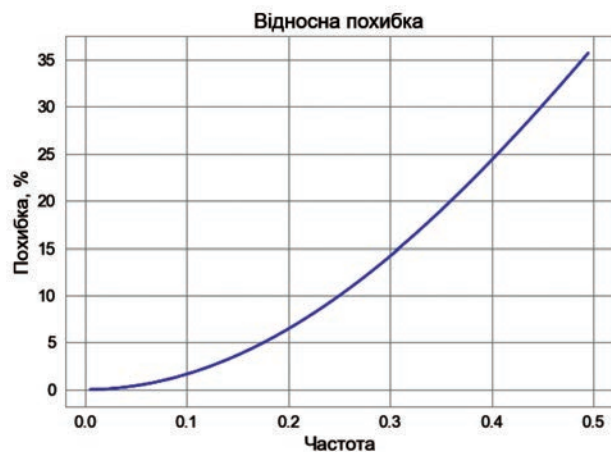


Рис. 4. Відносна похибка диференціюючої складової частини АЧХ цифрового ПД-регулятора

Для усунення цього недоліку необхідно задатися новою моделлю ПД-регулятора. Одним із варіантів є використання методів цифрової обробки, а саме використання цифрового фільтра.

Фільтрація – найбільш поширена задача цифрової обробки, яка реалізується з використанням цифрових фільтрів: фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри); фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ-фільтри).

До основних операцій фільтрації інформації відносяться: зменшення шуму, операції згладжування, прогнозування, диференціювання, а також розділення сигналів тощо [14].

У загальному випадку цифровий нерекурсивний фільтр описується таким виразом (7):

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot x(n-k), \quad (7)$$

де  $h(k)$  – коефіцієнти фільтра (імпульсна характеристика).

АЧХ такого фільтра буде мати такий вигляд (8):

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot e^{-j\omega n}. \quad (8)$$

У багатьох додатках цифрової обробки сигналів найкраще використовувати КІХ-фільтри, тому що вони мають такі переваги, як:

- групова затримка фільтра постійна (КІХ-фільтри з лінійною фазою);
- КІХ-фільтри завжди стійкі.

Для того, щоб КІХ-фільтр був із лінійною фазою, необхідно, щоб імпульсна характеристика була симетричною або антисиметричною. В цьому разі можливо чотири типи КІХ-фільтрів [14]. Фільтри III і IV типів мають уявну частину частотної характеристики, тому можуть бути використані в ролі диференціюючої складової частини. Однак фільтр III типу не завжди може застосовуватися як такий. Причина в тому, що значення коефіцієнта передачі на максимальній частоті дорівнюватиме нулю  $H(\omega_{max}) = 0$  незалежно від коефіцієнтів фільтра (7). Такий фільтр може використовуватися як диференціюючий тільки на початковій ділянці. Оскільки нам необхідно використовувати весь діапазон, то для нашої задачі кращим рішенням буде скористатися фільтром IV типу.

З виразу (7) випливає, що диференціююча складова частина для цифрового ПД-регулятора може бути представлена у вигляді виразу (9):

$$y(n) = \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \cdot (x(n-l) - x(n+l-2L+1)), \quad (9)$$

де  $L$  – кількість незалежних коефіцієнтів.

У цьому разі, з огляду на (2), алгоритм реалізації цифрового ПД-регулятора буде описуватися виразом (10):

$$u(n) = K_p e(n) + K_{id} \sum_{k=0}^n e(k) + K_{dd} \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \cdot (e(n-l) - e(n+l-2L+1)). \quad (10)$$

Надалі для простоти будемо називати його ППД. Для зменшення обчислювальних витрат вираз (10) можна записати в такому вигляді (11):

$$u(n) = K_p e(n) + I(n) + K_{dd} \sum_{l=0}^{L-1} h(l) \cdot (e(n-l) - e(n+l-2L+1)). \quad (11)$$

де  $I(n) = I(n-1) + K_{id} e(n)$  – інтегруюча складова частина.

Для отримання остаточної моделі ППД-регулятора необхідно визначити коефіцієнти фільтра  $h(l)$ , де  $l = 1, 2, 3, \dots, L-1$ . Для синтезу фільтра (9) необхідна фітнес-функція. Синтез фільтра буде виконуватися з використанням методу найменших квадратів (12):

$$e = \int_0^\pi W(\omega) (H(\omega) - \hat{H}(\omega))^2 d\omega \rightarrow \min, \quad (12)$$

де  $H(\omega)$ ,  $\hat{H}(\omega)$  – АЧХ апроксимованого й апроксимуючого фільтрів відповідно;  $W(\omega) = a\omega + b$  – вагова функція;  $a, b$  – коефіцієнти вагової функції.

Як АЧХ апроксимованого фільтра буде виступати АЧХ диференціюючої складової частини аналогового ПД-фільтра (5) при  $K_d = 1$  (рис. 3, графік 1).

Для обчислення цифрового фільтра була реалізована програма на мові програмування Python. На рис. 5 наведені результати синтезу диференціюючої складової частини ППД-регулятора. У табл. 1 наведені розраховані коефіцієнти фільтрів різного порядку, а також вказана похибка апроксимації диференціюючої складової частини ППД-регулятора.

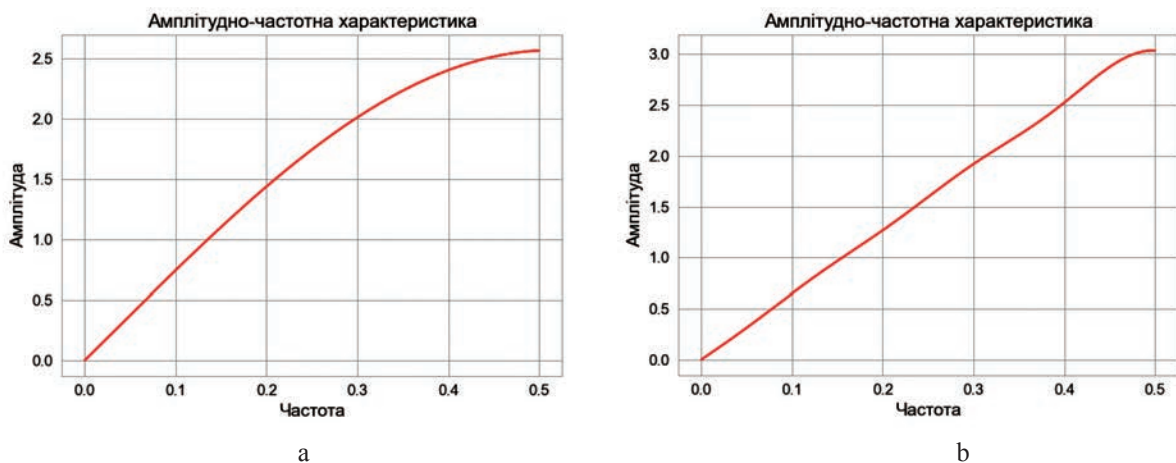


Рис. 5. АЧХ диференціюючої складової частини ППД-регулятора: а)  $L=1$ ; б)  $L=6$

Коефіцієнти КІХ-фільтра для розробленої моделі цифрового ПІД-регулятора

$L$	$h(l)$	Error, %
1	1.27850625	18.61
2	-0.13897425, 1.27275787	10.13
3	0.05145017, -0.14162243, 1.27340767	6.64
4	-0.02575393, 0.05096566, -0.14150234, 1.27328925	5.05
5	0.01589056, -0.02605942, 0.05100875, -0.14154174, 1.27331104	4.01
6	-0.01048371, 0.01575979, -0.02602363, 0.05097624, -0.14151715, 1.27328708	3.36
7	0.00762269, -0.01057292, 0.0157707, -0.02603239, 0.05097792, -0.14151841, 1.27328701	2.87
8	-0.00565988, 0.0075685, -0.01055653, 0.01575625, -0.02602145, 0.05096753, -0.1415089, 1.27327763	2.51

Якщо порівняти запропоновану модель ПІД-регулятора при  $L=1$  з класичним цифровим ПІД-регулятором (2), то можна помітити, що вирази відрізняються тільки множителем  $h(0)$  (табл. 1). Однак завдяки йому похибку вдалося знизити майже вдвічі. Також із табл. 1 видно, що краще використовувати цифровий фільтр з 4 "  $L$ " 6, тому що подальше збільшення кількості коефіцієнтів не приводить до істотного збільшення точності.

**Висновки.** У роботі проведено розроблення моделі цифрового ПІД-регулятора з використанням цифрового фільтра. Основна похибка спостерігається у диференціюючої складової частини цифрового ПІД-регулятора.

У результаті аналізу цифрових фільтрів було запропоновано використати нерекурсивний цифровий фільтр із лінійною фазою. Існує чотири типи таких фільтрів. Для уточнення моделі цифрового ПІД-регулятора було запропоновано використати ІV тип фільтру.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру вибрано метод найменших квадратів. Результати розрахунку коефіцієнтів фільтру показали, що при кількості коефіцієнтів, рівній одному (як у класичній моделі цифрового ПІД-регулятора), відносна похибка зменшується майже вдвічі. Однак використання кількості коефіцієнтів більше шести недоцільно.

#### Список літератури:

1. Самотокін Б.Б. Лекції з теорії автоматичного керування: навч. посібник. Житомир: ЖІТІ, 2001. 508 с.
2. Ziegler J.G., Nichols N.B. Optimum settings for automatic controllers. Transactions of the ASME, 1942. Vol. 64. P. 759–768.
3. Миллер Ю.В., Саблина Г.В. Расчёт параметров ПИД-регулятора. Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1. С. 148–153.
4. Åström K.J.; Hägglund T. Automatic Tuning of Simple Regulators. IFAC Proceedings volumes. 1984. № 17(2). P. 1867–1872. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1474-6670\(17\)61248-5](https://doi.org/10.1016/S1474-6670(17)61248-5).
5. Mirzal A., Yoshii S., Furukawa M. PID Parameters optimization by using genetic algorithm. URL: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1204/1204.0885.pdf>. (дата звернення: 10.05.2021).
6. Jayachitra A., Vinodha R. Genetic algorithm based PID controller tuning approach for continuous stirred tank reactor. Advances in Artificial Intelligence. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/791230>.
7. Kadua C.B., Patil C.Y.. Design and implementation of stable PID controller for interacting levelcontrol system. Procedia Computer Science. Volume 79. 2016. P. 737–746. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2016.03.097>.
8. Кузьменко М.Ю., Егоров А.П. Математическая модель системы управления тепловым агрегатом с типовыми промышленными регуляторами. Збірник наукових праць Національного гірничого університету. 2011. № 36(1). С. 106–110.
9. Franklin G.F., Powell J.D., Workman M.L. Digital control of dynamic systems, 2nd ed. Addison-Wesley, 1990. 841 p.
10. Baikar P.M. Design of PID controller based information collecting robot in agricultural field. International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering. Vol. 3, issue 8. 2014. DOI: <https://doi.org/10.15662/ijareeie.2014.0308016>.
11. Hou D. PID control on PIC16F161X by using a PID Peripheral. Microchip Technology Inc. TB3136. 2015. URL: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/90003136A.pdf>. (дата звернення: 10.05.2021).

12. Maghsadgh A. Implementation of PID controller by microcontroller of PIC (18 Series) and controlling the height of liquid in sources. *Adv. Robot Autom.* Vol. 5. 2016. P. 156–159. DOI: <https://doi.org/10.4172/2168-9695.1000156>.
13. Masade S., Parmar S., Bhanushali A., Speed control for brushless DC motors using PID algorithm. *Einfochips*. URL: <https://www.einfochips.com/images/partners/xilinx/Speed-Control-for-Brushless-DC-Motor-Using-PID-Algorithm.pdf>. (дата звернення: 10.05.2021).
14. Proakis J., Manolakis D. *Digital Signal Processing*, 4th Edition. London: Pearson, 2013. 1019 p.

**Petrosian A.R., Petrosian R.V., Pidtychenko O.V. OPTIMIZATION OF THE PID CONTROLLER MODEL BASED ON A DIGITAL FILTER**

*The task of efficient management of technological processes, robotic systems, aircraft and other technical means remains relevant to many industries. For this purpose, in many areas of technology, PID controllers are used.*

*Configuring PID controllers can be accomplished in several ways, including the regulator parameters can be obtained in an analytical form. However, most of these methods are designed for an analog PID controller. The digital PID controller model does not fully correspond to the analog PID controller, so methods for calculating the parameters of an analog PID controller can not always be used. The main error is observed in the differentiation component in the upper frequencies, that is, where it must perform its function.*

*Implementation of a modern element base makes adjustments to all spheres of science and technology (including algorithms of control systems). Did not make an exception and a PID controller. The basis of a new model of the regulator is the methods of digital filtration. As a filter device, a FIR filter with a linear phase is used. This allowed accurately to approximate a differentiating component. Thus, for a classic digital PID controller, the introduction of one coefficient managed to reduce the relative error of the amplitude response twice.*

*The least squares method is used to optimize the filter coefficients. The results of modeling were conducted using Python programming language. The parameters of the PID controller for all digital filters to 15 order (up to 8 independent coefficients) were analyzed. The analysis showed that for most of the tasks of control systems, it is enough to use filters with 4–6 independent coefficients.*

*Prospects for further research are testing the proposed method on a broader spectrum of tasks, the search for other methods of optimization, studying the effects of finite bit depth, analysis of the structure of the PID controller.*

**Key words:** *PID controller, digital filter, least squares method.*

**Петросян Р.В.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

**Колос К.Р.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

## СИНТЕЗ ЦИФРОВОГО ФІЛЬТРА СИМЕТРИЧНИХ СКЛАДНИКІВ НА БАЗІ ГЕНЕТИЧНОГО АЛГОРИТМУ

Трифазна система передачі електроенергії набула великого поширення. Однак система добре функціонує лише тоді, коли вона симетрична. Однією з головних причин порушення симетричності є застосування таких навантажень, симетричне виконання і режими роботи яких неможливе або недоцільне за конструктивним, технологічним або економічним міркуванням. Тому важливе значення має контроль якості електроенергії. Існує досить велика кількість показників якості електроенергії, але в цій статті розглядаються такі показники, як: коефіцієнт несиметрії напруги за зворотною послідовністю; коефіцієнт несиметрії напруги за нульовою послідовністю.

Впровадження сучасної елементної бази вносить корективи до всіх сфер науки і техніки (в тому числі й до енергетики). В основу методу симетричних складників покладено цифровий фільтр. Як фільтруючий пристрій запропоновано використати КІХ-фільтр з лінійною фазою (I та II типу). Це дозволило досить точно апроксимувати три вектори повороту.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру використано генетичний алгоритм. Генетичний алгоритм – евристичний алгоритм, що є різновидом еволюційних алгоритмів, за допомогою яких вирішуються оптимізаційні задачі з використанням методів природної еволюції, аналогічних природному відбору у природі. Цей алгоритм дозволяє виконувати багатокритеріальну оптимізацію, яка використана під час синтезу фільтрів (необхідно було мінімізувати як амплітудно-частотну характеристику, так і фазо-частотну). Як фітнес-функцію використано чебишевську норму. Моделювання було проведено з використанням мови програмування Python. Результати показали, що отримано досить непогані показники.

Перспективи подальших досліджень полягають у тестуванні запропонованого методу на більш широкому спектрі задач, пошуку інших методів оптимізації, дослідженні ефектів кінцевої розрядності, аналізі структури цифрового фільтру симетричних складників.

**Ключові слова:** фільтр симетричних складників, цифровий фільтр, генетичний алгоритм, чебишевська норма.

**Постановка проблеми.** У кінці минулого століття була запропонована трифазна система передачі електроенергії, яка набула великого поширення. Однак система добре функціонує лише тоді, коли вона симетрична. Однією з головних причин порушення симетричності є застосування таких навантажень, симетричне виконання і режими роботи яких неможливі або недоцільні за конструктивним, технологічним або економічним міркуванням. Тому важливе значення має контроль якості електроенергії.

В останні роки значення обчислювальної техніки в житті сучасного суспільства різко збільшилося, тому більшість методів адаптують, використовуючи цифрові методи обробки. Цифрова обробка використовується в багатьох сферах техніки: системах управління технологічними процесами, медичному діагностичному обладнанні,

засобах зв'язку, вимірювальних і діагностичних засобах енергетики тощо [1, 2].

Аналіз показників якості електроенергії здійснюється під час обліку споживаної електроенергії [3], під час регулювання несиметричних режимів у системах електропостачання [4], в релейному захисті енергетичних систем [5] тощо. Безперервне збільшення попиту на енергоресурси і зростання цін на них зобов'язує до підвищеного контролю за їхніми витратами та якістю [6, 7]. Також в Україні взято курс на діджиталізацію, в тому числі і в енергетиці [8], тому розроблення цифрового фільтру симетричних складників є актуальною.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для аналізу несиметричності трифазної системи використовується метод симетричних складників [9, 10]. Цей метод заснований на уявленні

асиметричної трифазної системи у вигляді суми трьох симетричних систем.

Несиметрія напруги характеризується такими показниками, як:

– коефіцієнт несиметрії напруг за зворотною послідовністю;

– коефіцієнт несиметрії напруг за нульовою послідовністю.

Відповідно до державного стандарту [11] ці коефіцієнти визначаються за такими виразами (1) та (2):

$$k_2 = \frac{U_{2(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (1)$$

$$k_0 = \frac{U_{0(1)}}{U_{1(1)}} \cdot 100\%, \quad (2)$$

де  $U_{1(1)}$ ,  $U_{2(1)}$ ,  $U_{0(1)}$  – діючі значення напруги прямої (НПП), зворотної (НЗП) та нульової послідовності (ННП) основної частоти; допускається вважати  $U_{1(1)} = U_n$ .

Спочатку в перших пристроях контролю показників якості електроенергії найбільше поширення знайшли фільтри симетричних складників (ФСС), які побудовані на базі аналогових дискретних елементів [12, 13]. Вплив на результати вимірювань настроювання ФСС, зміна параметрів його елементів при старінні та зміні температури навколишнього середовища, зміна загального рівня напруги, а також вплив вищих гармонік та відхилення частоти напруги електричної мережі від номінального значення вимагало вдосконалення методів вимірювання симетричних складників. Для підвищення метрологічних характеристик засобів вимірювання вводилися різні коригувальні та компенсуючі кола [12], що призводило до суттєвого ускладнення реалізації приладів цього класу.

Також було розроблено безліч цифрових методів вимірювання симетричних складників. Серед них можна виділити такі групи методів:

- 1) встановлений державним стандартом;
- 2) на базі цифрової обробки;
- 3) заміна вектора повороту часовою затримкою;
- 4) змішаний.

Розглянемо деякі цифрові методи більш докладно по групах. У [11] запропоновано НЗП розраховувати за формулою (3):

$$U_{2(1)} = \sqrt{\frac{1}{12} \left[ \left( \sqrt{3}U_{BA(1)} - \sqrt{4U_{CB(1)}^2 - \left( \frac{U_{CB(1)}^2 - U_{AC(1)}^2}{U_{BA(1)}} + U_{BA(1)} \right)^2} \right)^2 + 1 \right]}, \quad (3)$$

де  $U_{BA(1)}$ ,  $U_{CB(1)}$ ,  $U_{AC(1)}$  – лінійні напруги основної частоти.

Подібні вирази мають НПП та ННП. Для розрахунку (3) необхідно спочатку розрахувати лінійні напруги, використовуючи швидке

перетворення Фур'є. Досить громіздке рішення задачі, особливо якщо необхідно обчислити тільки несиметрію в трифазній мережі.

Досить цікавий підхід [14] запропонований для обчислення НВП, НЗП, ННП. Суть методу полягає в попередньому обчисленні квадратурних складників. По суті цей метод відноситься до кореляційного методу з його перевагами та недоліками, що впливають звідси.

У роботі [15] запропонований метод на базі цифрових фільтрів (рис. 1, рис. 2, рис. 3). Суть полягає в тому, що вони використовуються як оператори повороту. Такий підхід дозволяє підвищити швидкодію вимірювань, що позитивно позначиться в аварійних режимах.

У [13] запропоновано метод, в якому вектор повороту реалізований з використанням програмних затримок (затримка на третину і дві третини періоду). Такий підхід дуже простий в реалізації, але не враховує впливу вищих гармонік та коливань напруги.

У роботі [16] запропоновано змішаний підхід, суть якого в тому, що виконують аналогову фільтрацію фільтром симетричних складників із постобробкою (цифровим виділенням основної гармоніки напруги). Такий метод має всі недоліки, які присутні аналоговим методам.

Аналізуючи цифрові методи вимірювання симетричних складників, можна відзначити, що для обчислення симетричних складників необхідно або вводити частотну корекцію в існуючі методи, або використовувати методи, які інваріантні до відхилення частоти напруги мережі.

Кожен із методів розроблявся з урахуванням властивостей, які мають перетворення Фур'є, кореляційна функція та часова затримка сигналу. Однак усі зазначені методи є частотнозалежними, за виключенням методу [15], тому подальше вдосконалення методу симетричних складників на базі цифрових фільтрів є актуальною задачею.

**Постановка завдання.** Метою роботи є подальше вдосконалення методу симетричних складників на базі цифрових фільтрів (ЦФ).

Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: провести аналіз цифрових фільтрів; запропонувати тип фільтру для ФСС; обрати фітнес-функцію для оптимізації коефіцієнтів фільтру; розрахувати коефіцієнти ФСС; зробити висновки з отриманих результатів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Цифрова обробка у загальному вигляді виконується відповідно до структурної схеми (рис. 4):



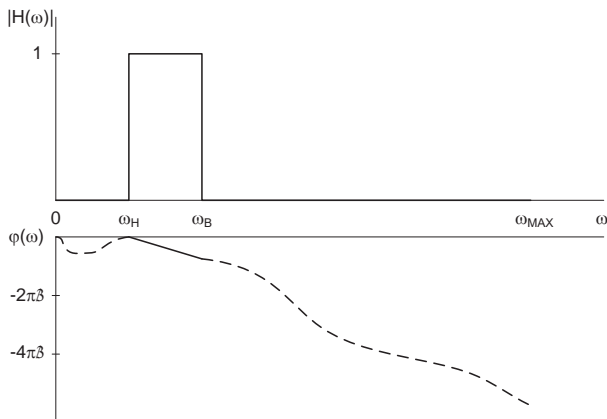


Рис. 1. Частотна характеристика вектора повороту  $a^0=1$  на базі фільтра

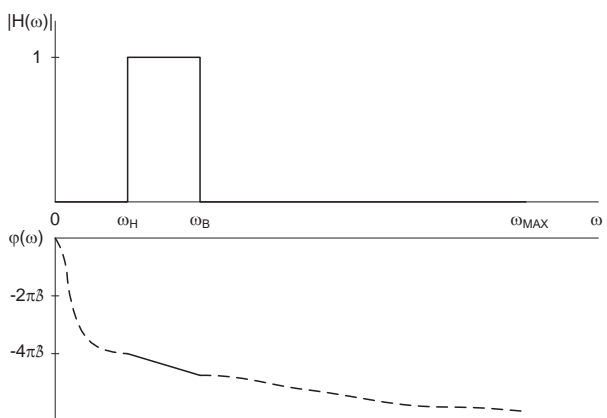


Рис. 2. Частотна характеристика вектора повороту  $a^1=a$  на базі фільтра

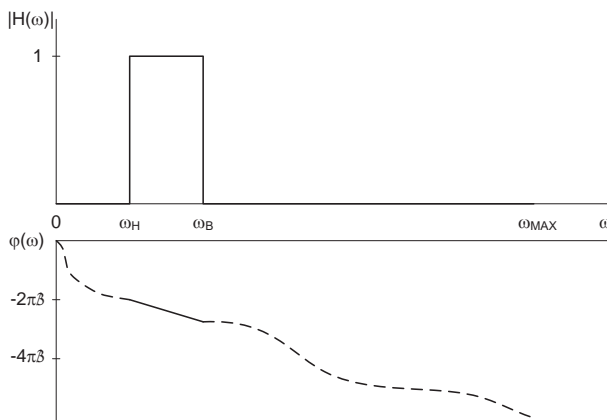


Рис. 3. Частотна характеристика вектора повороту  $a^2$  на базі фільтра

Робота схеми полягає в тому, щоб усунути накладення спектра при цифровій обробці з використанням фільтра ААФ, оцифрувати аналоговий сигнал з використанням АСД і обробити отримані дані в модулі DSP відповідно до заданого алгоритму. У разі необхідності сформувати вихідний аналоговий сигнал з використанням АСД.

У цьому разі метод симетричних складників на базі цифрових фільтрів можна записати виразами (4)–(6):

$$3U_{1(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^1(z) + U_{C(i)}(z)H^2(z), \quad (4)$$

$$3U_{2(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^2(z) + U_{C(i)}(z)H^1(z), \quad (5)$$

$$3U_{0(i)}(z) = U_{A(i)}(z)H^0(z) + U_{B(i)}(z)H^0(z) + U_{C(i)}(z)H^0(z), \quad (6)$$

де  $U_{A(i)}(z), U_{B(i)}(z), U_{C(i)}(z)$  –  $z$ -перетворення послідовності вхідних відліків напруг фаз А, В, С основної частоти відповідно;  $H^0(z), H^1(z), H^2(z)$  –  $z$ -перетворення векторів повороту.

Алгоритм обчислення коефіцієнтів симетричних складників буде визначатися структурною схемою, представленою на рис. 5. Як видно з рисунка, для реалізації обчислення цих коефіцієнтів відповідно до виразів (4)–(6) необхідно використати п'ять ЦФ: три  $H^0(z)$  і по одному  $H^1(z), H^2(z)$ . Працює схема таким чином: на вхід надходять послідовності оцифрованих значень фаз А, В, С, які проходять через вказані фільтри. На виході суматорів буде послідовність симетричних складників: нульового та зворотного. На виході отримуємо шукані значення, обчислені відповідно до виразів (1), (2).

Таким чином, щоб реалізувати алгоритм, представлений схемою на рис. 5, необхідно синтезувати усі фільтри. Існують такі ЦФ [1, 2]: фільтри з кінцевою імпульсною характеристикою (КІХ-фільтри); фільтри з нескінченною імпульсною характеристикою (БІХ-фільтри).

У багатьох додатках цифрової обробки сигналів найкраще використовувати КІХ-фільтри, тому що вони мають такі переваги:

- групова затримка фільтра постійна (КІХ-фільтри з лінійною фазою);
- КІХ-фільтри завжди стійкі.

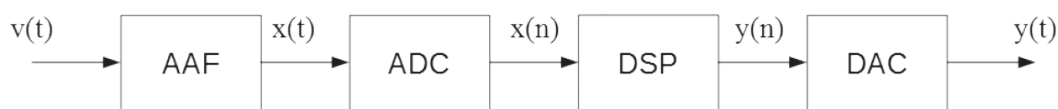


Рис. 4. Загальна структура системи ЦОС: ААФ – антиалайзінговий фільтр; АСД – аналого-цифровий перетворювач; DSP – цифровий процесор обробки сигналів; АСД – цифро-аналоговий перетворювач

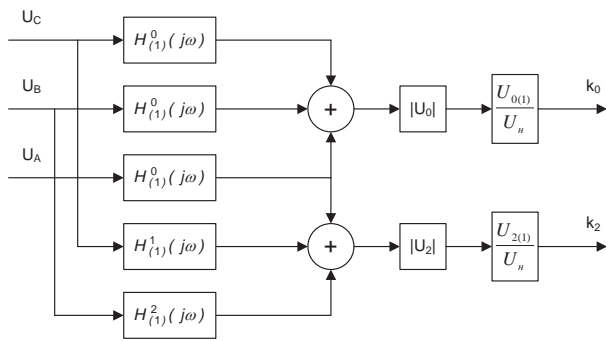


Рис. 5. Структурна схема вузла обчислення коефіцієнтів несиметрії з використанням ЦФ

У загальному випадку цифровий нерекурсивний фільтр описується таким виразом (7):

$$y(n) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot x(n-k), \quad (7)$$

де  $h(k)$  – коефіцієнти фільтра (імпульсна характеристика).

Амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) такого фільтра буде мати такий вигляд (8):

$$H(\omega) = \sum_{k=0}^{K-1} h(k) \cdot e^{-j\omega n}. \quad (8)$$

Для того, щоб КІХ-фільтр задовольняв вимогам реалізації векторів повороту, необхідно, щоб їхня фазо-частотна характеристика (ФЧХ) була лінійною із зсувом на  $120^\circ$  та  $240^\circ$ . Для цього необхідно, щоб імпульсна характеристика була симетричною або антисиметричною. У цьому разі можливо чотири типи КІХ-фільтрів [2]. Однак для нашої задачі можна використати фільтри I та II типів. Фільтри III і IV типів мають уявну частину частотної характеристики, тому не можуть бути використані. На жаль, ідеальну лінійну характеристику можна отримати тільки для одного фільтра (вектора повороту), тому необхідне застосування оптимізаційного методу для мінімізації похибки частотних характеристик при синтезі фільтрів.

Відомо безліч методів їх проектування в науковій літературі [1, 2]. Найбільш широко використовуються класичні методи розрахунку КІХ-фільтрів: метод зважування; метод частотної вибірки; метод найменших квадратів, метод найкращої рівномірної апроксимації. Тільки третій і четвертий методи відносяться до оптимізаційних методів. Однак у цьому разі синтез КІХ-фільтра будемо проводити з використанням генетичного алгоритму [17], тому що нам необхідно оптимізувати не тільки АЧХ, а й ФЧХ.

Генетичний алгоритм – евристичний алгоритм є різновидом еволюційних алгоритмів, за допомогою яких вирішуються оптимізаційні задачі з вико-

ристанням методів природної еволюції, аналогічних природному відбору в природі. Крім того, цей алгоритм дозволяє виконувати багатокритеріальну оптимізацію, що якраз необхідно в нашій задачі. Також у разі необхідності для збільшення швидкодії обчислень можна використати паралельні обчислення [18] під час синтезу фільтрів.

Під час вирішення задачі генетичним алгоритмом необхідно виділити фенотип, який визначає реальний об'єкт. У нашому разі в ролі фенотипу виступатимуть коефіцієнти фільтра, які будуть утворювати індивідуум (рис. 6).

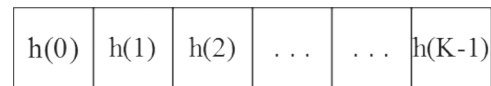


Рис. 6. Структура індивідуума

Для синтезу фільтра необхідна фітнес-функція. Синтез фільтрів будемо виконувати у вигляді задачі мінімізації зваженої чебишевської норми (9), (10):

$$e_1 = \max(W_1(\omega)|H(\omega) - \hat{H}(\omega)|) \rightarrow \min, \quad (9)$$

$$e_2 = \max(W_2(\omega)|\Phi(\omega) - \hat{\Phi}(\omega)|) \rightarrow \min, \quad (10)$$

де  $H(\omega)$ ,  $\hat{H}(\omega)$  – АЧХ апроксимованого та апроксимуючого фільтрів відповідно;  $\Phi(\omega)$ ,  $\hat{\Phi}(\omega)$  – ФЧХ апроксимованого та апроксимуючого фільтрів відповідно;  $W_1(\omega)$ ,  $W_2(\omega)$  – вагові функції.

Для обчислення ЦФ була реалізована програма на мові програмування Python. Для реалізації генетичного алгоритму необхідно налаштувати гіперпараметри. У нашому разі вони будуть мати такий вигляд:

```

POPULATION = 100 # кількість індивідуумів популяції
SURVIVOR = 0.2 # ймовірність виживання
MUTATION = 0.05 # ймовірність мутації індивідуума
GENERATIONS = 150 # максимальна кількість поколінь
    
```

Загальний вигляд пропонованого методу синтезу КІХ-фільтрів на базі генетичного алгоритму має вигляд:

1. Генерація початкової популяції.
2. Обчислення пристосованості хромосом.
3. Вибір вихідних хромосом (рішень) із найкращими значеннями пристосованості для створіння нової популяції.
4. Виконання операції схрещування.
5. Виконання операції мутації.
6. Якщо умову зупинки виконано, повертаємо хромосому з найкращим значенням пристосованості, а інакше переходимо до пункту 2 для обробки нової популяції.

Результати синтезу векторів повороту (КІХ-фільтрів 24 порядку) представлено на рис. 7, рис. 8, рис. 9.

Залежність пристосованості від популяції показана на рис. 10.

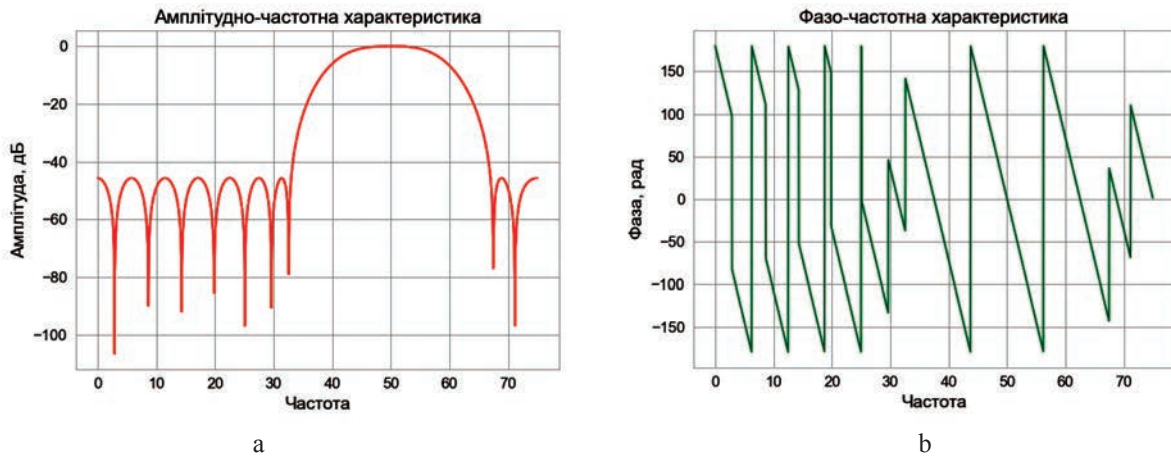


Рис. 7. Частотна характеристика вектора повороту  $H^0$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

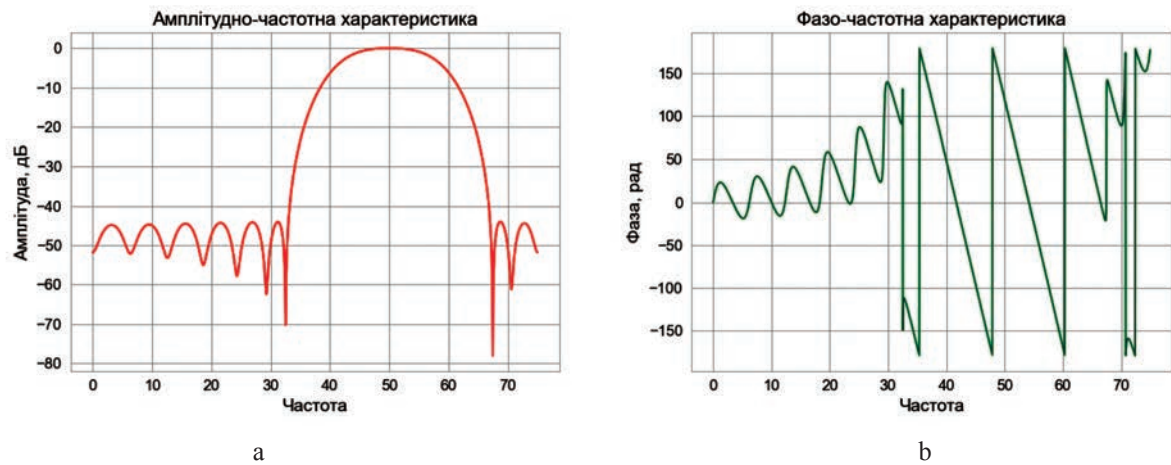


Рис. 8. Частотна характеристика вектора повороту  $H^1$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

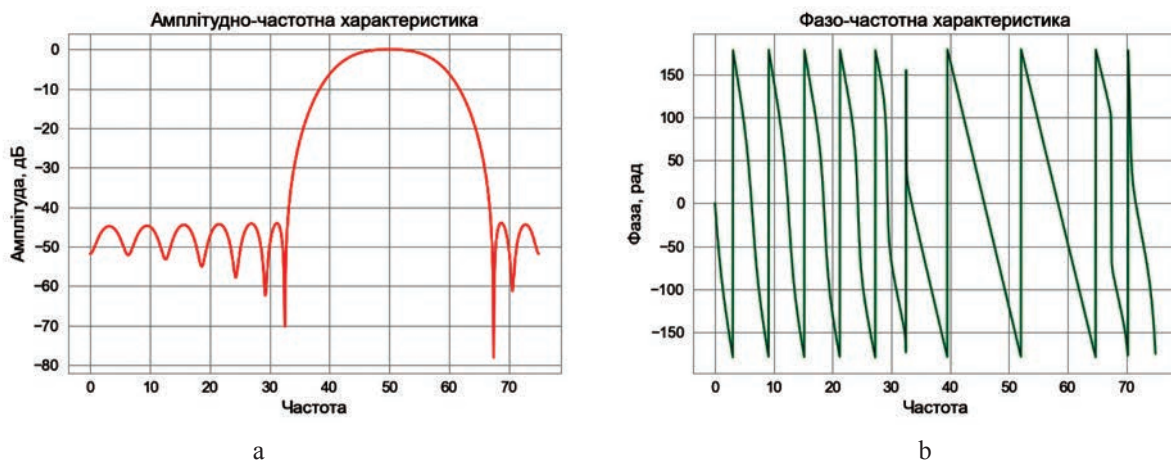


Рис. 9. Частотна характеристика вектора повороту  $H^2$ : а) АЧХ; б) ФЧХ

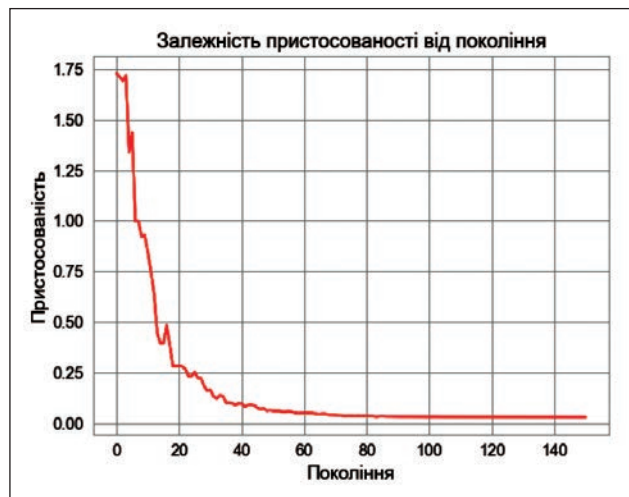


Рис. 10. Зміна пристосованості під час пошуку рішення

**Висновки.** У роботі вдосконалено метод симетричних складників на базі цифрових фільтрів та показано, як синтезувати цифровий ФСС за допомогою генетичного алгоритму. Як фітнес-функцію використано зважену чебишевську норму.

У результаті аналізу цифрових фільтрів було запропоновано використати нерекурсивний цифровий фільтр із лінійною фазою. Існує чотири типи таких фільтрів. Для цифрового ФСС було запропоновано використати фільтри I та II типу.

Для оптимізації коефіцієнтів фільтру використано генетичний алгоритм. Результати показали, що отримано досить непогані показники, а саме: усі три вектори повороту мають майже одиничний коефіцієнт передачі та зсув між ними дорівнює  $120^\circ$  та  $240^\circ$  в смузі пропускання КІХ-фільтрів.

#### Список літератури:

1. Солонина А.И. Цифровая обработка сигналов в зеркале MATLAB. БХВ, 2018. 560 с.
2. Proakis J., Manolakis D. Digital Signal Processing, 4th Edition. London: Pearson, 2013. 1019 p.
3. Артеменко М.Ю., Каплун В.В., Бобровник В.М. Визначення складників частин повної потужності трифазної чотирипровідної системи електроживлення за відомими активними та реактивними потужностями окремих фаз. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2019. Том 30 (69), № 4. С. 17–22. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2019.4-1/04>.
4. Черкашина Г.И. Симметрирование режимов работы системы электроснабжения бытового сектора. Энергозбереження. Энергетика. Энергоаудит. 2015. № 4 (135). С. 21–28.
5. Проектування електроенергетичних і електромеханічних систем та пристроїв. Релейний захист: Навчальний посібник для студентів зі спеціальності електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / Є.І. Сокол, О.Г. Гриб, В.М. Баженов та ін. Харків: ФОП Бровін О.В., 2020. 306 с.
6. Головка І. Найважливіший вид палива – заощаджений. Вісник. Офіційно про податки. 2015. № 47 (47). URL: <http://www.visnuk.com.ua/ua/pubs/id/9199>. (дата звернення: 14.04.2021).
7. Маркевич К., Омельченко В. Ціноутворення на енергетичних ринках: досвід ЄС та України : Аналітична доповідь. Київ: Заповіт, 2016. 56 с. URL: [https://razumkov.org.ua/uploads/article/2016\\_ENERGY-GAZ-pravki.pdf](https://razumkov.org.ua/uploads/article/2016_ENERGY-GAZ-pravki.pdf). (дата звернення: 14.04.2021).
8. Аналіз перспектив розвитку цифрової енергетики в Україні. / О.Г. Гриб та ін. Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Серія: Гідравлічні машини та гідроагрегати. 2020. № 1. С. 85-90. DOI: <https://doi.org/10.20998/2411-3441.2020.1.12>.
9. James L., Kirtley Jr. Introduction to Electric Power Systems. Spring, 2011. 278 p.
10. Теорія електричних і магнітних кіл: Підручник / С.В. Панченко, О.М. Ананьєва, М.М. Бабаєв та ін. 2-ге вид., випр. та допов. Харків: УкрДУЗТ, 2020. 246 с.
11. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. [Взамен ГОСТ 13109-87; Введ. 01.01.2000]. Минск: Изд-во стандартов, 1999. 31 с.
12. Тесик Ю.Ф. Прецизионные измерительные преобразователи параметров трехфазной сети на основе фильтров симметричных составляющих: Автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.11.05. Киев, 1985. 19 с.
13. Автоматизация электроэнергетических систем: Учебное пособие для вузов / О. П. Алексеев, В. Л. Козис, В. В. Кривенков, Морозкин В.П. и др. Энергоатомиздат, 1994. 448 с.
14. Горлач А.А., Минц М.Я., Чинков В.Н. Цифровая обработка сигналов в измерительной технике. К.: Техніка, 1985. 151 с.
15. Цифровий вимірювач квадратурних складників та коефіцієнтів несиметрії напруги: пат. 108976 Україна: МПК G01R 29/16. №201412151; заявл. 10.11.14; надр. 25.06.15, Бюл. №12. 6с.
16. Makov D.K. New method of measuring of symmetric sequences of three-phase voltage. Naukovi visti NTUU-KPI, 2014. Volume 93 Issue 1, P. 14-19.
17. Mutingi M., Mbohwa C. Grouping genetic algorithms. Advances and Applications. Switzerland: Springer International Publishing, 2017. 243 p.
18. Cheng, J.R., Gen M. Parallel genetic algorithms with GPU computing. Intechopen, 2020. 26 p. DOI: <http://doi.org/10.5772/intechopen.89152>.

**Petrosian R.V., Kolos K.R. SYNTHESIS OF A DIGITAL FILTER OF SYMMETRIC COMPONENTS BASED ON A GENETIC ALGORITHM**

*The three-phase electricity transfer system has become widespread. However, the system functions well only when it is symmetrical. One of the main causes of symmetry violation is the use of such loads, symmetric performance and operating modes are impossible or inappropriate for constructive, technological or economic considerations. Therefore, quality control of electricity is important. There is a fairly large number of electricity quality indicators, but in this article, such indicators are considered as: unbalance factor of return voltage sequence; unbalance factor of zero sequence of voltage.*

*The introduction of a modern element base makes adjustments to all spheres of science and technology (including energy). The basis of the method of symmetrical components is laid a digital filter. As a filter device, a FIR filter with a linear phase (I and II type) is proposed. This allowed us to approximate three rotation vectors quite accurately.*

*A genetic algorithm was used to optimize the filter coefficients. Genetic algorithm - heuristic algorithm, which is a variety of evolutionary algorithms, which solve optimization tasks using methods of natural evolution, similar to natural selection in nature. This algorithm allows to perform multicriterial optimization used in the filter synthesis (it was necessary to minimize both an amplitude-frequency characteristic and phase frequency). As a fitness function used Chebyshev norm. Simulation was performed using Python programming language. The results showed that there are quite good indicators.*

*Prospects for further research are the testing of the proposed method on a broader spectrum of tasks, looking for other methods of optimization, studying the effects of finite bit depth, analyzing the structure of the digital filter of symmetric components.*

**Key words:** filter symmetric components, digital filter, genetic algorithm, Chebyshev norm.

**Прачик В.В.**

Херсонський національний технічний університет

**Ляшенко О.М.**

Херсонський національний технічний університет

## РОЗРОБЛЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ПРИРОДНИХ КАТАСТРОФ З ВИКОРИСТАННЯМ ОБ'ЄКТНО-ОРІЄНТОВАНОЇ МЕТОДОЛОГІЇ ТА ТЕХНОЛОГІЇ JAVA SE 11

*У роботі запропоновано методи розроблення інформаційної системи моніторингу природних катастроф. Основна сфера практичного застосування системи моніторингу – це інформаційне обслуговування органів управління в умовах виникнення природних катастроф.*

*Основними завданнями інформаційної системи моніторингу є: формування інформаційного фонду про небезпечні чинники; оцінка соціально-економічних наслідків ймовірних природних катастроф; підготовка пропозицій щодо поліпшення діяльності органів виконавчої влади та органів місцевого самоврядування з питань запобігання негативним змінам у сфері техногенної та природної безпеки.*

*Інформаційна система моніторингу має три режими проведення моніторингових досліджень: до виникнення природної катастрофи – у режимі повсякденного функціонування; у момент загрози виникнення природної катастрофи – у режимі підвищеної готовності; після виникнення природної катастрофи – у режимі надзвичайної ситуації.*

*Для побудови інформаційної системи моніторингу природних катастроф було обрано об'єктно-орієнтовану методологію та технологію Java SE 11.*

*Інформаційна система моніторингу має у своєму складі шість БД, які розроблено за допомогою системи керування реляційними базами даних Microsoft SQL Server: «Геофізичні надзвичайні ситуації», «Геологічні надзвичайні ситуації», «Метеорологічні надзвичайні ситуації», «Гідрологічні надзвичайні ситуації (морські та з поверхневими водами)», «Пожежі в природних екосистемах», «Медико-біологічні надзвичайні ситуації».*

*Для розроблення графічного інтерфейсу інформаційної системи було використано бібліотеку Swing та графічні компоненти (Swing widgets).*

*Розроблена інформаційна система дасть змогу здійснювати прогнозування місця, часу, можливостей виникнення нових осередків небезпеки, оцінку ризику для населення, а також підготовку управлінських рішень щодо локалізації та ліквідації природних катастроф.*

**Ключові слова:** об'єктно-орієнтована методологія, інформаційна система, моніторинг природних катастроф, реляційні бази даних.

**Постановка проблеми.** Для території України характерно виникнення практично всього спектру небезпечних природних явищ і процесів геологічного, гідрогеологічного, і метеорологічного походження, які є джерелами виникнення природних катастроф (ПК) [1].

Частота виникнення і руйнівні наслідки ПК вимагають прийняття оперативних заходів, спрямованих на їх попередження, локалізацію та ліквідацію.

Головну роль у процесі попередження ПК відіграє моніторинг, оскільки спостереження, збір, аналіз і оцінка якісних і кількісних параметрів стану небезпечних природних явищ та процесів – потенційних джерел ПК – дасть змогу розробляти і реалізовувати заходи, спрямовані на порятунк

життів і збереження здоров'я людей, зниження шкоди природному середовищу і матеріальних втрат, а також на локалізацію зон ПК, припинення дії характерних для них небезпечних факторів.

Таким чином, актуальним є завдання розроблення інформаційної системи, яка дасть змогу здійснювати прогнозування місця, часу, можливостей виникнення нових осередків небезпеки, оцінку ризику для населення, а також підготовку управлінських рішень щодо локалізації та ліквідації природних катастроф.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [2] розв'язано важливе науково-практичне завдання створення системи мобільного екологічного моніторингу під час комплексування космічних, повітряних та рухомих наземних

комплексів. Запропоновано методику побудови зон екологічного ризику на основі методів ранжирування екологічних показників під час багатокритеріального оцінювання екологічної безпеки екосистеми, яка, на відміну від наявних, базується на використанні багатоспектральних характеристик космічного знімка, що дає можливість однозначно ідентифікувати характер впливу на природне навколишнє середовище в системі екологічного спостереження.

У роботі [3] розглянуто стан і проблеми впровадження системи моніторингу безпеки в Україні та її відмінності від систем розвинутих країн. Сутність і призначення системи моніторингу безпеки та прогнозування полягають у спостереженні, контролі й передбаченні небезпечних процесів та явищ природи, техносфери, зовнішніх дестабілізуючих та інших факторів, які є джерелами НС, а також визначенні масштабів НС із метою вирішення завдань щодо мінімізації їх поширення.

У роботі [4] розроблено систему, метою якої є підтримка процесів прийняття рішень на етапах підготовки, запобігання та планування системи захисту від природних та інших катастроф. Основною системою є географічна інформаційна підсистема області з усіма необхідними даними про регіон, де сталася НС.

У роботі [5] розроблено мобільну ГІС-технологію для моніторингу просторово розподілених НС. Мобільна ГІС-технологія здійснює моніторинг навколишнього середовища і стану потенційно небезпечних об'єктів; оперативний моніторинг у зоні виникнення НС; визначення основних характеристик вражаючих факторів НС – якісний аналіз; визначення ризику впливу вражаючих факторів і оцінку їх стійкості – кількісний аналіз; прогнозування НС та оцінку ризику їх виникнення.

**Постановка завдання.** Метою статті є розроблення інформаційної системи моніторингу природних катастроф із використанням об'єктно-орієнтованої методології та технології Java SE 11.

**Виклад основного матеріалу.** Моніторинг – це процес відстеження стану об'єкта (системи) за допомогою безперервного або періодичного збору даних, що являє собою сукупність визначених ключових показників [6].

Основна сфера практичного застосування моніторингу – інформаційне обслуговування органів управління в умовах виникнення природних катастроф (ПК).

Системою моніторингу називають сукупність елементів, що становлять структуру моніторинго-

вої системи: об'єкти моніторингу, суб'єкти моніторингу, комплекс моніторингових показників, моніторингову діяльність, інструментарій моніторингової діяльності [6].

Об'єктами моніторингу ПК є: атмосферне повітря, водні ресурси, рослинний світ, лісовий та сільськогосподарський фонди, потенційно небезпечні об'єкти, об'єкти підвищеної небезпеки.

Суб'єкти моніторингу ПК у межах повноважень здійснюють спостереження за небезпечними чинниками, збір та узагальнення інформації про їх розвиток, розробляють профілактичні заходи щодо запобігання їх виникненню і контролюють проведення цих заходів. До суб'єктів моніторингу ПК на державному рівні належать: Міненерговугілля, Мінекономрозвитку, Міноборони, МОЗ, Мінрегіон, Національна поліція, Державіаслужба, Держприкордонслужба, Держатомрегулювання, Держводагентство, Держгеонадра, Держлісагентство, Держпраці, Держпродспоживслужба, ДСНС, ДАЗВ, ДКА, Держекоінспекція, Укртрансбезпека, НАН України, а також підприємства, установи та організації, що належать до сфери їх управління [6].

Режими проведення моніторингових досліджень:

- до виникнення ПК – у режимі повсякденного функціонування. При цьому головною метою є прогнозування місця, часу, вражаючого фактора небезпеки й оцінка ризиків для населення;

- у момент загрози виникнення ПК – у режимі підвищеної готовності. Головною метою є своєчасне визначення місця, часу, вражаючого фактора небезпеки та прогнозування можливих наслідків;

- після виникнення ПК – у режимі надзвичайної ситуації (НС). Головною метою є прогнозування місця, часу, можливості виникнення нових осередків небезпеки, оцінка ризику для населення, підготовка управлінських рішень щодо локалізації та ліквідації НС.

Інформаційна система моніторингу ПК – це система безперервних спостережень, лабораторного та іншого контролю для оцінки стану захисту населення і територій та небезпечних процесів, які можуть призвести до загрози або виникнення надзвичайних ситуацій, а також своєчасне виявлення тенденцій до їх зміни.

Основними завданнями інформаційної системи моніторингу ПК є: формування інформаційного фонду про небезпечні чинники; оцінка соціально-економічних наслідків ймовірних природних катастроф; підготовка пропозицій щодо поліпшення діяльності органів виконавчої влади

та органів місцевого самоврядування з питань запобігання негативним змінам у сфері техногенної та природної безпеки.

Для побудови інформаційної системи моніторингу природних катастроф було обрано об'єктно-орієнтовану методологію та технологію Java SE 11.

Архітектуру інформаційної системи наведено на рис. 1.

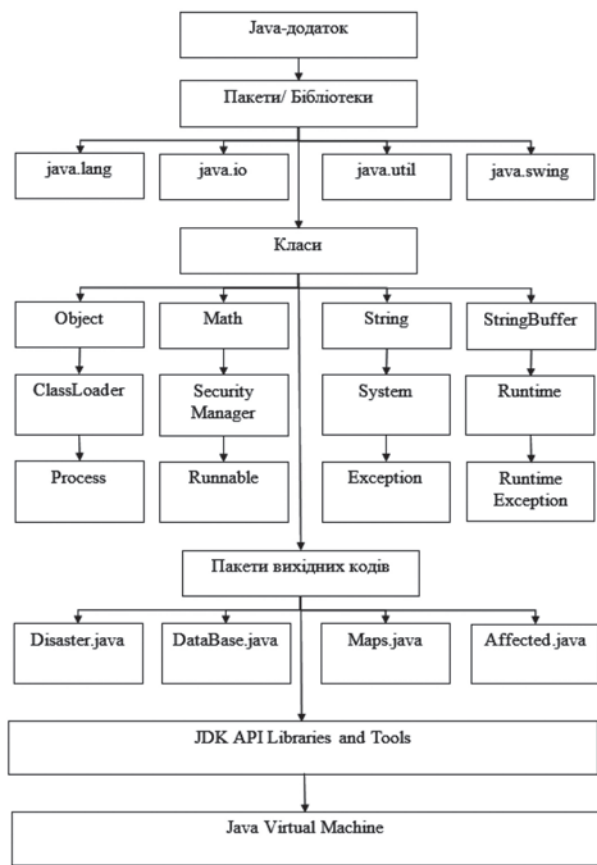


Рис. 1. Архітектура інформаційної системи

Інформаційна система моніторингу природних катастроф має у своєму складі такі БД, які розроблено за допомогою системи керування реляційними базами даних Microsoft SQL Server.

1. БД «Геофізичні надзвичайні ситуації».

БД містить інформацію про землетруси з перевищенням фонові сейсмічності на 1–2 бали; землетруси силою від 5 до 6 балів за шкалою MSK-64 в місцях розміщення потенційно-небезпечних об'єктів.

Відомості щодо геофізичних НС містять: дату; час виявлення та реєстрації; координати джерела землетрусу; магнітуда за шкалою MSK-64; результати розрахунку наслідків землетрусів (за запитом) [7].

2. БД «Геологічні надзвичайні ситуації».

БД містить інформацію про: обвали, осипи, просади (провали) земної поверхні, карстові провалля, підтоплення території через підйом рівня

грунтових вод та стійке порушення природного режиму зволоження.

Відомості щодо геологічних НС містять: координати; адресу; дані щодо кута нахилу укосу зсуву; дані щодо щільності та вологості ґрунту схилів; дані щодо швидкості зсуву; дані щодо кількості та площі зсувів, обвалів, осипів, осідань земної кори та карстових провалів; дані щодо кількості та площі активних зсувів; дані щодо кількості зсувів, обвалів, карстів на забудованій території; дані щодо кількості об'єктів у зоні зсуву, обвалу тощо; площі підтоплення; кількості підтоплених населених пунктів [7].

3. БД «Метеорологічні надзвичайні ситуації».

БД містить інформацію про НС, що пов'язані з сильними опадами.

Відомості щодо метеорологічних НС містять: температуру повітря; тривалість метеорологічного явища; швидкість вітру; товщину шару снігу та льоду; діаметр намерзання льоду; висоту заметів; площі уражених сільськогосподарських угідь та лісів (граничні 10% і 30%), % від їх загальної площі тощо [7].

4. БД «Гідрологічні надзвичайні ситуації (морські та з поверхневими водами)».

БД містить інформацію про: високі рівні води (під час повеней, дощових паводків); затори, зажори; затоплення територій; низькі рівні води; ранній льодостав і появу льоду на судноплавних річках, озерах, водосховищах; селі в гірських районах; снігові лавини в гірських районах.

Відомості щодо гідрологічних НС містять: координати зони НС; напрямок та швидкість вітру; висоту підйому (зниження) рівня води; тривалість водопілля (маловоддя); площу затоплення території; кількість затоплених населених пунктів; товщину льоду; швидкість селевого потоку; об'єм виносу уламкових матеріалів; глибину снігового покриву на схилах; швидкість сходу лавин; наявність постраждалих тощо [7].

5. БД «Пожежі в природних екосистемах».

БД містить інформацію про лісові та степові пожежі площею понад 5 га і торф'яні площею понад 1 га.

Відомості щодо пожеж у природних екосистемах містять: координати; площу пожежі та димового шлейфу; площу уражених лісів; природних луків; сільгоспугідь, її % від загальної площі; наявність та кількість уражених населених пунктів; наявність та кількість постраждалих [7].

6. БД «Медико-біологічні надзвичайні ситуації».

БД містить інформацію про медико-біологічні НС. Відомості щодо медико-біологічних НС містять [7]:



1) аналіз епідемічної обстановки: дату виникнення НС; вид НС; класифікаційні ознаки НС; область, адміністративний район, населений пункт; інфекційне захворювання; число хворих, із них дітей, осіб; число померлих, із них дітей, осіб; опис НС;

2) відомості про епізоотії: адреса та географічні координати вогнища виникнення; найменування хвороби, збудника; площа поширення; кількість постраждалих голів худоби (у тому числі тих, що загинули); заходи, вжиті для локалізації та ліквідації НС;

3) відомості про епіфітотії: адреса та географічні координати вогнища виникнення; найменування хвороби або шкідника; площа поширення; % від загальної площі; заходи, вжиті для локалізації та ліквідації НС.

Структурно-логічну схему БД інформаційної системи моніторингу ПК наведено на рис. 2.

Для розроблення графічного інтерфейсу інформаційної системи було використано бібліотеку Swing та графічні компоненти (Swing widgets).

Приклади роботи інформаційної системи наведено на рис. 3–5.

**Висновки.** У роботі наведено опис БД інформаційної системи моніторингу природних катастроф. Розроблено БД інформаційної системи за допомогою системи керування реляційними базами даних Microsoft SQL Server. Розроблено архітектуру та графічний інтерфейс інформаційної системи. Для розроблення графічного інтерфейсу було використано бібліотеку Swing та графічні компоненти (Swing widgets).

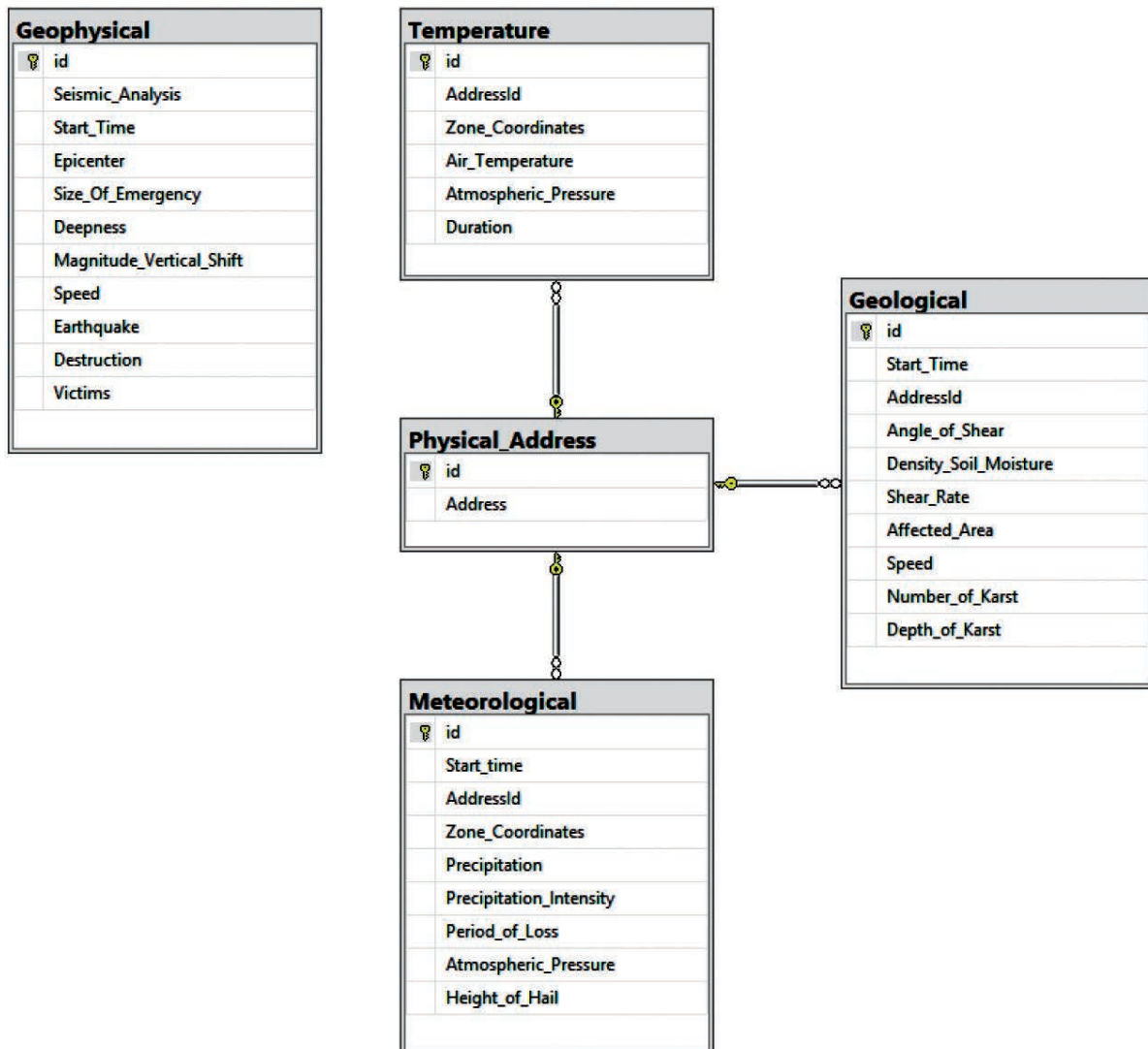


Рис. 2. Структурно-логічна схема БД

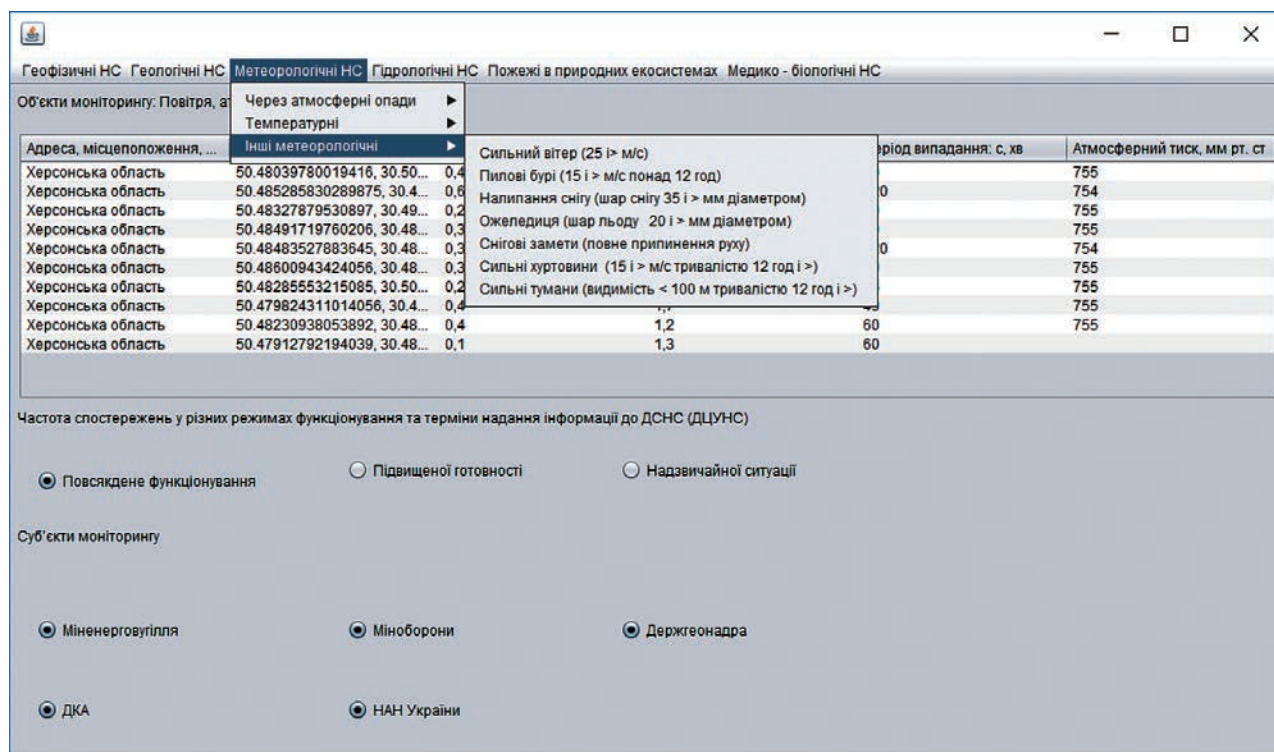


Рис. 3. Вікно «Моніторинг метеорологічних НС»

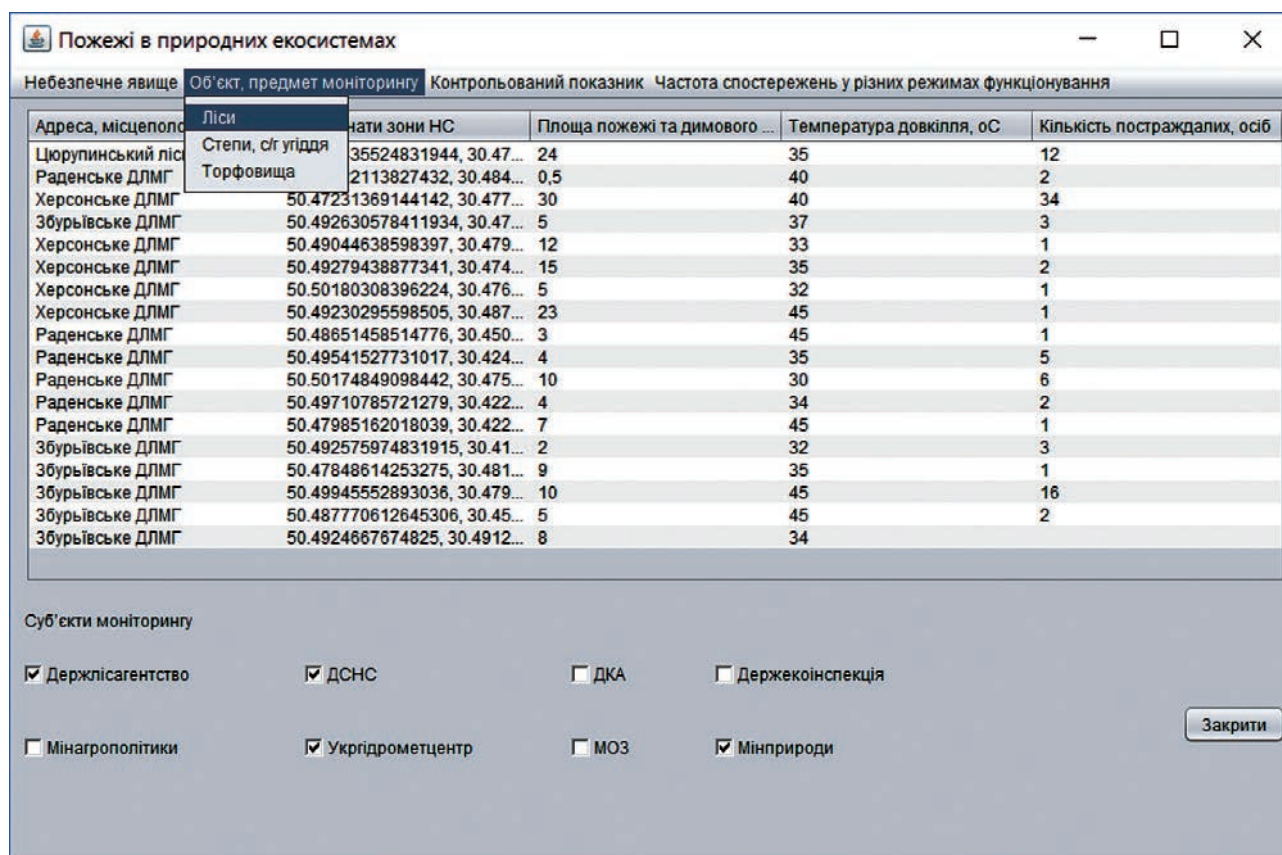


Рис. 4. Вікно «Пожежі в природних екосистемах»

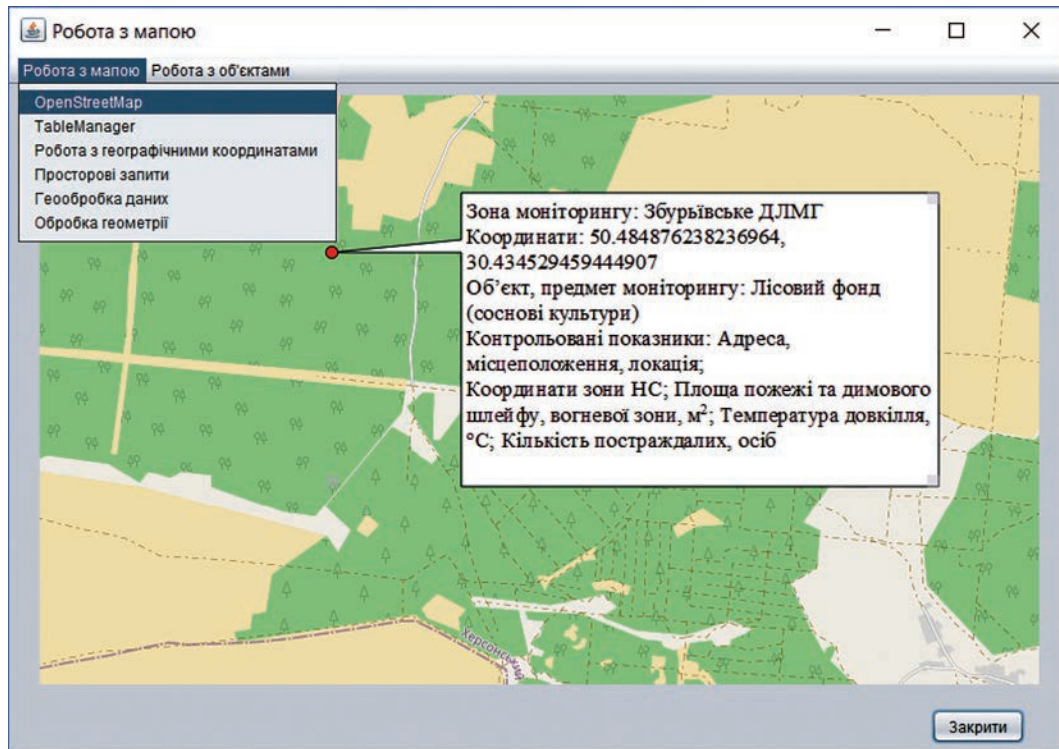


Рис. 5. Вікно «Робота з картою OpenStreetMap»

**Список літератури:**

1. Liashenko, O., Kyryichuk, D., Krugla, N., Lozhkin, R. Development of a decision support system for mitigation and elimination the consequences of natural disasters in Ukraine. In International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2019. Vol. 19. pp. 825–832. <https://doi.org/10.5593/sgem2019/2.1/s08.107>.
2. Триснюк В.М., Охарев В.О., Триснюк Т.В., Сметанін К.В., Голован Ю.М. Створення системи мобільного екологічного моніторингу. Екологічна безпека та збалансоване ресурсокористування. 2018. № 2 (18). С. 118–125. DOI: 10.31471/2415-3184-2018-2(18)-118-125.
3. Кропотов П.П., Бегун В.В., Гречанинов В.Ф. Створення сучасної системи моніторингу безпеки – актуальна державна та наукова задача. Системи обробки інформації. 2015. Вип. 11 (136). С.199 –206.
4. Buzolic J., Mladineo N., Knezic S. Decision support system for disaster communications in Dalmatia. International Journal of Emergency Management. 2009. vol. 1 (2). pp. 191–201.
5. Liashenko, O., Kyryichuk, D., Raiko, H., Dorovska, I., Chebukin, Y. Development of mobile gis technology for monitoring spatially distributed emergencies. International Multidisciplinary Scientific GeoConference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM, 2020. 2020-August (2.1). pp. 483–490.
6. Кодекс цивільного захисту України. Відомості Верховної Ради (ВВР), 2013. № 34–35. ст.458. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17#Text> (дата звернення 21.05.2021).
7. Порядок функціонування системи моніторингу і прогнозування надзвичайних ситуацій. Постанова Кабінету Міністрів України від 12.09.2014. URL: <https://www.dsns.gov.ua/files/2014/8/8/poradoc.pdf> (дата звернення 21.05.2021).

**Prachyk V.V., Liashenko O.M. DEVELOPMENT OF AN INFORMATION SYSTEM FOR MONITORING NATURAL DISASTERS USING OBJECT-ORIENTED METHODOLOGY AND JAVA SE 11 TECHNOLOGY**

*A methods of development of information system for natural disasters monitoring are proposed in the paper.*

*The main area of practical application of the monitoring system is information services to administrative bodies in the event of natural disasters.*

*The main tasks of the monitoring information system are: To establish an information fund on dangerous factors; Assessment of the social and economic consequences of possible natural disasters; Preparation of proposals for improving the activities of the executive and local authorities in preventing negative changes in man-made and natural security.*

*The Information Monitoring System has three modes for conducting monitoring studies: Before a natural disaster occurs, in daily operation; At the time of the threat of a natural disaster, on high alert; After a natural disaster occurs, in an emergency.*

*The object-oriented methodology and technology of Java SE 11 was chosen to build a natural disaster information system.*

*The Information Monitoring System has six databases developed with the help of the Relational Database Management System Microsoft SQL Server: «Geophysical Emergencies», «Geological Emergencies», «Meteorological Emergencies», «Hydrological emergencies (marine and surface water) », «Fires in natural ecosystems», «Medico-biological emergencies »*

*Swing library and graphics components (Swing widgets) were used to develop the graphical interface of the information system.*

*The information system will make it possible to forecast the location, time and potential of new hot spots, to assess the risk to the population, and to prepare management decisions on the location and elimination of natural disasters.*

**Key words:** *object-oriented methodology, information system, monitoring of natural disasters, relational databases.*

**Сарнацький В.В.**

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

**Баклан І.В.**

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

## ВПЛИВ СОЦІОДЕМОГРАФІЧНОЇ ГЕТЕРОГЕННОСТІ НА ОПТИМАЛЬНУ СТРАТЕГІЮ ВПРОВАДЖЕННЯ КАРАНТИННИХ ЗАХОДІВ

*У роботі описані результати дослідження оптимальних стратегій впровадження карантинних заходів до модельованих середовищ із різною соціодемографічною параметризацією.*

*У межах цієї роботи було реалізоване середовище моделювання розповсюдження епідемії у певній країні. Ця модель може бути гнучко параметризована заданням таких параметрів, як: кількість мешканців країни, їх віковий розподіл, розподіл розміру родин, кількість закладів навчання та роботи, розподіл приналежності кожного мешканця до закладу навчання та роботи в залежності від віку. За допомогою такої параметризації були побудовані моделі деяких європейських країн. Розповсюдження епідемії моделюється методом реєстрації контактів. Цей метод полягає у симуляції переміщень кожного мешканця країни протягом часу та його контактів з іншими мешканцями. Такий підхід до моделювання розповсюдження епідемії, хоча і є більш вимогливим до обчислювальних ресурсів, здатний відображати складні стохастичні процеси, притаманні реальному світу.*

*На основі розробленої моделі було побудоване середовище навчання інтелектуального агента, сформульоване як Марковський процес прийняття рішень. В якості доступних агенту дій були обрані три дії: повний карантин у всіх закладах, за якого всі мешканці контактують лише зі своїми родичами; скасування карантину та бездіяльність. Винагорода за обрану дію була сформована з двох складників: винагорода за економічний стан та винагорода за епідеміологічний стан. В якості стану агент спостерігає за процентом кількості інфікованих мешканців за останні декілька днів.*

*Модель прийняття рішень агента побудована на основі повнозв'язної штучної нейронної мережі, що приймає на вхід поточний стан середовища. Вагові коефіцієнти нейронної мережі підбираються за допомогою алгоритму глибокого Q-навчання. Для валідації окремо навченого агента його ефективність була порівняна з ефективностями трьох інших стратегій: стратегії повного карантину, стратегії ігнорування і стратегії випадкових дій. Також агенти, що були навчені на середовищах, параметризованих розподілами однієї країни, були протестовані на середовищах інших країн. Результати порівняння показали, що у більшості випадків агент, що був навчений на певній країні, показує більшу ефективність, ніж інші агенти. З цього можна зробити висновок, що соціодемографічні розподіли відіграють важливу роль у процесі пошуку оптимальної стратегії.*

**Ключові слова:** навчання з підкріпленням, інтелектуальні агенти, штучний інтелект, епідеміологія.

**Постановка проблеми.** Вплив пандемії COVID-19, спричиненої коронавірусом SARS-CoV-2 [1, с. 1], показав, що відсутність оптимальної стратегії впровадження карантинних заходів здатна вплинути як на економічний, так і на епідеміологічний стан ураженої країни [2, с. 7], а також на психологічний стан її населення [3, с. 1; 4, с. 3]. Результати моделювання та аналізу показали, що впровадження своєчасних карантинних засобів сприяє «згладжуванню» кривої захворювань, що дає змогу вчасно надати медичну допомогу хворим та оминати ситуацію з нестачею медичних

ресурсів. Проте визначення критеріїв «своєчасності» є нетривіальною задачею і потребує експертної оцінки епідеміологів, які, будучи людьми, здатні на помилки, що можуть стати причиною зайвих людських жертв та удару по економіці країни. Тому було вирішено дослідити специфіку використання інтелектуальних агентів, основним завданням яких буде контроль за карантинними заходами у середовищі моделювання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Через те, що в основі роботи лежить середовище моделювання, насамперед була проаналізована

література щодо моделювання розповсюдження епідемій. Серед опрацьованих робіт значну частину займають праці, основані на компартментних моделях. Цей тип моделей ділить модельоване суспільство на декілька епідеміологічних груп та моделює зміни у складі цих груп протягом часу. Першою такою моделлю є модель SIR [5, с. 1], що передбачає наявність трьох таких груп: S (Susceptible) – група людей, що не мають імунітету до хвороби та можуть бути інфікованими; I (Infected або Infectious) – група людей, що були інфіковані та здатні інфікувати інших; R (Recovered або Removed) – група людей, що переохворіла та виробила імунітет до хвороби (у деяких роботах до цієї групи відносять загинувших через хворобу). Окрім SIR існує також модель SIS, що передбачає перехід членів групи I до групи S та їх повторне інфікування. Модель SEIR [6, с. 3] передбачає додаткову групу E (Exposed), члени якої були у контакті з інфікованими, проте не мають симптомів. Представники цієї групи можуть інфікувати групу S, проте з нижчим ступенем ймовірності (інколи рівним 0) у порівнянні з представниками групи I. Модель SEIRS [6, с. 3] є модифікацією моделі SEIR, що передбачає втрату імунітету через певний час та можливість повторного інфікування.

Для моделювання переходів представників однієї групи до іншої зміни у кількості представників кожної групи з часом моделюються системою диференціальних рівнянь. Аналіз таких систем із калібруванням моделей на реальних соціодемографічних даних дав змогу дослідити вплив різних видів карантинних заходів на динаміку розповсюдження захворювання [7, с. 1; 8, с. 14; 9, с. 15].

В останні роки набирають популярність так звані агент-орієнтовані підходи, що моделюють кожного представника групи окремо [10, с. 1]. Такий тип моделей дозволяє урахувати складні стохастичні процеси, що притаманні реальному світу, і здатен більш точно моделювати процес розповсюдження епідемій [11, с. 201; 12, с. 5].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій** показав, що ідея використати інтелектуальні агенти для розв'язання поставленої задачі не є новою. Так, у [13, с. 2] були показані дослідження роботи агента, що контролював запровадження карантинних заходів у модельованому середовищі. Хоча модель розповсюдження епідемії були занадто спрощена, автори доповідають, що розроблений метод можна застосовувати з будь-якими моделями. У [14, с. 7] представлені

результати аналізу роботи складнішого агента, в основі якого лежить рекурентна нейронна мережа, що аналізує статистику захворювань і робить вибір з трьох альтернатив: скасувати усі карантинні впровадження, ввести 25% та 75% карантин. Результати показали, що агент здатний контролювати розповсюдження епідемії, тримаючи баланс між показниками епідеміологічного та економічного стану країни.

**Постановка завдання.** У результаті проведеного аналізу літератури не було знайдено досліджень щодо використання інтелектуальних агентів, навчених методами навчання з підкріпленням на агент-орієнтованих середовищах моделювання з соціодемографічною параметризацією. Дослідження у цій сфері є важливим, оскільки соціодемографічна параметризація може мати значний вплив на оптимальні стратегії впровадження карантинних заходів, а сучасні обчислювальні ресурси дозволяють відмовитися від класичних моделей розповсюдження епідемій на користь агент-орієнтованих.

**Виклад основного матеріалу дослідження.**

*Модель розповсюдження епідемії.*

У роботі в якості середовища для навчання та тестування агентів була вибрана індивідуальна модель, що є спрощеною версією моделі, описаної в [10]. Центральним об'єктом моделювання є країна з населенням  $P$  та трьома видами місць зустрічі жителів: житлові будинки, місця навчання та роботи, множини яких представлені як  $H, S, W$ , а їх кількість задана як:  $|H| = \alpha_h \cdot |P|$ ,  $|S| = \alpha_s \cdot |P|$ ,  $|W| = \alpha_w \cdot |P|$  відповідно. Кожен мешканець міста  $p \in P$  має вік  $a_p \sim Page$  та родину розміром  $f_{s,p} \sim H_{size}$  з якою він проживає у будинку  $h_p \in H$ . Також, в залежності від віку, мешканці можуть мати місце роботи та навчання відповідно до розподілів  $w_p \sim P_w(a_p)$ ,  $s_p \sim P_s(a_p)$ ,  $w \in W \cup \{\emptyset\}$ ,  $s \in S \cup \{\emptyset\}$ . Розподіли  $P_w$ ,  $P_s$  задані так, що для кожного місця роботи на навчання кількість відповідних йому мешканців відповідає розподілам  $W_{size}$  та  $S_{size}$ . Кожна установа  $m \in W \cup S$  у час  $t$  може бути зачинена на карантин. У такому разі, величина  $C_m(t) = 0$ , інакше –  $C_m(t) = 1$ .

Кожен мешканець має стан інфікування  $I_p(t) \in \{0, 1, 2, 3\}$  у час  $t$ , що відповідають моделі SEIRS (Рис. 1) наступним чином: 0 – Susceptible, 1 – Exposed, 2 – Infectious, 3 – Recovered. Перехід від стану 0 до стану 1 відбувається у разі інфікування, а переходи  $1 \rightarrow 2$ ,  $2 \rightarrow 3$ ,  $3 \rightarrow 0$  відбуваються після проходження часу  $t_{e,i}$ ,  $t_{e,i} + t_{i,r}$ ,  $t_{e,i} + t_{i,r} + t_{r,s}$  рахуючи від часу інфікування  $t_{e,p}$  відповідно.

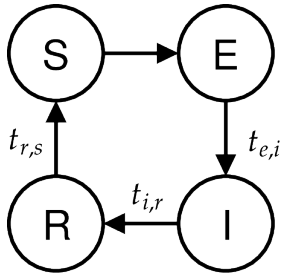


Рис. 1. Модель SEIRS та переходи між станами

Симуляція виконується з періодом в один день. Протягом цього дня кожен мешканець перебуває у наступних установах протягом наведеного інтервалу часу:

- $hp, [0, t_{wakeup})$ ;
- Якщо  $(wp \in W \wedge C_{wp}(t) = 0)$ ,  $(sp \notin S \vee C_{sp}(t) = 1)$ :  $wp, [t_{ws}, t_{we})$ ;  $hp, [t_{we} + 1, 24)$ ;
- Якщо  $(wp \notin W \vee C_{wp}(t) = 1)$ ,  $(sp \notin S \wedge C_{sp}(t) = 0)$ :  $sp, [t_{ss}, t_{se})$ ;  $hp, [t_{se} + 1, 24)$ ;
- Якщо  $(wp \in W \wedge C_{wp}(t) = 0)$ ,  $(sp \notin S \wedge C_{sp}(t) = 0)$ :  $wp, [t_{ws}, t_{we})$ ;  $sp, [t_{ess}, t_{ese})$ ;  $hp, [t_{ese} + 1, 24)$ ;
- Якщо  $(wp \notin W \vee C_{wp}(t) = 1)$ ,  $(sp \notin S \vee C_{sp}(t) = 1)$ :  $hp, [t_{wakeup}, 24)$ ;

Під кінець дня кожний мешканець  $p$  для якого  $I_p(t) = 0$  інфікується ( $1 \rightarrow I_p(t + 1)$ ) з ймовірністю:

$$1 - \prod_{p' \in P, I_{p'} \in \{1, 2\}, t=0, M(p', t) = M(p', t)}^{24} (1 - \alpha_{I_p}^{C_{M(p', t)} T(M(p', t))}), \quad (1)$$

де  $M(p, t) : P \times \mathbb{N} \rightarrow H \cup W \cup S \cup \{\emptyset\}$  – функція, що для заданого мешканця  $p$  і часу  $t$  повертає місце, де він перебував у цей час. Через те, що модель може бути параметризована так, що буде існувати момент часу коли мешканець не буде перебувати ні в якій установі – функція у такий випадок повертає  $\emptyset$ .  $T(m) : H \cup W \cup S \cup \{\emptyset\} \rightarrow \mathbb{R}$  – функція, що відображає установу в ступінь інфікування перебуваючи в ній. Параметр  $\alpha_{I_p}$  відображає коефіцієнт ймовірності інфікування носієм зі станом  $I_p'$ .

Подальші результати отримані при наступних значеннях параметрів моделі:

- $t_{wakeup} = 7$ ;
- $t_{ws} = 9$ ;
- $t_{we} = 17$ ;
- $t_{ss} = 9$ ;
- $t_{se} = 15$ ;
- $t_{ess} = 18$ ;
- $t_{ese} = 20$ ;
- $T(h) = 2 \cdot 10^{-4}, \forall h \in H$ ;
- $T(s) = 2 \cdot 10^{-4}, \forall s \in S$ ;
- $T(w) = 1 \cdot 10^{-4}, \forall w \in W$ ;
- $t_{e,i} = 14$ ;
- $t_{i,r} = 14$ ;
- $t_{r,s} = 10^{12}$ .

Соціодемографічні дані.

Для отримання значень параметрів  $\alpha_h, \alpha_s, \alpha_w, Page, P_w, P_s, H_{size}, W_{size}, S_{size}$  була проаналі-

зована відкрита база статистичних даних надана Statistical Office of the European Communities (Eurostat), зокрема:

- Families by type, size and NUTS 3 region – для побудови розподілу  $H_{size}$ ;
- Population on 1 January by age and sex – для побудови розподілу  $Page$ ;
- Pupils and students enrolled by education level, sex and age – для побудови розподілів  $P_s, S_{size}$ ;
- Employment by sex, age and NUTS 2 regions (1 000) – для побудови розподілів  $P_w, W_{size}$ .

У разі відсутності певних даних для деякої країни – вони були замінені на усереднені дані по Європейському регіону (EU28).

Середа моделювання як Марковський процес прийняття рішень.

Для спрощення подальшої нотації введемо наступну функцію:

$$\begin{cases} \delta(P) = 1, P \\ \delta(P) = 0, -P \end{cases} \quad (2)$$

Через те, що для використання методу навчання з підкріпленням середовище має бути представлене як Марковський процес прийняття рішень [15, с. 47; 20, с. 1], були введені такі визначення:

- множина дій  $A = \{0, 1, 2\}$ , де 0 відповідає відсутності дії (залишити всі поточні карантинні впровадження та не вводити нових), 1 – повний карантин ( $\forall m, 0 \rightarrow C_m$ ), 2 – скасування карантину ( $\forall m, 1 \rightarrow C_m$ );
- стан  $S_t$  у момент часу  $t$  заданий формулою 3;
- винагорода  $R_{t+1}$  за дію  $A_t$  задана формулою 4.

$$\forall t, S_t = p \in P \{h_p, w_p, s_p, t_{e,p}\} \cup \{C_m(t) | m \in W \cup S\} \quad (3)$$

$$R_{t+1} = R_{t+1}^{(e)} + \lambda R_{t+1}^{(i)}$$

$$R_t^{(i)} = \frac{-1}{p \vee \sum_{p \in P} \delta(I_p(t) = 1)}$$

$$R_t^{(e)} = \frac{1}{P \vee \sum_{p \in P} [S_H(p, t) + S_W(p, t) + S_S(p, t)]}$$

$$S_H(p, t) = \gamma_H \cdot \delta(I_p(t) = 1)$$

$$S_W(p, t) = \delta(w_p \neq \emptyset) \cdot (\gamma_{w'} + C(W_p, t)(\gamma_w - \gamma_{w'}))$$

$$S_S(p, t) = \delta(s_p \neq \emptyset) \cdot (\gamma_{s'} + C(S_p, t)(\gamma_s - \gamma_{s'})) \quad (4)$$

де  $R_{t+1}^{(e)}$  – економічна винагорода, що показує стан економіки модельованої країни на момент часу  $t + 1$ ;  $R_{t+1}^{(i)}$  – епідеміологічна винагорода, що показує загальний епідеміологічний стан модельованої країни на момент часу  $t + 1$ ;  $\lambda$  – ваговий коефіцієнт. Таке розбиття винагороди є цілком природним, бо використання в якості  $R_{t+1}$  лише одного з доданків приводить до тривіальної оптимальної стратегії: якщо  $R_{t+1} = R_{t+1}^{(e)}$ , оптимальна стратегія  $\pi(s) = 2$  (повна бездіяльність), якщо  $R_{t+1} = R_{t+1}^{(i)}$  оптимальна стратегія  $\pi(s) = 1$  (повний карантин). Параметр  $\lambda$  має бути піді-

браний залежно від глобальної політики щодо компромісу між карантинними обмеженнями та їх впливу на економіку. Тому пошук оптимального його значення, так само, як і формулювання поняття «оптимальності» цього параметра, лежать за межами цієї роботи. Наведені у цій роботі результати відповідають  $\lambda = 100$ .

*Опис агента.*

Модель прийняття рішень, що лежить в основі агента, являє собою повнозв'язну штучну нейронну мережу, що приймає на вхід стан  $S_t$  та видає на виході q-значення кожної дії  $q(s,a)$ , що дорівнюють максимальній сумі можливих майбутніх винагород після обирання цієї дії. Таке формулювання, описане в [15], дозволяє агенту діяти з метою максимізації майбутньої винагороди, що є основою навчання з підкріпленням. Стан  $S_t$  і процес обчислення  $q(s,a)$  задані таким чином:

$$\begin{aligned} \forall t, \bar{S}_t &\in R^D \\ \forall n = 1 \dots D, \bar{S}_{t,n} &= 0 \\ \forall n = 2 \dots D, \bar{S}_{t,n} &= \bar{S}_{t-1,n-1} \\ \bar{S}_{t,1} &= \frac{1}{|P|} \sum_{p \in P} \delta(I_p(t) = 2) \\ a_0 &= \bar{S}_t \\ x_i &= a_{i-1} \times W_{i-1} + b_{i-1} \\ a_i &= ReLU(BN(x_i)) \\ q(s,a) &= x_{L,a} \end{aligned} \tag{5}$$

де  $W_i, b_i$  – вагові коефіцієнти  $i$ -го шару нейронної мережі;  $ReLU$  – функція активації ReLU [16, с. 1];  $BN$  – функція batch-нормалізації [17, с. 1].

У процесі навчання агента його вагові коефіцієнти підбираються за допомогою алгоритму Deep

Q-learning with experience replay [18, с. 1] з використанням як методу оптимізації алгоритму Adam [19, с. 1].

*Тестування.*

Тестування було проведене на середовищах, побудованих на основі соціодемографічних даних таких країн, як: Болгарія, Данія, Латвія, Нідерланди, Польща, Швеція, Словенія, Велика Британія. Агент був побудований з  $L = 1$ .

На рис. 2 представлені результати валідації навчених агентів на описаному середовищі. Кожна комірка таблиці містить середню нормалізовану винагороду, що обрхована за формулою б.

$$E_{c^1, c^2} = \frac{\sum_t R_t^{(c^2)}}{\sum_t R_t^{(c^1)}}, \tag{6}$$

де  $c^1$  – країна тренування агента,  $c^2$  – країна тестування агента,  $R_t^{(c)}$  – винагорода у час  $t$  для середовища країни  $c$ .

Як можна побачити, 62.5% комірок містять величину, меншу за 1, що свідчить про те, що більшість результатів відповідають ситуації, коли агент, що навчався на середовищі певної країни, показує більшу кумулятивну винагороду, ніж агенти, що були натреновані на середовищах інших країн.

Через те, що єдина різниця між середовищами різних країн – це різна соціодемографічна статистика, можна зробити висновок, що під час пошуку оптимальної стратегії у впровадженні карантинних заходів слід враховувати соціодемографічну статистику цільової країни.

Було проведене додаткове порівняння натренованих агентів з агентами з такими стратегіями:  $\pi(s) = 1, \pi(s) = 2, \pi(s) \sim U\{0, 2\}$ . Результати наведені на рис. 3.

**Висновки.** У роботі викладені результати дослідження щодо використання інтелектуальних агентів для контролю за впровадженням карантинних заходів у середовищі моделювання розповсюдження захворювань з соціодемографічною параметризацією. Створене середовище моделювання було сформульоване як Марківський процес прийняття рішень, були введені поняття економічної та епідеміологічної винагороди. Були навчені інтелектуальні агенти на середовищах із параметризацією, аналогічною країнам Європейського союзу. З результатів валідації агентів можна зробити висновок, що навчені представленим методом агенти показують більшу ефективність, ніж тривіальні стратегії повного карантину, ігнорування та випадкового прийняття рішень, а також що соціодемографічна параметризація має вплив на ефективність роботи агента.

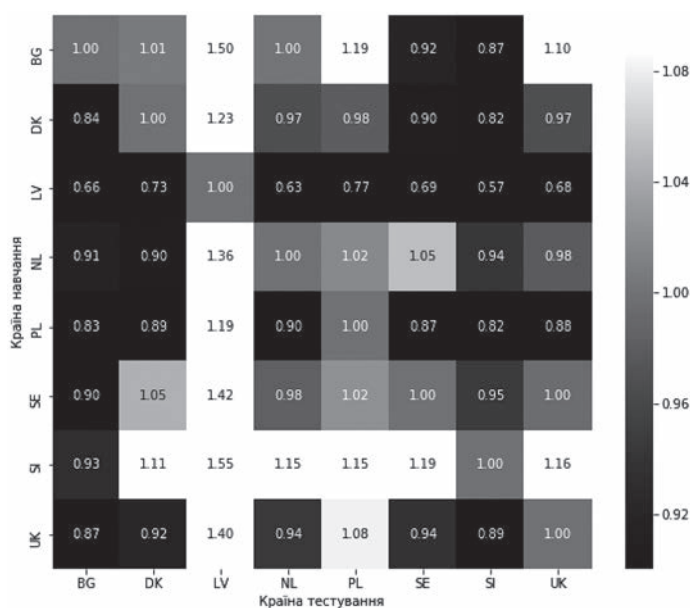


Рис. 2. Результати тестування



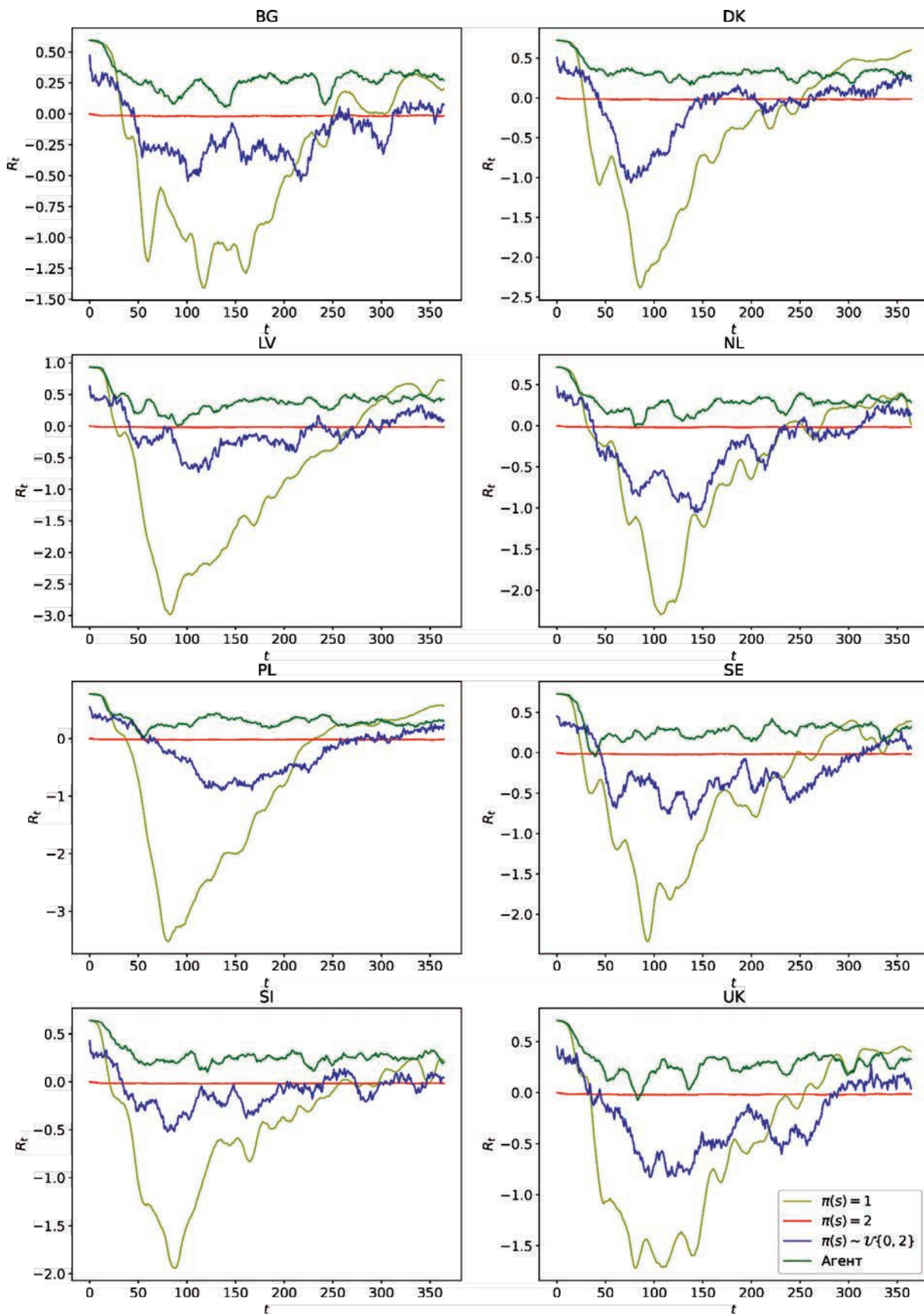


Рис. 3. Винагорода  $R_t$  протягом часу.  
Зверху кожного графіка зазначена країна навчання та тестування агента

**Список літератури:**

1. Coronaviridae Study Group of the International Committee on Taxonomy of Viruses. The species severe acute respiratory syndrome-related coronavirus: classifying 2019-nCoV and naming it SARS-CoV-2. *Nature microbiology*. 2020. Т. 5. № 4. 536 с.
2. Dandekar, R. Quantifying the effect of quarantine control in COVID-19 infectious spread using machine learning. *medRxiv*. 2020.
3. Altuntas, F. The effect of COVID-19 pandemic on domestic tourism: A de-matel method analysis on quarantine decisions. *International Journal of Hospitality Management*. 2021. Т. 92. 102719 с.
4. Yunhe W. The impact of quarantine on mental health status among general population in China during the COVID-19 pandemic. *Molecular psychiatry*. 2021. С. 1–10.
5. Harko, T. Exact analytical solutions of the susceptible-infected-recovered (SIR) epidemic model and of the SIR model with equal death and birth rates. *Applied Mathematics and Computation*. 2014. Т. 236. С. 184–194.
6. Hethcote, H.W. Some epidemiological models with nonlinear incidence. *Journal of Mathematical Biology*. 1991. Т. 29. № 3. С. 271–287.
7. Radulescu, A. Management strategies in a SEIR-type model of COVID-19 community spread. *Scientific reports*. 2020. Т. 10. № 1. С. 1–16.
8. Fernando E Alvarez. A simple planning problem for COVID-19 lockdown. *National Bureau of Economic Research*. 2020.
9. Ng, W.L. To lockdown? When to peak? Will there be an end? a macroeconomic analysis on COVID-19 epidemic in the United States. *Journal of Macroeconomics*. 2020. Т. 65. 103230 с.
10. Merler, S. The role of population heterogeneity and human mobility in the spread of pandemic influenza. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*. 2010. Т. 277. № 1681. С. 557–565.
11. Railsback, S.F. *Agent-based and individual-based modeling: a practical introduction*. Princeton university press. 2019.
12. Eisinger, D. Spatial pattern formation facilitates eradication of infectious diseases. *The Journal of applied ecology*. 2008. Т. 45. № 2. 415 с.
13. Khadilkar, H. Optimising lockdown policies for epidemic control using reinforcement learning. *Transactions of the Indian National Academy of Engineering*. 2020. Т. 5. № 2. С. 129–132.
14. Ohi Abu Quwsar, MF Mridha, Monowar Muhammad Mostafa, Hamid Md Abdul Exploring optimal control of epidemic spread using reinforcement learning. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)*. 2020. Т. 10. № 1.
15. Sutton, R. S. *Reinforcement learning: An introduction*. MIT press, 2018.
16. Glorot, X. Deep sparse rectifier neural networks. *Proceedings of the fourteenth international conference on artificial intelligence and statistics / JMLR Workshop and Conference Proceedings*. 2011. С. 315–323.
17. Ioffe, S. Batch normalization: Accelerating deep network training by reducing internal covariate shift. 2015. URL: <https://arxiv.org/abs/1502.03167>.
18. Mnih V., Kavukcuoglu K. Silver D. Human-level control through deep reinforcement learning. *Nature*. 2015. Т. 518. № 7540. С. 529–533.
19. Kingma, D. P. Adam: A method for stochastic optimization. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1412.6980>.
20. Баклан І.В. Класифікація моделей марковського типу: Наукова монографія // Баклан І.В., Степанова Г.А. К. : НАУ, 2012. 84 с.

**Sarnatskyi V.V., Baklan I.V. THE INFLUENCE OF SOCIODEMOGRAPHIC HETEROGENEITY ON THE OPTIMAL LOCKDOWN POLICY**

*This paper describes the results of the study of optimal lockdown policy in simulated environments with different sociodemographic parametrization.*

*As part of this work, an environment for modeling the spread of the epidemic in a particular country was implemented. This model can be flexibly parameterized by setting such parameters as: the number of residents of the country, their age distribution, the distribution of the size of families, the number of educational and work institutions, the distribution of each resident's belonging to an institution of study and work, depending on age. With the help of this parameterization, models of some European countries were built. The spread of the epidemic is modeled by the contact tracing method. This method consists of simulating the movements of each resident of the country over time and his contacts with other residents. Although this modelling approach of the spread of epidemic is more demanding on computing resources, it is capable of conveying complex stochastic processes of the real world.*

*Based on the developed model, an agent learning environment was built, formulated as a Markov decision-making process. Three actions were chosen as the actions available to the agent: complete quarantine in all establishments, in which all residents are in contact only with their relatives; canceling quarantine and*

*inaction. The reward for the chosen action was formed of two parts: reward for the economic state and reward for the epidemiological state. As a condition, the agent monitors the percentage of residents infected over the past few days.*

*The agent's decision-making model is built on the basis of a fully-connected artificial neural network and takes the current state of the environment as input. The neural network weights are optimized using Deep Q-learning algorithm. For validation of trained agent, its effectiveness was compared to the effectiveness of the other three strategies: the full quarantine strategy, the ignore strategy, and the random action strategy. Also, agents who have been trained in environments parameterized by one country have been tested on environments based on other countries. The results of the comparison showed that in most cases an agent trained in a certain country shows more effective policy than other agents. From this we can conclude that sociodemographic distributions play an important role in the process of finding an optimal lockdown policy.*

**Key words:** *reinforcement learning, intelligent agent, artificial intelligence, epidemiology.*

**Стаценко Д.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Осипенко В.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Злотенко Б.М.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Кулік Т.І.**

Київський національний університет технологій та дизайну

**Стаценко В.В.**

Київський національний університет технологій та дизайну

## СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ КІБЕРЗАГРОЗ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ ТА МЕРЕЖАХ

*У статті розглянуті тенденції кіберзагроз за 2020 рік та першу половину 2021 року. Наведено приклади змін ландшафту кіберзагроз та їх вплив на комп'ютерні системи і мережі організацій у зв'язку із глобальними подіями 2020 року. Наголошено, що щороку з метою зниження негативних наслідків від кіберзагроз інвестиції у сферу інформаційної безпеки зростають. Проте загальна кількість кіберзагроз не зменшується, а, навпаки, збільшується.*

*В аналізі останніх публікацій та досліджень наведена інформація про три масштабні кібератаки на міжнародні організації. Зауважено, що за останні три місяці від кібервимагачів постраждали Colonial Pipeline, JBS S.A., Kaseya. Загальна сума збитків може сягати понад 100 млн доларів США.*

*Розглянуті та проаналізовані різні категорії шкідливого програмного забезпечення, яке використовувалося зловмисниками протягом останніх декількох років. Проведено аналіз витоку даних, викрадених особистих записів та зміни тенденцій у цій категорії кіберзагроз на фоні переходу організацій на дистанційний режим роботи у 2020 році. Наведено статистику розроблених нових версій програм-вимагачів за першу половину 2021 року та 2020 рік. Наголошено, що цей тип шкідливого програмного забезпечення несе велику загрозу комп'ютерним системам та мережам як організацій, так і окремих користувачів. Наведені правила стратегії оборони інформаційних систем організацій, що використовуються для зниження ризиків ураження комп'ютерних систем та мереж. Наведені дані про нові версії шкідливого програмного забезпечення в категоріях Office, Power Shell, Java Script, Coin Miner, Mobile, Malicious Signed Binaries, Mac OS, Exploit Linux, Io Tmai OS. Наведено дані, що більшість успішних кібератак відбулися в результаті людської помилки.*

*У висновку наведено рекомендації щодо необхідності постійного покращення категорій кібербезпеки.*

**Ключові слова:** кібербезпека, комп'ютерна система, комп'ютерна мережа, Інтернет, шкідливе програмне забезпечення, витік даних, програма-вимагач.

**Постановка проблеми.** Питання, пов'язані з кібербезпекою, з кожним роком стають усе більш розповсюдженими та важливими. Розвиток інформаційних технологій приводить до їх упродовження у важливі сфери людської життєдіяльності. Зростає кількість кіберзагроз, а їх ландшафт постійно змінюється. Наприклад, протягом останнього року відбувся масовий перехід на дистанційну роботу, що призвело до зростання атак на засоби віддаленого доступу, що стали ланд-

шафтом кіберзагроз для організацій, які попередньо з цим не стикалися [1, с. 4–7]. В загальному вигляді до ландшафту кіберзагроз входять уразливості, різноманітне шкідливе програмне забезпечення, різні групи зловмисників та їх методи, що несуть загрозу залежно від конкретної ситуації. На зміну ландшафту загроз можуть впливати такі фактори, як: 1) поява нових або розкриття наявних уразливостей, що у свою чергу дає змогу зловмисникам використовувати нові можливості для

атаки; 2) розроблення нових апаратних платформ, підходів до обробки даних; 3) глобальні події, що призводять до зміни інфраструктури організацій [2, с. 17–30].

Протягом останніх років інвестиції у сферу забезпечення кібербезпеки постійно зростають, і ця тенденція не змінюється. Уразливості кібербезпеки організацій можуть призводити до негативних наслідків, економічних та репутаційних втрат. Проте станом на сьогодні недостатньо інвестувати лише у захист, необхідно також покращувати загальну стратегію безпеки. У загальному вигляді організації мають упроваджувати узагальнену концепцію взаємозв'язку трьох основних етапів стратегії кібербезпеки, таких як визначення, захист та реагування на кіберзагрози.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** З кожним роком зростає кількість фахівців та науковців багатьох країн світу, що займаються питаннями, пов'язаними з кібербезпекою [3–5]. Незважаючи на це, кількість кіберзагроз не знижується. Відповідно до офіційних даних світових компаній, пов'язаних із кіберзахистом (Risk Based Security, McAfee Labs, Cybersecurity Education & Training Solutions, Mitre тощо [6–9]), протягом першої половини 2021 року було зафіксовано 2967 випадків витоку даних, до зловмисників потрапило 18,751 млрд особистих записів юридичних та фізичних осіб, серед яких: соціальна мережа Facebook (533 млн записів), один із великих постачальників рецептурних препаратів у США CVSHealth (1,16 млрд записів), міжнародна брокерська компанія FBS Markets Inc. (16 млрд записів). Порівняно з першою половиною 2020 року відбувся спад кількості випадків витоку даних, а саме було зафіксовано 3233 випадки витоку даних, а до кіберзлочинців потрапило 36,132 млрд особистих записів.

Водночас діє інший напрям кіберзлочинів, пов'язаний із вимаганням. Так, 7 травня 2021 року відбулася масштабна атака хакерської групи [10], в результаті чого робота трубопровідної системи Colonial Pipeline була зупинена на 5 днів, за деякими даними, перед зупинкою також було викрадено інформацію обсягом 100 Гб [11]. Система була уражена шкідливим програмним забезпеченням (ПЗ): найбільш імовірно, вірус потрапив до мережі за допомогою фішингового листа, який прийшов до адміністративної частини бізнес-сегменту мережі [12], а потім почав заражати критично важливі елементи системи. У результаті цього компанія Colonial Pipeline офіційно підтвердила, що була вимушена заплатити вимагачам 4,5 млн доларів США.

Також за останні три місяці були проведені ще 2 масштабні кібератаки [13]. Перша, на бразильську м'ясопереробну компанію JBSS.A., відбулася 30 травня 2021 року, в результаті чого протягом декількох днів підприємство було вимушене зупинити виробництво у країнах, які входили до мережі компанії, а саме у США, Канаді та Австралії. JBSS.A. була вимушена заплатити 11 млн доларів США викупу. Друга подібна негативна подія мала місце з американською компанією Kaseya, яка працює у сфері постачання корпоративного ПЗ, у результаті чого постраждали також і користувачі цієї організації, які знаходяться в США та європейських країнах. Сума, яку вимагають зловмисники, сягає 70 млн доларів США у біткоїнах. Імовірно, за двома останніми атаками стоїть одна хакерська група [13], за попередніми даними, кіберзлочинці використовували вразливості нульового дня, подібні до тих, що використовувалися під час масового зараження комп'ютерним вірусом WannaCry [14]. Аналогічно до цього робота операційної системи блокується, а всі файли, що знаходяться на уражених технічних засобах, шифруються.

Вищенаведений огляд лише підкреслює актуальність та необхідність аналізу та проведення постійних досліджень у сфері кібербезпеки.

**Постановка завдання.** Метою роботи є аналіз сучасних напрямів розвитку кіберзагроз, які призводять до негативних наслідків у комп'ютерних системах та мережах організацій і приватних осіб, і надання рекомендацій щодо побудови ефективної стратегії безпеки, яку можна коригувати до зміни ландшафту кіберзагроз.

**Виклад основного матеріалу.** На рис. 1 та рис. 2 наведені дані за перші 6 місяців останніх 7 років про кількість випадків витоку даних та викрадення записів [6, 7].

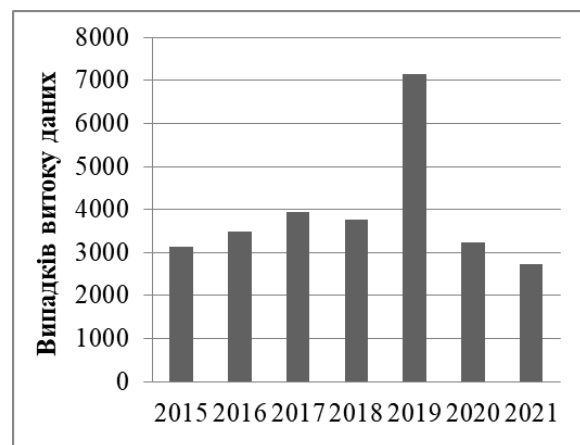


Рис. 1. Кількість випадків витоку даних

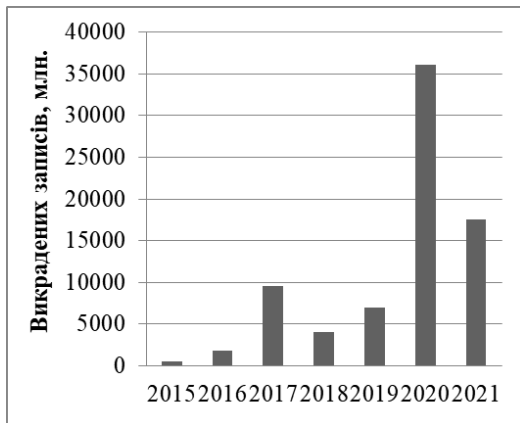


Рис. 2. Кількість випадків викрадення записів

Подібне зменшення кількості випадків витоку даних у першій половині 2021 року порівняно з аналогічним періодом 2020 року може бути пов'язано з адаптацією стратегій кібербезпеки до масового переходу працівників різних організацій на дистанційну роботу у зв'язку з пандемією COVID-19.

Спираючись на результати даних, наведених на рисунках 1 та 2, наданих компанією Risk Based Security, можна зробити висновок, що кількість випадків витоку даних більшою частиною не змінювалося, проте кількість викрадених записів за останні роки зросла.

Варто зазначити, що зібрані дані не є остаточними, до них не входять випадки витоку даних, які не були визначені службами безпеки організацій, або випадки, коли фізичні чи юридичні особи не надавали звітність стосовно компрометації своїх систем.

Крім того, більша частина випадків викрадення записів припадає на декілька великих організацій, які працюють та зберігають мільйони записів. Як уже зазначалося, протягом перших 6 місяців 2021 року відбулося два масштабних витоки даних, що включають у себе більшість викрадених даних, а саме 17693 млн записів, які належать компаніям FBS Markets Inc., CVSHealth та Facebook.

На рис. 3 наведена офіційна статистика визначених унікальних програм-вимагачів, які використовуються для зараження програмного забезпечення, електронних даних та іншої інформації з метою вимагання грошей, за 2020 рік та за перший квартал 2021 року.

Аналіз відомих випадків зараження ПЗ вірусами програм-вимагачів показав, що найбільшу загрозу вони несуть для великих організацій та підприємств. Під час зараження таких компаній відбувається блокування великої кількості робочих місць, автоматичних технічних засобів виробництва, які входять до локальної мережі. Одночасно

паралізується робота більшості комп'ютерних систем, у результаті чого компанія несе фінансові та репутаційні втрати і вимушена або платити зловмисникам, або чекати на розблокування програмного забезпечення та дешифрування, відновлення даних службами інформаційної безпеки.

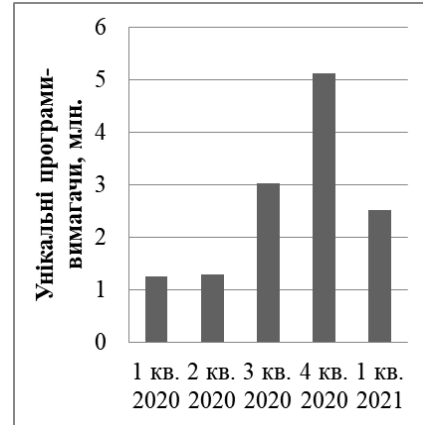


Рис. 3. Кількість унікальних програм-вимагачів за 2020 рік і початок 2021 року

Окрім програм-вимагачів, кількість шкідливого програмного забезпечення з кожним роком збільшується. На діаграмі (рис. 4) показана кількість нових версій комп'ютерних вірусів, створених протягом 2018, 2019, 2020 років та першого кварталу 2021 року, а також загальна кількість наявного шкідливого ПЗ.

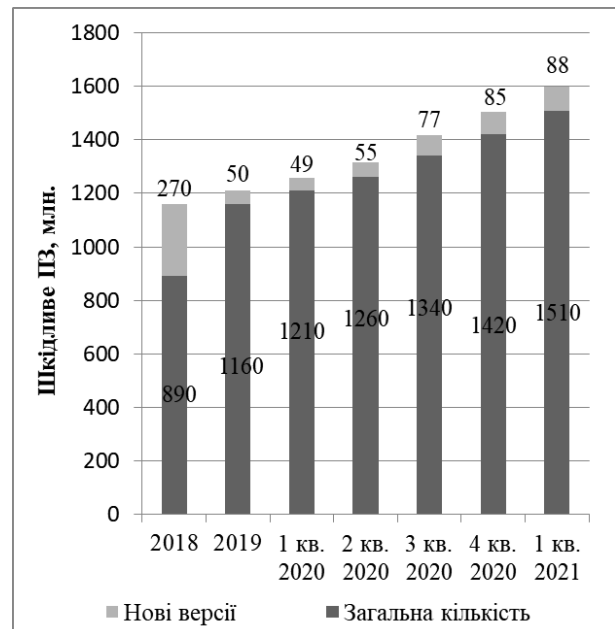


Рис. 4. Загальна кількість шкідливого ПЗ і нових за 2020 рік та 1 кв. 2021 року

Протягом 2020 року кількість шкідливого програмного забезпечення збільшилося більше

ніж на 200 млн. Аналізуючи результати даних за останні три роки і донині, бачимо, що відбулося збільшення загальної кількості таких об'єктів майже в два рази.

Розглянемо конкретніше шкідливе ПЗ, яке було розроблено протягом 2019 та 2020 років за типами, наведеними на рис. 5.

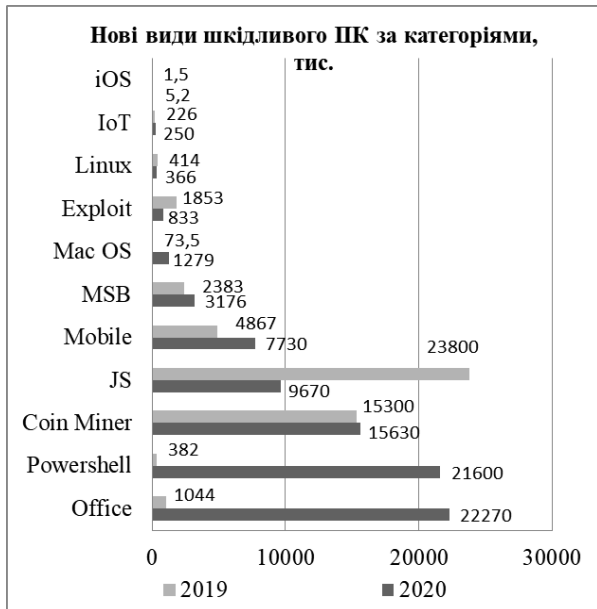


Рис. 5. Кількість нових версій комп'ютерних вірусів за 2019–2020 рр.

Найбільша кількість нових версій вірусів була створена в категоріях Office (шкідливе ПЗ, яке вбудовується в програмні додатки, наприклад Microsoft Office) та Power Shell (віруси, які вносять зміни до командної оболонки). Порівняно з минулим роком їх кількість зросла у 21 раз та у 56 разів відповідно.

Найбільше зменшення серед нових версій, у 2,5 рази, відбулося в категорії JS (віруси, які діють, використовуючи Java Script, розташовані на веб-сайтах та завантажуються до операційної системи за допомогою браузерів).

Шкідливе ПЗ, пов'язане з майнінгом криптовалют (Coin Miner), протягом останніх двох років продовжує збільшуватися, за перший квартал 2021 року кількість нових версій зросла на 6,05 млн [7]. Незважаючи на спад курсу криптовалют, кіберзлочинці, які використовують віруси для збагачення без використання обладнання для майнінгу, продовжують розробляти нові версії ПЗ, що загрожують працездатності персональних комп'ютерів (ПК).

Наступна категорія, Mobile, включає в себе шкідливе програмне забезпечення, яке несе шкоду мобільним приладам. Спираючись на дані,

наведені на діаграмі (рис. 5), у 2020 році кількість нових версій збільшилася у 1,5 рази порівняно з попереднім 2019 роком. Наведена категорія вміщує віруси таких видів, як: банківські віруси, мобільні програми-вимагачі, мобільні програми для збору та передачі особистої інформації зловмисникам, MMS- та SMS-віруси. Захист від такого шкідливого ПЗ спирається на такі ж правила, що і для ПК, а саме використання антивірусного ПЗ, перевірки електронних листів на фішинг, використання захищеного Wi-Fi-з'єднання.

Також відбувається зростання нових версій у категорії MSB (Malicious Signed Binaries). Віруси цього типу маскуються під виконавчі файли з цифровим підписом, які підтвержені ОС і тому можуть бути не розпізнані програмами захисту.

За 2020 рік збільшилася кількість нового шкідливого ПЗ у категорії MacOS. Кількість нових версій програм типу Exploit за минулий рік зменшилася порівняно з 2019 роком у 2,2 рази, це ПЗ по своїй суті не є вірусами у звичайному розумінні, вони є інструментом, за допомогою якого, використовуючи уразливості системи, шкідливе ПЗ дистанційно потрапляє до комп'ютерних систем.

Кількість нових сигнатур в категоріях Linux та IoT за останні два роки значно не змінилася. Проте необхідно зазначити, що категорія IoT (Internet of Things) є доволі новою, при цьому захист обладнання, яке підключено до мережі «Розумний будинок», знаходиться не на високому рівні і має велику кількість уразливостей, що може призвести до негативних наслідків для кінцевих користувачів.

Остання розглянута категорія – iOS. До неї входить шкідливе ПЗ, яке розроблюється для мобільних систем, що використовують операційну систему iOS. За видами воно підрозділяється так само, як і в категорії Mobile, яка була розглянута вище. Користувачі пристроїв на базі iOS стикаються з аналогічними проблемами, що і користувачі Android та Windows Mobile.

Відповідно до звітів MITRE ATT&CK [9], за перший квартал 2021 року кіберзлочинці використовували такі методи, пов'язані з постійними загрозами підвищеної складності APT.

На першому місці серед використаних методів стоїть цільовий фішинг. Як уже було зауважено у аналізі останніх досліджень та публікацій, ураження Colonial Pipeline відбулося за допомогою саме цього методу. На другому місці знаходяться різноманітні інструменти Exploit, що використовують уразливості програм, які доступні не тільки через локальну мережу, а й через Інтернет,

наприклад електроні поштові скриньки, програми типу Moodle та інші. Далі йдуть методи, пов'язані із зараженням та використанням командного рядку (commands hell та/або PowerShell).

Проте необхідно зазначити таке: більше ніж 90% випадків проникнення зловмисників у мережі організацій або приватних осіб відбувається у результаті людського фактору. Тому фішинг та соціальна інженерія є одними з основних методів, за допомогою яких кіберзлочинці обходять системи безпеки та досягають поставленої мети. Останні звіти організацій, що займаються кіберзахистом, підтверджують це твердження. Для зниження ефективності подібних методів необхідно проводити навчальні заняття з підвищення кваліфікації працівників організацій у сфері кібербезпеки.

Для зниження ризиків зараження комп'ютерної техніки, що входить до мережі організацій, використовують такі правила стратегії оборони [2, 4].

По-перше, мережа повинна бути сегментована, фізична частина розділена на різні логічні підмережі, до кожної з них додані інструменти служб керування безпекою підмереж.

Наступний етап передбачає встановлення декількох рівнів захисту та служб керування безпекою, які будуть відповідати за кожний із цих рівнів. Це підвищить безпеку мережі шляхом затримки атак на кожен із рівнів захисту, а датчики, які включені до кожного рівня, будуть повідомляти про незвичайні події.

Вищевказане може бути основою для формування стратегії безпеки з метою нейтралізації уразливостей мережі таким чином:

1) Керування оновленнями, що відповідають за виправлення уразливостей програмного забезпечення.

2) Захист серверного обладнання за допомогою використання політик безпеки.

3) Ізоляція мережі.

4) Встановлення антивірусного програмного забезпечення та брандмауера на комп'ютерні системи, що під'єднані до глобальної мережі.

5) Системи резервного копіювання: як прості, що передбачають наявність запасних копій, що зберігаються на окремих, від'єднаних від мережі організацій технічних засобах, так і складні, що використовують технології створення запасних

копій під час роботи системи з визначеним часовим інтервалом.

6) Використання віртуальних приватних мереж (VPN); наприклад, під час дистанційної роботи з базами даних організації виникає необхідність дистанційного підключення до робочого місця, використання стороннього програмного забезпечення не рекомендується, а використання віддаленого робочого столу (RDP) – найбільш уразлива частина, тому що відсутнє будь-яке шифрування. Проте до недоліків VPN можна віднести складність налаштування, додаткові витрати, наявність широкого пропускового Інтернет-каналу. Також у випадку викрадення пристрою з налаштованим автоматичним під'єднанням VPN система буде скомпрометована.

7) Забезпечення неможливості фізичного доступу до комп'ютерних систем мережі зловмисниками. Персона, яка має фізичний доступ до мережі, може, використовуючи програмне забезпечення, отримати адміністративний доступ до мережі.

8) Проведення запланованих освітніх курсів із метою підвищення рівня знань з інформаційної безпеки для працівників організацій.

Якщо в процесі роботи організації виникають потреби додавання нових елементів, наприклад додаються хмарні технології, елементи «Інтернету речей» або інші, тоді необхідно переглянути всю стратегію безпеки мережі спочатку, з метою врахування необхідності додати нові рівні безпеки та пошуку уразливостей, що можуть з'явитися у процесі розширення сегментів мережі.

**Висновки.** Проведений аналіз останніх тенденцій кіберзагроз у комп'ютерних системах та мережах показав, що, незважаючи на протидію кіберзагрозам, показник кількості постраждалих юридичних та фізичних осіб залишається високим. Окрім цього, фактор людської помилки надає зловмисникам можливість проведення успішної атаки на комп'ютерні пристрої та мережі організацій.

Загальний висновок із виконаного аналізу може свідчити про таке. Якщо не створювати нові, в тому числі інтелектуальні системи кібербезпеки, не виконувати постійного професійного аналізу шкідливого ПЗ, пошуку та усунення уразливостей, не проводити постійного навчання співробітників компаній тощо, то втрати будуть значно вищими.

#### Список літератури:

1. Global Threat Landscape Report. A Semiannual Report by FortiGuard Labs. URL: <https://www.fortinet.com/content/dam/fortinet/assets/threat-reports/threat-report-2h-2020.pdf>
2. Диогенес Ю., Озкая Э. Кибербезопасность: стратегии атак и обороны / пер. с англ. Д. А. Беликова. – М.: ДМК Пресс, 2020. – 326 с.



3. Z. Balogh and M. Magdin, The problems of data security in cloudcomputing and its solution using petri nets, Lecture notes in electricalengineering, Springer, vol. 428, 2018, pp. 123–135.
4. Бараненко Р.В. Аналіз методів протидії кібератакам / А.Ю. Задорожна, Р.В. Бараненко/Юридичний-біюлетень. 2018. № 6. С. 148–161.
5. Бурячок В.Л. Інформаційна та кібербезпека: соціотехнічний аспект : підручник / В.Л. Бурячок, В.Б. Толубко, В.О. Хорошко, С.В. Толюпа. Київ : ДУТ, 2015. 288 с.
6. Risk Based Security Reports. URL: <https://www.riskbasedsecurity.com/quickviewreports/>
7. McAfee Labs Threats Reports. URL: <https://www.mcafee.com/enterprise/ru-ru/threat-center/mcafee-labs/reports.html>
8. Cybersecurity Education & Training Solutions. 15 Alarming Cyber Security Facts and Stats. URL:<https://www.cybintsolutions.com/cyber-security-facts-stats/>
9. MITRE ATT&CK. URL: <https://attack.mitre.org/>
10. Christopher Bing, Stephanie KellyCyber attack shuts down U.S. fuel pipeline. Reuters. URL: <https://www.reuters.com/technology/colonial-pipeline-halts-all-pipeline-operations-after-cybersecurity-attack-2021-05-08/>
11. Jordan Robertson, William Turton. Colonial Hackers Stole Data Thursday Ahead of Shutdown, Bloomberg News. URL:<https://www.bloomberg.com/news/articles/2021-05-09/colonial-hackers-stole-data-thursday-ahead-of-pipeline-shutdown>
12. Joe Tidy. Colonial hack: How did cyber-attackers shut off pipeline? BBC. URL: <https://www.bbc.com/news/technology-57063636>
13. Joe TidyUS companies hit by 'colossal' cyber-attack. BBC. URL: <https://www.bbc.com/news/world-us-canada-57703836>
14. Pascal Ackerman. Other attack scenarios // Industrial Cybersecurity. Efficiently secure critical infrastructure systems. – Birmingham: Packt Publishing, 2017. P. 174.

#### **Statsenko D.V., Osypenko V.V., Zlotenko B.M., Kulik T.I., Statsenko V.V. CURRENT CYBER THREATS TRENDS ANALYSIS IN COMPUTER SYSTEMS AND NETWORKS**

*The article considers the cyber threats trends for the 2021 and 2020. Examples of changes in the landscape of cyber threats and their impact on computer systems and networks of organizations in connection with the global events of 2020 are given. It is emphasized that every year, in order to reduce the negative effects of cyber threats, investment in information security is growing. However, the total number of cyber threats is not decreasing, but rather increasing.*

*An analysis of recent publications and research provides information on three large-scale cyber-attacks on international organizations. It has been noted that in the last three months, Colonial Pipeline, JBS S.A., and “Kaseya” have suffered from cybercriminals. The total damage could reach more than 100 million US dollars.*

*Various categories of malware used by attackers over the past few years are reviewed and analyzed. An analysis of data breaches, lost records and how trends in this cyber threats category have changed against the background of the organizations transition to remote operation in 2020. Statistics of new versions ransom ware developed during the first half of 2021 and 2020 are presented. It is emphasized that this type of malware poses a great threat to computer systems and networks, both organizations and individual users. The organizations information systems protection strategy rules which are used for defeat risks reduction of computer systems and networks are resulted. Data on new versions of malware in the category of Office, PowerShell, JavaScript, Coin Miner, Mobile, Malicious Signed Binaries, Mac OS, Exploit Linux, IoT and iOS are presented. It is reported that most successful cyber-attacks occurred as a result of human error.*

*The conclusion provides recommendations on the need for continuous improvement of cyber security categories.*

**Key words:** *cyber security, computer systems, computer network, Internet, malware, data breach, ransom-ware.*

**Ушкаренко О.О.**

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

## МЕТОД АНАЛІЗУ ПРОЦЕСІВ ПЕРЕТВОРЕННЯ ДАНИХ В ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ ВУЗЛАХ ЦИФРОВИХ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ

*У статті розглядається метод аналізу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів в обчислювальних вузлах цифрових систем управління. Визначені обмеження та недоліки формальних методів, які використовуються для опису процесів обробки даних у цифрових системах управління, запропоновано метод опису процесів перетворення аргументів з використанням графоаналітичних моделей. Запропоновано спосіб аналітичного запису процесу перетворення вхідних даних, який більш узгоджений зі структурними схемами, в яких функції представлені у вигляді логічних елементів. Розроблено математичні моделі процесів перетворення аргументів, які являють собою формалізований запис процесів перетворення сигналів. Проведено дослідження логіко-динамічних процесів перетворення цифрових кодів, що відбуваються в суматорах і помножувачах у складі цифрових систем управління. Позиційно-знакова система числення дозволяє істотно підвищити швидкодію суматорів і помножувачів в цифрових системах управління. При цьому з'являється необхідність у формуванні науково обґрунтованих аналітичних правил перетворення логічних аргументів і функціональних структур, за допомогою яких вони реалізуються. Аналітичний опис процесів перетворення інформаційних аргументів у цифрових системах управління дозволяє формувати їх математичні моделі з підвищеними технологічними та інформаційними якостями, а також вирішувати оптимізаційні задачі. Процес додавання в арифметичних пристроях реалізується у відповідності з логікою перетворення аргументів трійкової системи числення. Теоретичною основою процесу додавання аргументів, реалізованих у форматі двійкової системи числення, можуть бути аксіоми трійкової системи числення. Запропонований підхід дозволяє оцінити швидкодію виконуваних арифметичних операцій при використанні різних цифрових кодів, відкриває можливість вдосконалення методів і алгоритмів обробки даних в цифрових системах управління.*

**Ключові слова:** суматор, позиційно-знакова система числення, часткові добутки, функціональна структура, графоаналітична модель.

**Постановка проблеми.** Одним із завдань сучасної теорії автоматичного управління (ТАУ) є розроблення нових методів формалізованого запису різних логіко-динамічних процесів перетворення цифрових сигналів. Цей формалізований запис процесів перетворення сигналів повинен бути виконаний у вигляді аналітичних символів, які повинні формувати математичну модель. При цьому основною якістю математичної моделі логіко-динамічного процесу перетворення сигналів повинна бути мінімізація словесного опису їх змісту. Також ТАУ може аналізувати системи управління і синтезувати для них закони. Однак цього недостатньо з огляду на різноманіття процесів управління. Тому актуальним є завдання створення математичного апарату, який дозволив би об'єднати процеси управління, що мають різну фізичну, організаційну та цільову природу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Будь-який формалізований процес в своєму запису включає різноманітні процеси перетворення сигналів, наприклад оптичні, електрохімічні, електро-

механічні. Також це можуть бути електронні, представлені у вигляді функціональних блоків системи управління і контролю, наприклад Matlab Simulink [1, с. 12]. Тому для кожного процесу перетворення розроблений свій метод формального опису. Актуальність роботи зумовлена необхідністю формування науково обґрунтованих аналітичних правил перетворення логічних аргументів і функціональних структур, за допомогою яких вони реалізуються. Крім того, розвиток графоаналітичних рішень щодо обробки даних у цифрових системах управління дозволить на якісно новому рівні аналізувати логіко-динамічні процеси перетворення аргументів. Результатом виконання такого аналізу може виступати оцінка швидкодії виконання арифметичних операцій при використанні різних цифрових кодів. У свою чергу це відкриває можливість вдосконалення методів і алгоритмів обробки даних в цифрових системах управління.

У роботі [2, с. 2450] розглянуті методи аналізу систем і відзначені переваги та недоліки кожного з них при вирішенні різних оптимізаційних задач.

Зокрема зазначено, що однією з проблем при оптимізації систем або алгоритмів є обмеження застосовності конкретного методу через особливості процесів, що відбуваються в системах різної фізичної природи. Відсутність єдиного математичного апарату для опису процесів в системах, які мають різну фізичну природу, зумовлюють необхідність проведення досліджень у цьому напрямі. Це також підтверджується дослідженнями [3, с. 35], в якому зазначено, що аналіз системи на різних рівнях декомпозиції вимагає застосування різних методів. Слід зазначити, що кожен із методів формального відображення має свої переваги, а точніше, свої структурні якості, які необхідно зберегти і посилити структурними якостями інших методів формального відображення.

Під час проектування цифрових систем керування найбільш широко використовуються структурні і принципові схеми. При цьому для аналізу таких систем використовуються часові діаграми, як це показано в [4, с. 390]. У [5, с. 226; 6, с. 20] наголошується на необхідності підвищення швидкодії обробки даних. Для цього потрібне використання формалізованих методів аналізу процесів перетворення даних, які дозволяли б оцінити швидкодію алгоритмів.

Одним з методів аналізу і синтезу процесів перетворення аргументів у системах управління є метод формування алгоритмів та структурних схем. Але ці методи не дозволяють виконувати ці процедури на формалізованому рівні. У [7, с. 768] розглянуто процес синтезу швидкодіючих елементів, що виконують арифметичні операції. Для опису системи використані структурні схеми. При цьому відсутній формальний опис процесів перетворення даних, що ускладнює розуміння принципів перетворення інформації, яке виконує система. Це пов'язано з тим, що вони не є функціонально закінченими математичними моделями, що мають аналітичну форму запису.

Одним із можливих методів підвищення якості аналізу логіко-динамічних процесів з підвищеним інформаційним змістом є аналітичний і графоаналітичний методи. Такі методи успішно використовуються під час проектування та аналізу ієрархічних програмних систем, як показано в [8, с. 42]. З їх допомогою з'являється можливість аналізу коректності процесів перетворення сигналів у різних системах управління. Однак розглянуті в [8, с. 45] методи незастосовні до аналізу апаратних вузлів обчислювальних пристроїв.

Проблема необхідності об'єднання двох аналітично несумісних логіко-динамічних процесів у вищій математиці називається крайовою зада-

чею [9, с. 64]. Крайова задача може бути вирішена методом, який включає розроблення загальної структурної і функціональної мови опису процесів перетворення. При цьому запис процесів перетворення повинен виконуватися на аналітичному рівні у вигляді єдиної математичної моделі. Оскільки аналітична форма запису необхідна для подальшої формалізованої оптимізації конкретного процесу, необхідно зробити математичну модель легкою для запису і надати їй максимальний інформаційний зміст. У [10, с. 121] пропонується метод синтезу математичних моделей логіко-динамічних процесів контролю і керування в галузі електроенергетики. Результати досліджень, наведені в [11 с. 43; 12, с. 278], підтверджують ефективність використання розроблених формальних методів і моделей під час аналізу та оптимізації систем управління. Однак ці формальні методи потребують розвитку з урахуванням особливостей функціонування та способів подання інформації в обчислювальних пристроях.

**Постановка завдання.** Аналіз літературних джерел показав, що нині отримали недостатній розвиток методи аналізу процесів перетворення даних, що відбуваються в обчислювальних пристроях цифрових систем управління. Залишається невирішеною проблема аналітичного опису процесів перетворення аргументів, які беруть участь в різних алгоритмах програм із метою їх оптимізації, зокрема збільшення швидкості виконання арифметичних операцій. Це особливо актуально для систем управління, що працюють у режимі реального часу.

З розвитком мікропроцесорної техніки та її широкого застосування в системах управління стає необхідним використовувати аналітичні інформаційні технології для аналізу і синтезу різних систем управління. Для цього необхідно представити процеси перетворення аргументів в системах управління в аналітичній формі записи, і встановити формалізовані методи їх коригування з урахуванням виникаючих проблем.

**Метою дослідження** є вдосконалення методу для аналізу логіко-динамічних процесів перетворення аргументів з використанням графоаналітичних моделей, визначення їх властивостей і логіки перетворення аргументів для використання при роботі та оптимізації цифрових систем управління.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** В якості узагальненої функціональної структури для математичної моделі процесу логіко-динамічного перетворення сигналу повинен бути обраний символ. Як такий символ для синтезу конкретних функціональних структур необхідно

використовувати фундаментальний вираз математичного аналізу [9, с. 81]:

$$y = f(x). \quad (1)$$

Якщо розглянути вираз (1) як процес перетворення аргументів, то в цьому випадку  $y$  є виконання деяких операцій  $f(\rightarrow)$  на вхідному аргументі  $x$ , тому це кінцевий результат цих операцій. Відповідно, беручи до уваги елементи функціональної структури, які є невід'ємним часовим параметром, можна записати цей вираз у вигляді:

$$f(x) \rightarrow y. \quad (2)$$

Узагальнений опис процесу перетворення аргументів (2) можна проаналізувати, приймаючи до уваги узгодженість запису блок-діаграм обчислювальних засобів і систем управління. Цей вираз може бути представлено в цілому як процес перетворення аргументу  $x$  в аргумент  $y$ .

Запропонований спосіб аналітичного запису процесу перетворення аргументів більш узгоджений зі структурними схемами, в яких функції представлені у вигляді логічних елементів, які є електронними системами. Тому, якщо замість геометричного зображення логічного елемента використовувати математичний знак системи ( $\&$ ), то, наприклад, для елемента « $\&$ » аналітичний запис може бути представлений у вигляді, показаному на рис. 1.

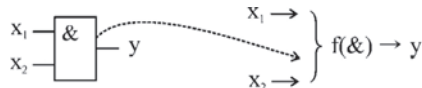


Рис. 1. Аналітичне представлення логічного елемента « $\&$ »:  $x_1$  і  $x_2$  – вхідні аргументи,  $f(\&)$  – логічна функція « $\&$ »

Спосіб аналітичного запису (2) процесу перетворення аргументів може бути використаний для аналітичного запису функціональних структур, в яких функціонально закінчені елементи представлені у вигляді функціональних блоків. Наприклад, аналітичний запис функціональних блоків аналого-цифрового і цифро-аналогового перетворення має вигляд:

$$U_{in} \rightarrow U_{in}, [m_i] \rightarrow [m_i] \\ [m_i] \rightarrow [m_i] U_j \rightarrow U_{out} \quad (3)$$

У сучасних мікропроцесорних системах управління числа, записані в двійковому коді, можуть бути представлені в графоаналітичному вигляді (рис. 2):

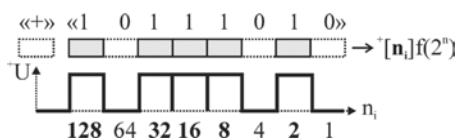


Рис. 2. Представлення чисел в двійковому коді

Якщо записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів часткових добутків, наприклад, для додатних аргументів помножувачів

$$\langle -/+ \rangle [m_j] f(+/-) \rightarrow \langle +1 \rangle \langle 1011 \rangle \rightarrow \langle +5 \rangle f(10)$$

і

$$\langle -/+ \rangle [m_j] f(+/-) \rightarrow \langle +1 \rangle \langle 1101 \rangle \rightarrow \langle +3 \rangle f(10)$$

у вигляді, представленому на рис. 3, то логіка формування часткових добутків арифметно коректна.

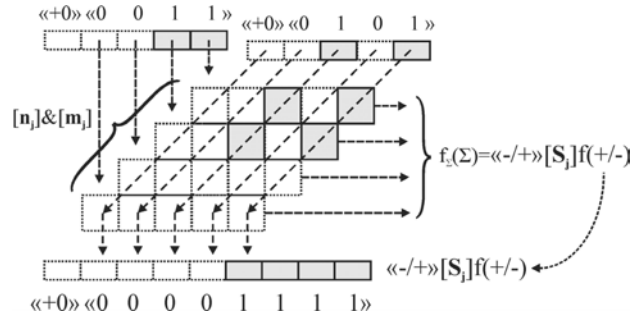


Рис. 3. Перетворення аргументів часткових добутків

Однак, якщо записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів часткових добутків, наприклад, для умовно від'ємних аргументів множимого  $\langle -/+ \rangle [m_j] f(+/-) \rightarrow \langle -1 \rangle \langle 1011 \rangle \rightarrow \langle -5 \rangle f(10)$  і множника  $\langle -/+ \rangle [m_j] f(+/-) \rightarrow \langle -1 \rangle \langle 1101 \rangle \rightarrow \langle -3 \rangle f(10)$  в (3), як показано на рис. 4, то без використання арифметичних аксіом трійкової системи числення  $f(+1, 0, -1)$  не зрозуміло, як були сформовані результуючі суми  $[S_j]_1, [S_j]_2, [S_j]_3$  і  $\langle -/+ \rangle [S_j] f(+/-)$  в функціональних структурах суматорів  $f_1(\Sigma) - f_4(\Sigma)$ .

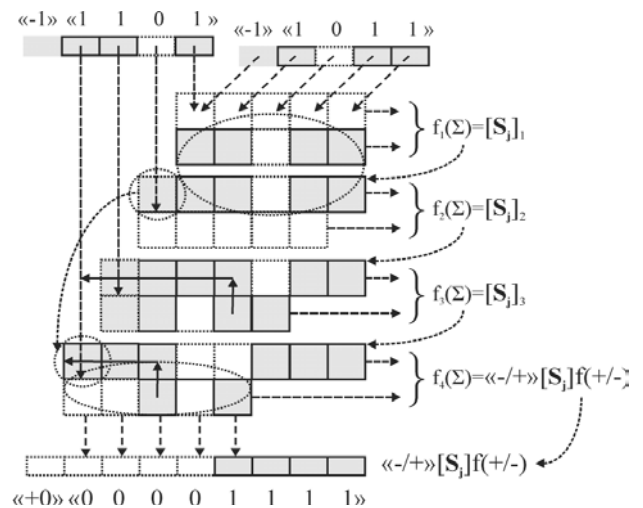


Рис. 4. Логіко-динамічний процес перетворення аргументів часткових добутків для негативних аргументів

Процедура перетворення структури аргументів множимого  $\langle -/+ \rangle [m_j] f(+/-) \rightarrow \langle -1 \rangle \langle 1011 \rangle \rightarrow \langle -5 \rangle f(10)$  в функціональній структурі суматора  $f_1(\Sigma)$  можна записати у вигляді графоаналітичних виразів, пред-

ставлених на рис. 4 і рис. 5. З їх аналізу витікає, що результуюча сума  $^{\pm}[S_j]$  сформована в результаті використання або арифметичної аксіоми « $\pm 0$ » $\rightarrow$ « $\pm 1/-1$ », або за допомогою арифметичної аксіоми « $-1$ » $\rightarrow$ « $-2$ » $\leftarrow$ « $+1$ ». Ця аксіома є не тільки арифметичною основою формування структури аргументів « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  – «Додатковий код», але і процедурою додавання умовно від’ємних аргументів.

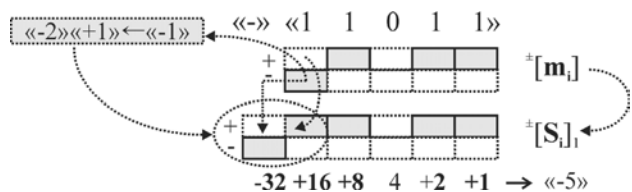


Рис. 5. Процедура перетворення структури аргументів

Необхідно виконати логіко-динамічний процес додавання умовно від’ємного аргументу доданку « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-1$ » $\leftarrow$ «10001101» $\rightarrow$ « $-69$ »  $f(10)$  виразу (рис. 6, а), і умовно від’ємного аргументу доданку « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-1$ » $\leftarrow$ «1011» $\rightarrow$ « $-5$ » $f(10)$  виразу (рис. 6, б). На попередньому етапі виконується функціональний позиційний зсув знакових розрядів доданків виразу (рис. 6, а) і виразу (рис. 6, б). Це виконується з використанням арифметичної аксіоми « $-1$ » $\rightarrow$ « $-2$ » $\leftarrow$ « $+1$ ».

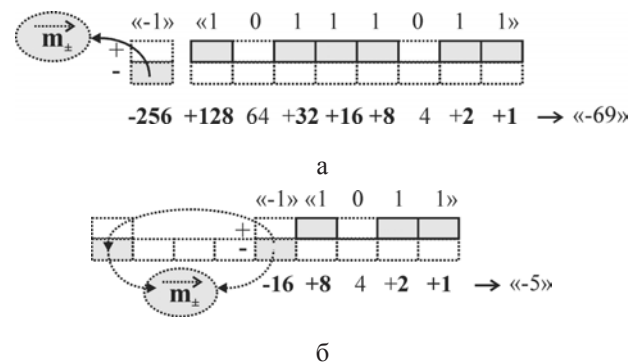


Рис. 6. Від’ємні аргументи доданків « $-69$ » та « $-5$ »

І тільки після виконання процедури функціонального зсуву знакового розряду  $m_{\pm}$  може бути виконаний в «Додатковому коді» процес додавання аргументів доданків « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-1$ » $\leftarrow$ «10001101» $\rightarrow$ « $-69$ »  $f(10)$  і « $-/+$ » $[n_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-1$ » $\leftarrow$ «1011» $\rightarrow$ « $-5$ » $f(10)$ . При цьому слід відмітити, що така дія призводить тільки до збільшення технологічного циклу  $\Delta t_2$  перетворення аргументів доданків. Якщо сформувати процедуру перетворення аргумента доданку « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-69$ » і аргументу доданку « $-/+$ » $[n_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-5$ », то процес їх додавання може бути записаний у вигляді графоаналітичного виразу (рис. 7). Після формування першої і другої проміжної суми  $^{\pm}[S_j]$

$f()$ –OR і  $^{\pm}[S_j^2]$   $f(\&)$ –AND, необхідно виконати процедуру логічного диференціювання структури аргументів першої проміжної суми  $^{\pm}[S_j^1]$   $f()$ –OR. Після цього може бути сформована скоригована структура похідних аргументів  $^{\pm}[S_j^1]$   $d/dn^+$ .

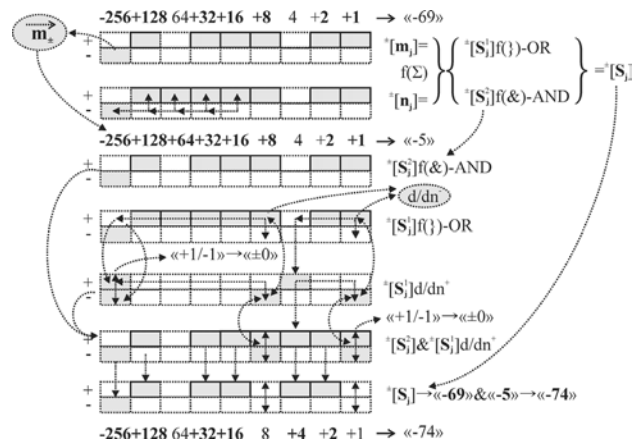


Рис. 7. Процес додавання аргументів

Затем, після функціонального об’єднання  $^{\pm}[S_j^1]$   $\&$   $^{\pm}[S_j^1]$   $d/dn^+$  структури аргументів другої проміжної суми  $^{\pm}[S_j^2]$   $f(\&)$ –I і скоригованої структури аргументів першої проміжної суми  $^{\pm}[S_j^1]$   $d/dn^+$  формується результуюча структура аргументів суми  $^{\pm}[S_j]$   $\rightarrow$ « $-/+$ » $[S_j]$   $f(+/-)$  – «Додатковий код» за допомогою зміни активності логічних нулів « $+1/-1$ » $\rightarrow$ « $\pm 0$ ». Але коректна кінцева результуюча структура аргументів суми  $^{\pm}[S_j]$  $\rightarrow$ « $-74$ » може бути сформована і без позиційного суміщення активного знакового аргументу  $m_{\pm}$  двох структур аргументів доданків « $-/+$ » $[m_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-69$ » і « $-/+$ » $[n_j]$   $f(+/-)$  $\rightarrow$ « $-5$ ». Для цього слід записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів у вигляді графоаналітичного виразу (рис. 8). Перша проміжна сума  $^{\pm}[S_j^1]$  АБО включає два умовно від’ємних аргументи знакового розряду двох доданків з інформаційним змістом  $m_{\pm}$  $\rightarrow$ « $-256$ » і  $m_{\pm}$  $\rightarrow$ « $-16$ ».

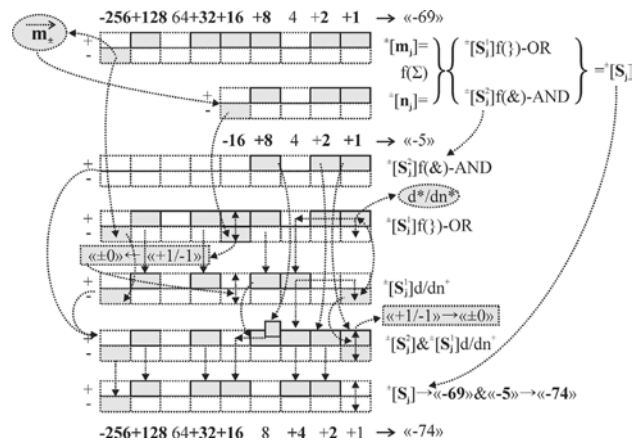


Рис. 8. Логіко-динамічний процес перетворення аргументів

При цьому аргумент знакового розряду  $m_{\pm} \rightarrow \langle -16 \rangle$  в структурі першої проміжної суми  ${}^{\pm}[S_j^1]/f(\cdot)$  – АБО формує активний логічний ноль  $\langle +1/-1 \rangle \rightarrow \langle \pm 0 \rangle$ , який перетворюється в неактивний аргумент  $\langle \pm 0 \rangle$ . Формування результируючої суми  ${}^{\pm}[S_j] \rightarrow \langle -74 \rangle$  може бути реалізовано за допомогою вибіркового логічного диференціювання  $d^*/dn^+$  структури додатних аргументів першої проміжної суми  ${}^{\pm}[S_j^1]/f(\cdot)$  – АБО. Слід відмітити, що число можливих варіантів перетворення аргументів доданків не обмежується графоаналітичним виразом (рис. 8). Якщо врахувати можливі структури позиційно-знакових структур аргументів першого варіанту  $\langle -/+ \rangle [m_j]/f(+/-)$  – «Додатковий код» і другого його варіанту, то можна стверджувати, що система числення «Додатковий код» не досконала і потребує додаткового аналізу і подальшого коригування. Якщо повернутися до графоаналітичного виразу процедури формування часткових добуток в помножувачі  $f_{\Sigma}(\Sigma)$ , то його можна записати у вигляді скоригованого графоаналітичного виразу (рис. 9). Перший частковий добуток  $[S_j]_1$  формується з прямим попереднім позиційним зсувом знакового аргументу  $m_{\pm}$  структури множимого  ${}^{\pm}[m_j]$  у відповідності з прямою арифметичною аксіомою  $\langle -1 \rangle \rightarrow \langle -2 \rangle \langle +1 \rangle$ .

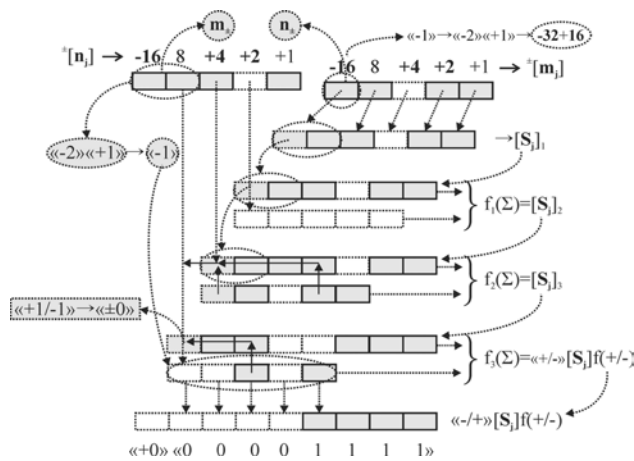


Рис. 9. Скоригований графоаналітичний вираз

Останній частковий добуток в системі функціональної структури суматора  $f_3(\Sigma)$  формується з попереднім позиційним зворотнім зсувом знакового аргументу  $n_{\pm}$  структури множника  ${}^{\pm}[n_j]$ . Вказана процедура виконується у відповідності зі зворотною арифметичною аксіомою  $\langle -1 \rangle \langle +1 \rangle \rightarrow \langle -2 \rangle$ . Це призводить до мінімізації структури множника у відповідності з графоаналітичним виразом (рис. 10).

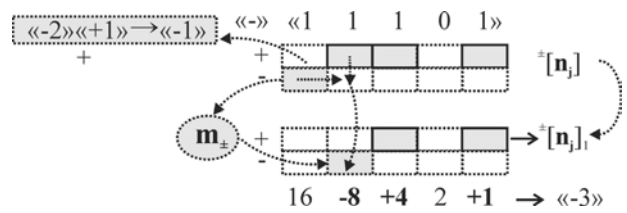


Рис. 10. Мінімізації структури множника

В структурі множника  ${}^{\pm}[n_j]$  аргумент знаку  $m_{\pm}$  сформований з умовно від’ємним змістом. В цій ситуації множимо  ${}^{\pm}[m_j]$ , як структура часткового добутку  ${}^{\pm}[m_j]$ , повинна бути записана у вигляді структури зі зміненими рівнями аналогових сигналів. Це виконується у відповідності з процедурою (рис. 11), в якій сформована структура аргументів  ${}^{\pm}[m_j]$  – «Додатковий код» з додатним інформаційним змістом.

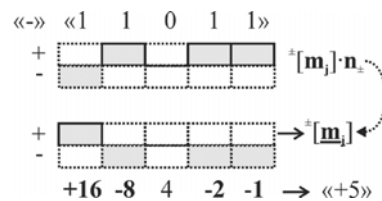


Рис. 11. Запис структури зі зміненими рівнями аналогових сигналів

Але оскільки суматор  $f_3(\Sigma)$  реалізує перетворення тільки додатних аргументів, тому структуру аргументів  ${}^{\pm}[m_j]$  виразу (рис. 11) необхідно скоригувати у відповідності з процедурою зворотнього перетворення (рис. 12).

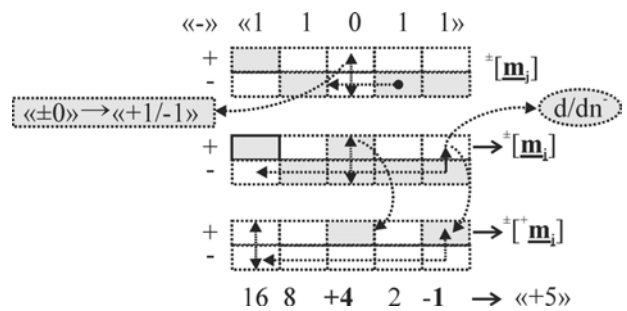


Рис. 12. Процедура зворотнього перетворення

Процедура зворотнього перетворення (рис. 12) виконується шляхом активізації аргументів логічного нуля  $\langle \pm 0 \rangle \rightarrow \langle +1/-1 \rangle$ . Потім виконується процедура логічного диференціювання  $d/dn^-$  структури умовно від’ємних аргументів з видаленням активного логічного нуля в старшому розряді. Множення включає процедуру збільшення числа активних аргументів в старших розрядах перших часткових добуток. На завершальному етапі фор-

мування структури аргументів останніх часткових добутків виконується процедура їх мінімізації. І якщо в першій ситуації технологічний цикл  $\Delta t_{\Sigma}$  перетворення часткових добутків збільшується, то в другій ситуації він, навпаки, зменшується. Основним параметром функціональної структури множника  $f_{\Sigma}(\Sigma)$  є мінімізований технологічний цикл  $\Delta t_{\Sigma}$  перетворення часткових добутків. Тому збільшення розрядності часткових добутків на перших етапах їх формування недоцільне. Можна скоригувати процедуру формування аргументів часткових добутків і записати її без збільшення розрядності. Для цього при їх додаванні необхідно ввести в функціональну структуру помножувача  $f_{\Sigma}(\Sigma)$  процедуру видалення активних логічних нулів «+1/-1» → «±0». Активні логічні нулі сформовані в результаті локальних переносів  $f_{1,2}(\leftarrow)$  додатнього аргумента з попереднього розряду. Аналогічна мінімізація структури аргументів множимого  $^{\#}[m_j]$  і процедура формування часткових добутків у вигляді графоаналітичного виразу представлена на рис. 13.

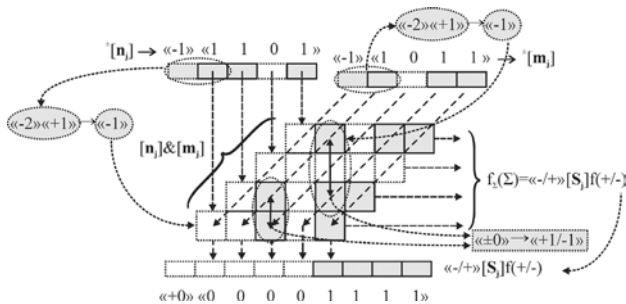


Рис. 13. Формування часткових добутків у вигляді графоаналітичного виразу

У цьому разі необхідно виконати тільки процедуру видалення активних логічних нулів в структурі часткових добутків помножувача  $f_{\Sigma}(\Sigma)$ .

Розглянутий спосіб графоаналітичної форми запису інформаційних аргументів напруги і процесів перетворення аргументів було також використано для побудови математичних моделей

підсистем аналогової обробки сигналів у складі систем керування та опубліковано в [13, с. 43]. Отримані результати було використано при розробці програмного забезпечення для мікропроцесорних систем керування, збору, обробки та відображення інформації, та опубліковано в [14, с. 8].

**Висновки.** Введення аналітичної форми запису логічних функцій з вхідними і перетвореними аргументами істотно спрощує аналіз і синтез будь-яких логіко-динамічних процесів перетворення аргументів. Перевага запропонованого в роботі методу полягає в тому, що з введенням аналітичної форми запису функціональної структури суматора  $f(\Sigma)$  з'являється можливість записати логіко-динамічний процес перетворення аргументів у вигляді узагальненого виразу. Графоаналітична форма запису дозволяє доповнити її логічним змістом за допомогою спрямованих векторів. З одного боку, це дає можливість відобразити логіко-динамічний процес перетворення аргументів на гранично мінімізованому рівні формалізації. З іншого боку, така форма запису дозволяє проводити порівняльний аналіз різних варіантів логічних процедур для подальшого вибору найбільш оптимального з них і формування математичних моделей на аналітичному рівні.

З використанням розроблених математичних моделей виконано аналіз логіко-динамічних процесів перетворення аргументів, які відбуваються в суматорах і помножувачах цифрових систем управління. Встановлено, що процес додавання логічних аргументів в арифметичних пристроях, незалежно від системи числення, реалізується у відповідності з логікою перетворення аргументів трійкової системи числення. Запропонований підхід дозволяє оцінити швидкодію виконуваних арифметичних операцій при використанні різних цифрових кодів і вибрати найбільш оптимальний. Це також відкриває можливість вдосконалення методів і алгоритмів обробки даних у цифрових системах управління.

#### Список літератури:

1. Asadi Farzin. State-Space Control Systems: The MATLAB®/Simulink Approach / Farzin Asadi // Synthesis Lectures on Control and Mechatronics. – 2020. Vol. 5. – P. 1–169.
2. Yu L. A Survey on Particle Swarm Optimization Algorithms for Multimodal Function Optimization / L. Yu, L. Xiaoxi, S. Zhewen, L. Mingwei, F. Jing, Z. Liang // Journal of software. – 2011. – Vol. 6, Issue 12. – P. 2449–2455.
3. Yudong Z. A Comprehensive Survey on Particle Swarm Optimization Algorithm and Its Applications / Z. Yudong, W. Shuihua, J. Genlin // Mathematical Problems in Engineering. – 2015. – P. 1–38.
4. Rajasekhar K. Design and Analysis of Comparator Using Different Logic Style of Full Adder / K. Rajasekhar, P. Sowjanya, V. Umakiranmai, R. Harish, M. Krishna // Int. Journal of Engineering Research and Applications. – 2014. – Vol. 4, Issue 4. – P. 389–393.

5. Asaduzzaman A. GPU Computing to Improve Game Engine Performance / A. Asaduzzaman, Y. Lee Hin // J. Eng. Technol. Sci. – 2014. – Vol. 46, Issue 2. – P. 226–243.
6. Tomislav S.I. Design of a System for Monitoring Reliability of Structures and Constructions in Civil Engineering / S.I. Tomislav, Ž.N. Veljkovi // International Journal of Engineering Pedagogy. – 2011. – Vol. 1, Issue 2. – P. 19–23.
7. Ramana, G.M. A Novel Design of Multiplexer Based Full-Adder Cell for Power and Propagation Delay Optimizations / M.G. Ramana, C. Senthilpari, P. Velraj Kumar, T.S. Lim // Journal of Engineering Science and Technology. – 2013. – Vol. 8, Issue 6. – P. 764–777.
8. Aminof B. Synthesis of hierarchical systems / B. Aminof, F. Mogavero, A. Murano // Formal Aspects of Component Software. – 2011. – P. 42–60.
9. Yingxu W. Concept Algebra: A Denotational Mathematics for Formal Knowledge Representation and Cognitive Robot Learning / W. Yingxu // Journal of Advanced Mathematics and Applications. – 2015. – Vol. 4, Issue 1. – P. 61–86.
10. Рябенський В.М. Метод синтеза математических моделей логико-динамических процессов контроля и управления / В.М. Рябенський, А.О. Ушкаренко // Техническая электродинамика. – 2011. – № 2(1), – С. 121–125.
11. Рябенський В.М. Формальное описание элементов автоматизированного рабочего места оператора электроэнергетической системы / В.М. Рябенський, А.О. Ушкаренко // Научный вестник Херсонской государственной морской академии. – 2014. – №1(1). – С. 43–50.
12. Mahmoud M.S. Al-suod. Analytical Representation of Control Processes of Induction Motor and Synchronous Generator in Power Plants / Al-suod Mahmoud M.S., O.O. Ushkarenko // Jordan Journal of Electrical Engineering. – 2016. – Vol. 2, Issue 4. – P. 278–288.
13. Ушкаренко О.О. Вдосконалення методу побудови графоаналітичних моделей компонентів електронних кіл / О.О. Ушкаренко, Н.Г. Малахова // Збірник тез доповідей XIII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформаційні технології і автоматизація – 2020», Одеська нац. акад. харч. технологій. – Одеса: ОНАХТ, 2020. – С. 43–45.
14. Рябенський В.М. Програмовані електронні системи керування, збору та обробки інформації : підручник / В.М. Рябенський, О.О. Ушкаренко. – Миколаїв : Іліон, 2021. – 490 с.

#### **Ushkarenko O.O. THE TECHNIQUE OF ANALYSIS OF DATA TRANSFORMATION PROCESSES IN COMPUTING UNITS OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS**

*In the paper the method of analysis of logical-dynamic processes of argument transformation in computing units of digital control systems has been considered. The limitations and shortcomings of the formal methods that are used to describe of the data processing in digital control systems are identified. The method of describing the processes of argument transformation using graphoanalytical models is proposed. A method for analytical representation of the input data conversion process is proposed, which is more consistent with block diagrams in which functions are represented as logical elements. Mathematical models of argument conversion processes, which are a formalized representation of signal conversion processes, have been developed. The logical and dynamic processes of digital code conversion that occur in adders and multipliers as part of digital control systems have been researched. The position-sign number system can significantly increase the speed of adders and multipliers in digital control systems. At the same time, there is a need to form scientifically approved analytical rules for the transformation of logical arguments and functional structures by which they are implemented. Analytical description of the processes of transformation of information arguments in digital control systems allows to form their mathematical models with improved technological and informational qualities, as well as to solve optimization problems. The process of addition in arithmetic devices is implemented in accordance with the logic of conversion of arguments of the ternary number system. Axioms of the ternary number system can be the theoretical basis of the process of adding arguments implemented in the format of a binary number system. The proposed approach allows to evaluate the speed of arithmetic operations using different digital codes and opens the possibility of improving methods and algorithms for data processing in digital control systems.*

**Key words:** *adder, positional-sign number system, partial products, functional structure, graphoanalytical model.*



**Shaptala R.V.**

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

**Kyselov G.D.**

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

## VECTOR SPACE MODELS OF KYIV CITY PETITIONS

*In this study, we explore and compare two ways of vector space model for Kyiv city petitions creation. In order to automatically analyze freeform texts such as petitions, they need to be converted to a numeric space. By leveraging word vectors based on the distributional hypothesis, namely Word2Vec and FastText, we construct vector models of Kyiv city petitions.*

*The overall pipeline that we contribute is training word vectors on the dataset of Kyiv city petitions, preprocessing the documents, and applying averaging to create petition vectors. Moreover, this pipeline does not require big data and is applicable to training in a low-resource setting such as the Ukrainian language for which we have only used 4623 unlabeled petitions. No pretrained models and fine-tuning was done for the sake of this research and we provide hyperparameters that were optimal for the experiments.*

*The advantages and disadvantages of both models are analyzed. Word2Vec-based model gets a higher Silhouette Coefficient score and produces more dense clusters than FastText-based one. This makes it more appropriate for real world applications such as petitions sentiment analysis or clustering. Error analysis confirms this result as FastText pays more attention to the syntactic structure of petitions and words while Word2Vec focuses more on the contexts. To support this claim, we show examples of such behavior for the same textual queries on different urban topics.*

*Visualizations of the vector spaces after dimensionality reduction via UMAP are demonstrated in an attempt to show their overall structure. They reinforce the resulting Silhouette Coefficient scores by exhibiting denser clusters for the Word2Vec based approach. The resulting models can be used to effectively query semantically related petitions as well as search for clusters of related petitions.*

**Key words:** vector space model, FastText, Word2Vec, petitions analysis, UMAP.

**Introduction.** By now, e-petitions have already matured and are incorporated in a lot of countries' governments. They are no longer experimental and citizens use them actively to make suggestions for public institutions. This is why the analysis of e-petitioning is vital to better understand the relationship between governmental systems and the public [1]. Automatic petition processing can help institutions immensely not only by filtering out noisy petitions, spam, and simply angry threats but also by aggregating people sentiments toward certain changes, events, or orders in an objective manner. Political implications of online petitions are well described in [2].

Unfortunately, a lot of effort is going into manual analysis of petitions which may lead to biased conclusions, is prone to errors, and inefficient. An example of the effort that went into the analysis is [3] where authors were searching for insights in the ‘Save the Cretan landscape: Stop golf development at Cavo Sidero’ online petition.

Ukraine is no stranger to the e-petition applications. Kyiv city – the capital and the largest city of Ukraine

with a population of around 3 million people [4] – has a platform for submitting online petitions to the Kyiv City Council – [petition.kievcity.gov.ua](http://petition.kievcity.gov.ua). An e-petition makes it possible for citizens to suggest actions to the Kyiv City Council. Our research is aimed at building a model of petitions posted on the above mentioned platform in order to be able to search for relevant petitions given a natural language query.

Similar research has been done by Hagen, L. et al. [5] where the authors have used We The People website data to uncover latent patterns in online petitions. They analyzed linguistic and semantic features of texts and built an LDA [6] model of the provided petitions. While very powerful, the LDA model is more of an exploratory tool that extracts main topics from petitions and lacks the contextual knowledge that models on top of the distributional hypothesis provide [7].

**Vector space models.** Vector space model is an algebraic model for encoding entities as vectors for the purpose of being able to find similarity of these entities as the degree between vectors. Every vector in such a model encapsulates the semantic structure

of an object so that similar objects end up having small degrees between their vectors. The degree is also called similarity. It shows how similar are objects in the vector space instead of the distance between them. The most commonly used similarity function for vector space models is cosine similarity (1). Other noteworthy mentions are Euclidean similarity and Jaccard similarity which may describe similarity between terms better in some cases or applications, for example, in hierarchical vector space models [8]. For our experiments, for petition vector space model we used cosine similarity because it is the similarity measure that is used for underlying word vectors, which are described next. Note that identical vectors are going to have cosine similarity equal to 1.0, so the more two vectors are semantically similar, the more their cosine similarity value has to be closer to 1.0.

$$S(A, B) = \frac{AB}{|A||B|} = \frac{\sum_{i=1}^n A_i B_i}{\sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2}}, \quad (1)$$

where  $S(A, B)$  – cosine similarity between vectors  $A$  and  $B$ ,  $n$  – dimensionality of vectors.

To embed textual documents into vectors, models based on word embeddings, Term Frequency-Inverse Document Frequency weights, document indexing, and Latent Semantic Analysis are usually used. This paper focuses on models based on word embeddings, out of which the most popular are Google’s Word2Vec[9], Stanford’s Glove[10], and Facebook’s FastText[11]. To better understand how to convert documents into vectors we should first step back and examine word-vector models listed previously.

The Word2Vec method takes leverage of a neural network to find word relationships from text. After the training process is finished, Word2Vec algorithm can be used to find synonyms or semantically similar words and complete sentences with missing parts. Usually, the text that is used to train such a model is huge, for example, the original paper on Word2Vec trained it on Google News Corpus with 100 billion words. Typical size of the underlying vectors is 300. Since our experiments work on a much smaller scale, we choose the dimensionality of vectors to be 100. Word2Vec has two distinct architectures, however, both of them are two-layer neural networks that make use of the distributional hypothesis. The hypothesis claims that words that occur in the same contexts tend to have similar meanings [7]. The first architecture of Word2Vec is called continuous bag-of-words (CBOW) and its goal of learning is to predict the word inside a sentence from its context – a number of neighboring words. The second architecture, called skip-gram, has the opposite learning goal – given a

word inside a document predict its neighbors in a certain span. It also puts more weight on closer surrounding words than more distant ones. CBOW takes less time to train than skip-gram but models words that occur in the corpus less frequently worse.

The FastText method is an extension of Word2Vec that takes into account subword information. The authors of the algorithm model morphology by considering subword units, and representing words by a sum of its character n-grams[11], [12]. They extract all of the n-grams in the length range from 3 to 6 from words which lets the model learn prefixes and suffixes as well as other morphological information present in most of the words. This makes FastText model for word vectors expressively more powerful than Word2Vec because words that were not present in the dataset can still be embedded or queried in the vector space. On the other hand, given that FastText learns representations for subword information, for small datasets, like the one that we use, the amount of learned weights and the complexity of the model grows which may lead to less quality with limited data.

One way of training both models is to use negative sampling [13] which minimizes the log-likelihood of sampled negative instances as opposed to training on positive examples only. This method is fast, simple, and widely used for similar tasks.

This paper explores a vector space model for Kyiv city petitions, that is based on the actual texts of petitions. The main question that we addressed was the choice of an approach to create vectors of petitions given vectors of words. We first train word vectors using Word2Vec and FastText which gives us 100-dimensional embeddings for words present in petitions. For every word in the text of a particular petition, the corresponding embedding was taken and averaged across every axis to generate a 100-dimensional vector for the petition as depicted in Fig. 1.

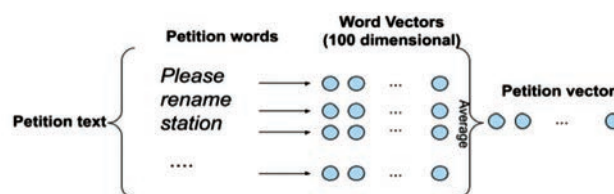


Fig. 1. Petition word vectors averaging in order to get petition vector

As a result, the final vector space model is encoding the high-level meaning of the petition and can be queried for similar petitions, creating a simple exploratory data analysis tool relying purely on the semantic content of petitions. This leads to one of the

drawbacks of the model: if petition description is too abstract and poorly constructed, the averaging process creates poor vector representation thus making the space less representative.

**Experiments. Word vectors.** Based on the abovementioned framework, we trained two sets of word vectors: Word2Vec and FastText. The dataset that we trained on consists of 4623 petitions written in the Ukrainian language that were scraped from the petitions website. To capture semantic relationships between key entities and objects in petitions better we did several preprocessing steps:

1. stop word removal via the stop-words [14] library which provides stop words for 22 languages including Ukrainian.

2. whitespace normalization (strip any irrelevant whitespace before and after the core petition text, as well as any additional spaces in between words).

3. invisible and non-unicode characters removal.

4. infrequent tokens removal (every word that was not present in our dataset more than 20 times was removed with an intuition of being irrelevant or a spelling mistake). This made the training process more stable.

Table 1

Top 10 closest words in Word2Vec space with their cosine distance to queried words

Queried word	Кличко (Klitschko)			КМДА(Кyiv City State Administration)		
	<i>Closest word(Ukrainian)</i>	<i>Closest word(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>	<i>Closest word(Ukrainian)</i>	<i>Closest word(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>
1	Віталій	Vitaly	0.747	Київради	Kyiv City Council	0.614
2	мер	mayor	0.586	депутатів	deputies	0.532
3	голова	head	0.458	КМР	Kyiv City Council(abbr.)	0.518
4	ГОЛОВИ	head(genitive)	0.417	сайті	site	0.495
5	Київської	Kyiv(adjective)	0.374	рішення	solution	0.460
6	вимогою	requirement	0.368	ради	council	0.452
7	разом	together	0.356	відповідних	according	0.446
8	комісії	commission	0.353	РДА	District state administration	0.445
9	міський	city	0.353	КП	Municipal Enterprise	0.439
10	своїм	their	0.347	розпорядження	order	0.437

Table 2

Top 10 closest words in FastText space with their cosine distance to queried words

Queried word	Кличко (Klitschko)			КМДА(Кyiv City State Administration)		
	<i>Closest word(Ukrainian)</i>	<i>Closest word(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>	<i>Closest word(Ukrainian)</i>	<i>Closest word(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>
1	Віталій	Vitaly	0.724	Київради	Kyiv City Council	0.577
2	голова	head	0.571	КМР	Kyiv City Council(abbr.)	0.567
3	мер	mayor	0.530	депутатів	deputies	0.501
4	ГОЛОВИ	head(genitive)	0.478	сайті	site	0.486
5	Київської	Kyiv(adjective)	0.400	рішення	order	0.468
6	комісії	commission	0.394	РДА	District state administration	0.464
7	разом	together	0.392	ради	council	0.446
8	КМДА	Kyiv City State Administration	0.373	КП	Municipal Enterprise	0.446
9	Шановний	Dear	0.371	питання	question	0.445
10	Віталію	Vitaly(vocative)	0.365	відповідних	according	0.430

We experimented with optimal hyperparameters for both of the models, which are listed here:

- vector dimension – 100.
- training epochs – 1000.
- context window – 5.
- learning rate – 0.025.

Both models use skipgram and negative sampling as part of the internal algorithm and were trained for around 30 minutes with 4 workers on a 2.8 GHz Intel Core i5 processor. No GPU was needed because the size of the dataset is small. We used Gensim [15] as the framework for experiment implementation which allows us to build vector models with an easy-to-use, yet powerful API.

Tables 1 and 2 showcase some of the queries that became possible with the built word models.

Please, note that since FastText is a modification of Word2Vec, the results of queries are similar, both capture semantic relationships, like name and job, or similar institutions of the query. However, as mentioned before, FastText allows us to make queries for words not present in the dataset, which is a huge bonus for word vector models.

**Petition vectors.** In this section, we detail the results obtained by averaging word vectors for petition contents. In order to give some qualitative measures of newly constructed petition vectors, we are going to show their visualization. The visualization is built by reducing the dimensionality of petition vectors from 100-dimensional to 3-dimensional and plotting this reduced space. The algorithm for dimensionality reduction that we use is UMAP [16] which has increased speed and better preservation of the data's global structure than other dimensionality reduction algorithms. The idea behind UMAP is to first create a high dimensional graph representation of the data and then optimize another low-dimensional graph to be as structurally similar as possible to the constructed graph. We use Tensorboard [17] to make these visualizations and explore the space manually. Tensorboard allows projecting embeddings to a lower-dimensional space via UMAP, t-SNE, or PCA. We chose UMAP because it is faster than t-SNE and more expressive than PCA[18].

For the quantitative measurement of the differences in the researched models we use the Silhouette Coefficient [19] which is defined for a single sample as:

$$S = \frac{a - b}{\max(a, b)},$$

where  $a$  – average distance between the point and all other points in the same cluster,  $b$  – average distance between the point and all other points in the nearest cluster. The Silhouette Coefficient score is defined as the mean of Coefficients of every point. The model with better defined clusters is expected to show higher Silhouette Coefficient score. The Coefficient has a range of –1 to 1 where spaces with highly dense clusters have

scores closer to 1 and with highly overlapping clusters closer to 0. Table 2 shows Silhouette Coefficient scores for Word2Vec- and FastText-based petition vectors clustered via DBSCAN [20].

Table 3

**Silhouette Coefficient scores**

Model	Silhouette Coefficient score
Word2Vec-based	0.468
FastText-based	0.004

As mentioned before, to build vector space models for Kyiv city petitions we used a simple averaging of word vectors of words present in the petition. In fig. 2 you can see Word2Vec- and FastText-based vector spaces after dimensionality reduction visualized.

Both spaces exhibit clustered structure and have petitions of different semantics in different parts of the space. Please, note that Word2Vec-based petition model has visibly more separated clusters than FastText-based one. This is confirmed by the Silhouette Coefficient scores listed previously, where Word2Vec based petition model had a much higher score which means the clusters that are present in its vector space are more dense, while in the FastText-based model they overlap a lot.

A closer look shows that these clusters are indeed semantically divided and several well-defined groups of points exhibit similarity in the topics that they discuss. In the next section, we are going to talk in which way the two built models differ.

**Word2Vec-based.** Upon closer inspection, Word2Vec-based model has clearly visible clusters that share some semantic meaning among them. You can see two examples of that on fig. 3.

For more clarity on the insides of the model we provide a few queries and their similarities with the closest petitions in the dataset in the Table 4. As you can see the query that concerns about the ecological situation in Kyiv yields several petitions about poor waste processing and polluted lakes, while a query about hot water supply mostly returns complaints about it to the Kyiv city council. Overall, the quality of Word2Vec-based embeddings is satisfactory for their future use for transfer learning as features to sentiment analysis classifier or any other natural language problem.

**FastText-based.** FastText-based model shows similar semantic properties to the Word2Vec based model, their underlying core ideas are close after all. However, the overall number of visible clusters is reduced and some of them are clearly clustered on syntactic level instead of desirable semantic level. You can see this in Fig. 4, where (a) is a good semantic cluster, while (b) is similar only by having the same boilerplate start.

In Table 5 we provide two examples of FastText-based model querying. The first query is just a name

of an avenue and the model could find semantically similar petitions that are mostly about its renaming process or about the process of renaming other avenues. The second example shows that the model can also find syntactically similar petitions. Overall,

the quality of this model is less-suitable to be used in further semantically significant tasks than Word2Vec-based one.

**Conclusions.** In this paper, we proposed two methods of construction of vector space models of

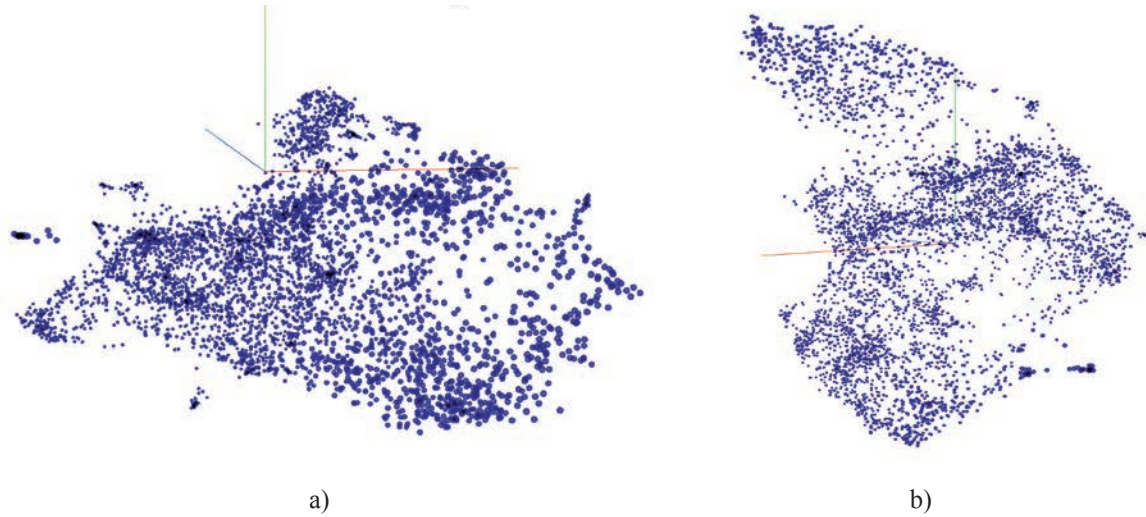


Fig. 2. Word2Vec (a) and FastText (b) petition vectors U-MAP visualizations



Fig. 3. Cluster of petitions about ecological situation (a) and water management (b) in Kyiv in the Word2Vec petitions space



Fig. 4. Cluster of petitions about the renaming of different city objects (a) in Kyiv in the FastText petitions space and example of suboptimal separation in the FastText petitions space (b)

Table 4

Top 3 closest petitions in Word2Vec space with their cosine distance to queried phrases

#	Екологічний стан Києва у Дарницькому районі (Ecological condition of Kyiv in Darnytskyi district)	Closest petition (Ukrainian)	Closest petition (English translation)	Cosine distance	Closest petition (Ukrainian)	Closest petition (English translation)	Cosine distance
1	Вже багато років екологічна ситуація в Дарницькому районі м. Києва, та інших районах міста, відповідно, є катастрофічно-критичною: нестерпний сморід в нічний та ранковий час доби як результат недопущення діяльності сміттєпереробного заводу «Енергія» ...	Closest petition (Ukrainian) В Оболонському районі, по вулицях Дубровицька 5, 7, 3 вже майже місяць відсутнє постачання гарячої води. Чіткої відповіді на питання мешканців цих будинків «коли буде вода» від Київенерго та районного ЖКХ немає...	Closest petition (English translation) For many years, the ecological situation in the Darnytskyi district of Kyiv and other districts of the city, respectively, is catastrophically critical: an unbearable stench at night and in the morning as a result of poor activities of the waste processing plant "Energy" ...	0.69	Closest petition (Ukrainian) Не перший рік виникають нарікання на температуру постачання гарячої води. Єдина можливість долати холодну воду до гарячої виникає...	Closest petition (English translation) In the Obolonsky area, on Dubrovnytska streets 5, 7, 3 there has been no hot water supply for almost a month. There is no clear answer to the question of the residents of these houses "when will there be water" from Kyivenerho and the district housing and communal services ...	0.841
2	заборонено купання в 50 озерах і ставках, зокрема Дідоровських і Мишеловських ставках ... в Дарницькому районі ... Купання в цих озерах не рекомендується через незадовільні проби води. Комунальне підприємство «Плесо» заборонило пляжний відпочинок через невідповідність санітарним нормам: за результатами санітарно-мікробіологічних досліджень проб води. Закликаю очистити озеро Сонячне на Позняках та дати можливість людям безпечно відпочивати.	Closest petition (Ukrainian) it is forbidden to swim in 50 lakes and ponds, in particular Didorovsky and Misheifovsky ponds ... in Darnytskyi district, ... Swimming in these lakes is not recommended due to unsatisfactory water samples. The Pleso municipal enterprise has banned beach holidays due to non-compliance with sanitary norms: according to the results of sanitary-microbiological tests of water samples. I urge you to clean Lake Sunny in Pozniaky and allow people to rest safely.	Closest petition (English translation) Apparently, everyone who lives in the Darnytskyi district of Kyiv has the opportunity to "enjoy" the aroma that "gives" us BORTNYTSKY AERATION STATION AND incinerator "ENERGY". But in addition to the unpleasant smell, companies also pose a threat to the health of EACH OF US ...	0.651	Closest petition (Ukrainian) Оскільки послуги з опалення та постачання гарячої води надаються монополістами, потрібен важкий тиску на постачальників для унеможливлення значного завищення тарифів. Таким засобом впливу стане можливість встановлення індивідуальних систем опалення та підгріву води у будинках.	Closest petition (English translation) As heating and hot water services are provided by monopolists, a lever of pressure on suppliers is needed to prevent significant overstatement of tariffs. This means of influence will be the ability to install individual heating and water heating systems in any multi-storey building.	0.835
3	Мабуть, кожен, хто проживає у Дарницькому районі міста Києва, має можливість «насолоджуватись» ароматом, який «дарує» нам БОРТНИЦЬКА СТАНЦІЯ АЕРАЦІ ТА СМІТТЄСПАЛЮВАЛЬНИЙ ЗАВОД «ЕНЕРГІЯ». Та, крім неприємного запаху, підприємства також несуть загрозу здоров'ю КОЖНОГО З НАС...	Closest petition (Ukrainian) Apparently, everyone who lives in the Darnytskyi district of Kyiv has the opportunity to "enjoy" the aroma that "gives" us BORTNYTSKY AERATION STATION AND incinerator "ENERGY". But in addition to the unpleasant smell, companies also pose a threat to the health of EACH OF US ...	Closest petition (English translation) Apparently, everyone who lives in the Darnytskyi district of Kyiv has the opportunity to "enjoy" the aroma that "gives" us BORTNYTSKY AERATION STATION AND incinerator "ENERGY". But in addition to the unpleasant smell, companies also pose a threat to the health of EACH OF US ...	0.642	Closest petition (Ukrainian) Оскільки послуги з опалення та постачання гарячої води надаються монополістами, потрібен важкий тиску на постачальників для унеможливлення значного завищення тарифів. Таким засобом впливу стане можливість встановлення індивідуальних систем опалення та підгріву води у будинках.	Closest petition (English translation) As heating and hot water services are provided by monopolists, a lever of pressure on suppliers is needed to prevent significant overstatement of tariffs. This means of influence will be the ability to install individual heating and water heating systems in any multi-storey building.	0.818

Top 3 closest petitions in FastText space with their cosine distance to queried phrases

Проспект Московський (Moscow Avenue)			Пропоную з метою забезпечення ... (In order to ensure ...)			
#	<i>Closest petition(Ukrainian)</i>	<i>Closest petition(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>	<i>Closest petition(Ukrainian)</i>	<i>Closest petition(English translation)</i>	<i>Cosine distance</i>
1	У зв'язку з початком процесу перейменування проспекту Ватутіна в проспект Романа Шухевича, а Московського проспекту в проспект Степана Бандери було б логічно перейменувати Московський міст, що з'єднує ці два проспекти, в Троєщинський міст.	In connection with the beginning of the process of renaming Vatutin Avenue to Roman Shukhevych Avenue, and Moscow Avenue to Stepan Bandera Avenue - it would be logical to rename the Moscow Bridge, which connects the two avenues, to Troieschyna Bridge.	0.69	Пропоную з метою забезпечення ефективного здійснення екіпажами Патрульної поліції України міста Києва держави Україна своїх посадових обов'язків забезпечити кожен з них сертифікованими приладами лазерними радарами вимірювання швидкості TruCam	In order to ensure the effective implementation of the duties of the crews of the Patrol Police of Ukraine in the city of Ukraine, the state of Ukraine to provide each of them with certified devices - laser radars for measuring the speed of TruCam	0.654
2	Назва Московського проспекту в Оболонському і Московському районах Києва не є історичною. Її було надано 2003 року як дружній політичний жест тодішнього міського голови Києва О. Омельченка щодо його московського колеги Ю. Лужкова...	The name of Moscow Avenue in Obolonsky and Moscow districts of Kyiv is not historical. It was given in 2003 as a friendly political gesture of the then mayor of Kyiv O. Omelchenko towards his Moscow colleague Yu. Luzhkov ...	0.651	Пропоную з метою забезпечення ефективного здійснення екіпажами Патрульної поліції України міста Києва держави Україна своїх посадових обов'язків забезпечити кожен з них сертифікованими приладами - алкотестерами Драгер	In order to ensure the effective implementation by the crews of the Patrol Police of Ukraine of the city of Kyiv, the state of Ukraine, I propose to provide each of them with certified devices - Drager breathalyzers.	0.643
3	Назва «Проспект Правди» (Виноградар) підпадає під Закон про декомунізацію. Окрім того, при перейменуванні його на проспект Павла Шеремета буде символічно, що бічним до цього проспекту є проспект Георгія Гонгадзе, також загиблого київського журналіста.	The name "Pravda Avenue" (Vinogradar) falls under the Law on Decommunization. In addition, when renaming it to Pavel Sheremet Avenue, it will be symbolic that the side of this avenue is Georgy Gongadze Avenue, also a deceased Kyiv journalist.	0.74	Просимо заборонити рух великовагового транспорту територією міста в денний час із метою зменшення руйнування асфальтового покриття та з метою поліпшення організації дорожнього руху і його безпеки, поліпшення екологічного стану та підвищення пропускної спроможності вулично-шляхової мережі м. Києва	Please prohibit the movement of heavy vehicles in the city during the day, in order to reduce the destruction of asphalt pavement and to improve the organization of traffic and its safety, improve the environmental condition and increase the capacity of the road network of Kyiv	0.606

Kyiv city petitions, namely Word2Vec and FastText-based word vector averaging. The main insights are that it is possible to build such vector spaces with limited data and that through our experiments Word2Vec-based algorithm was preferred since it captured more semantic representations instead of syntactic ones. This happened because, innately, FastText works on subword level and while it is useful for getting vectors of unknown character sequences, the process of word vectors averaging does eliminate this advantage, making it a liability. Quantitative results show that Word2Vec-based model is better suited for further clustering and produces more dense clusters than FastText-based one.

The suggested models can be used as a stepping stone in petition analysis pipelines. The vector space models give every petition a numeric representation capturing its semantic meaning that, if included in a classification framework, can help identify citizens' attitudes toward certain events, group and deduplicate petitions with the same intent, or predict if a certain petition is going to get enough votes to pass.

Future work might include trying other aggregation functions to build petition-level vectors, like term-frequency weighting. Other possible research directions include sentiment analysis and automatic clustering of Kyiv city petitions based on built models.

#### References:

1. R. Lindner and U. Riehm, "Electronic petitions and institutional modernization. International parliamentary e-petition systems in comparative perspective," *JeDEM-eJournal eDemocracy Open Gov.*, vol. 1, no. 1, pp. 1–11, 2009.
2. K. Böhle and U. Riehm, "E-petition systems and political participation: About institutional challenges and democratic opportunities," *First Monday*, 2013.
3. H. Briassoulis, "Online petitions: new tools of secondary analysis?," *Qual. Res.*, vol. 10, no. 6, pp. 715–727, 2010.
4. "Population (1995-2019)", *Kiev.ukrstat.gov.ua*, 2020. [Online]. Available: <http://www.kiev.ukrstat.gov.ua/p.php3?c=527&lang=1>. [Accessed: 07-Sep-2020].
5. L. Hagen, T. Harrison, O. Uzuner, W. May, T. Fake, and S. Katragadda, "E-petition popularity: Do linguistic and semantic factors matter?," *Gov. Inf. Q.*, 2016.
6. D. M. Blei, A. Y. Ng, and M. I. Jordan, "Latent dirichlet allocation," *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 3, no. Jan, pp. 993–1022, 2003.
7. Z. S. Harris, "Distributional structure," *Word*, vol. 10, no. 2–3, pp. 146–162, 1954.
8. M. Nickel and D. Kiela, "Poincaré embeddings for learning hierarchical representations," in *Advances in neural information processing systems*, 2017, pp. 6338–6347.
9. T. Mikolov, I. Sutskever, K. Chen, G. S. Corrado, and J. Dean, "Distributed representations of words and phrases and their compositionality," in *Advances in neural information processing systems*, 2013, pp. 3111–3119.
10. J. Pennington, R. Socher, and C. D. Manning, "Glove: Global vectors for word representation," in *Proceedings of the 2014 conference on empirical methods in natural language processing (EMNLP)*, 2014, pp. 1532–1543.
11. P. Bojanowski, E. Grave, A. Joulin, and T. Mikolov, "Enriching Word Vectors with Subword Information," *CoRR*, vol. abs/1607.04606, 2016.
12. A. Joulin, E. Grave, P. Bojanowski, and T. Mikolov, "Bag of Tricks for Efficient Text Classification," *CoRR*, vol. abs/1607.01759, 2016.
13. T. Mikolov, K. Chen, G. Corrado, and J. Dean, "Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space." 2013.
14. A. Coenen and A. Pearce, "Understanding UMAP", *Pair-code.github.io*, 2020. [Online]. Available: <https://pair-code.github.io/understanding-umap/>. [Accessed: 15-Aug-2020].
15. R. Rehurek and P. Sojka, "Software Framework for Topic Modelling with Large Corpora," in *Proceedings of the LREC 2010 Workshop on New Challenges for NLP Frameworks*, 2010, pp. 45–50.
16. L. McInnes, J. Healy, and J. Melville, "Umap: Uniform manifold approximation and projection for dimension reduction," *arXiv Prepr. arXiv1802.03426*, 2018.
17. Martin Abadi *et al.*, "TensorFlow: Large-Scale Machine Learning on Heterogeneous Systems." 2015.
18. A. Coenen and A. Pearce, "Understanding UMAP", *Pair-code.github.io*, 2020. [Online]. Available: <https://pair-code.github.io/understanding-umap/>. [Accessed: 15-Aug-2020].
19. P. J. Rousseeuw, "Silhouettes: A graphical aid to the interpretation and validation of cluster analysis," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 20, pp. 53–65, 1987.
20. M. Ester, H.-P. Kriegel, J. Sander, and X. Xu, "A Density-Based Algorithm for Discovering Clusters in Large Spatial Databases with Noise," in *Proceedings of the Second International Conference on Knowledge Discovery and Data Mining*, 1996, pp. 226–231.



**Шапгала Р.В., Кисельов Г.Д. ВЕКТОРНІ МОДЕЛІ ПЕТИЦІЙ МІСТА КИЇВ**

*У цьому дослідженні ми описуємо та порівнюємо два шляхи створення моделі векторного простору петицій міста Києва. Для автоматичного аналізу текстів вільної форми, таких як петиції, їх потрібно перевести в числовий простір. Використовуючи вектори слів на основі розподільчої гіпотези, а саме Word2Vec та FastText, ми будуємо векторні моделі петицій міста Києва.*

*Загальний підхід, який ми пропонуємо, – це навчання векторів слів на наборах петицій міст Києва, попередня обробка даних документів та застосування усереднення векторів слів для створення векторів петицій. Більше того, цей підхід не вимагає великих даних і може застосовуватись до навчання у низько-ресурсних середовищах, таких як українська мова, для якої ми використовували лише 4623 петиції без розмітки. Жодних попередньо навчених моделей та їх налаштування для цього дослідження не використовувалось, і ми надаємо гіперпараметри, оптимальні для проведених експериментів.*

*Проаналізовано переваги та недоліки обох моделей. Модель на основі Word2Vec отримує вищу оцінку Коефіцієнту Силуетта і створює щільніші кластери, ніж модель на основі FastText. Це робить її більш відповідним для реальних застосувань, таких як аналіз настроїв петицій або їх кластеризація. Аналіз помилок підтверджує цей результат, оскільки FastText приділяє більше уваги синтаксичній структурі петицій та слів, тоді як Word2Vec більше зосереджується на контексті. На підтримку цього твердження ми наводимо приклади такої поведінки для однакових текстових запитів на різні міські теми.*

*Візуалізації векторних просторів після зменшення їх розмірності за допомогою UMAP демонструються, намагаючись показати їх загальну структуру. Вони підкріплюють отримані оцінки Коефіцієнта Силуетта, демонструючи щільніші кластери для підходу на основі Word2Vec. Отримані моделі можна використовувати для ефективного запиту семантично пов'язаних петицій, а також для пошуку груп петицій зі схожими темами або скаргами.*

**Ключові слова:** векторна модель, FastText, Word2Vec, аналіз петицій, UMAP.

## ЕНЕРГЕТИКА

УДК 620.92

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/27>

**Гламаздін П.М.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

**Дяченко А.А.**

Київський національний університет будівництва і архітектури

### ЗБАГАЧЕННЯ КИСНЕМ ДУТТЬОВОГО ПОВІТРЯ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРОГЕНЕРАТОРІВ

*Потреби в електроенергії в Україні задовольняють 15 теплових електростанцій (ТЕС) і 20 тепло-електроцентралей (ТЕЦ), які побудовані ще в минулому сторіччі. Нині вони не задовольняють ані екологічним вимогам Євросоюзу, ані вимогам з енергоефективності й потребують модернізації. Одним із засобів модернізації може бути збагачення дуттьового повітря в котельних установках ТЕС і ТЕЦ, що зумовлює актуальність роботи.*

*Метою роботи є кількісне визначення можливостей підняття енергоефективності котельних установок ТЕС і ТЕЦ шляхом збагачення киснем дуттьового повітря.*

*Для досягнення поставленої мети в роботі сформульовано такі завдання: проведення теплового розрахунку парового котла на вугіллі; визначення діапазону оптимальних концентрацій кисню в дуттьовому повітрі.*

*Поставлені в роботі завдання вирішувалися розрахунковим методом з використанням нормативного методу теплового розрахунку котельних агрегатів.*

*У результаті проведеного дослідження виявлено позитивний вплив збагачення дуттьового повітря киснем для парових котлів, що використовують як паливо вугілля.*

*Збагачення дуттьового повітря киснем призводить до підвищення ККД котла. Показано, що для експлуатованих котлів є межа збагачення дуттьового повітря киснем, за якою подальше збагачення вимагає суттєвих змін у конструкції котла.*

*При зростанні температури факелу в топці й зменшенні вмісту азоту  $N_2$  в топковому середовищі справедливо чекати більш повного вигорання вугільного пилу й відповідно до цього зменшення втрати тепла зі шлаками ( $q_d$ ). Однак достовірних результатів експериментальних досліджень такого висновку знайти не вдалося, тому цей доданок у топковому балансі котла залишається без змін і приймається аналогічно показнику згідно з нормативним методом теплового розрахунку котельних агрегатів.*

**Ключові слова:** теплоенергетика, парогенератори, тверде паливо, збагачене киснем дуттьове повітря, ККД котла, оксиди азоту.

**Постановка проблеми.** В останні роки в усьому світі превалує тренд на витіснення традиційної енергетики, заснованої на вуглеводневому паливі, системами, які використовують такі відновні джерела енергії, як енергія Сонця, геотермальна енергія й енергія вітру [1]. До цих систем додається тренд на використання як палива водню. У Євросоюзі прийнято рішення про створення в Європі «безвуглецевої зони» до 2050 року в надії на швидку реалізацію цих трендів [2]. Подібні настрої підігриваються успіхами вчених та інженерів у здешевленні технологій виробництва обладнання для подібних систем [3]. При

цьому передбачається, що водень буде отримуватися в електролізерах, використовуючи енергію від сонячних електростанцій. Цей водень навіть отримав спеціальну назву – «зелений водень». Деякі вчені вже підраховали потенційні можливості використання вільної площі Землі для розміщення геліосистем із сонячними панелями [4] для повної заміни ними традиційної енергетики.

Однак сьогодні заміщення традиційних вуглеводневих палив відновними джерелами енергії відбувається не так швидко через низку причин, як технічних, так й економічних. Так, старший виконавчий віце-президент Electricite de France

(EDE) Маріанн Легно на Всесвітньому енергетичному конгресі у 2019 році заявила, що в результаті інвестування величезних сум у відновлювані джерела енергії в Німеччині ціна на енергію для промислових споживачів на 30% вища, ніж у Франції [5]. Водень нині отримується за допомогою електроенергії, яка генерується на газових, вугільних та атомних електростанціях. Можна припустити, що процес заміни традиційних вуглеводневих палив на відновні джерела незворотній, але для цього потрібен час. При цьому традиційні вуглеводневі технології генерації електроенергії ще не вичерпали свої резерви з підвищення енергоефективності й екологічності. Одним із таких резервів є використання кисню для збагачення дуттьового повітря в парових котлах, що працюють на твердому паливі та природному газі.

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

У наявних доступних інформаційних джерелах можна відмітити три напрями досліджень з теми, що розглядається:

- інформація щодо перспектив розвитку технології отримання кисню [6–10];
- удосконалення методів організації технологічних процесів у печах різного призначення шляхом збагачення киснем дуттьового повітря [11–13];
- підвищення енергоефективності й екологічних характеристик теплоенергетичних установок збагаченням дуттьового повітря в котлах, що знаходяться в експлуатації [14–18; 20–24].

У першому блоці інформаційних джерел виробники мембранних та адсорбційних установок розділення повітря дають інформацію [6–9] про вже наявні комплекси отримання кисню, а також можливі варіанти сучасних рішень. На основі даних [7] можна чітко побачити розвиток від невеликих і навіть мобільних кисневих генераторів до комплексів паралельно включених установок, що обслуговують заводи хімічної промисловості.

У роботі [10] приводиться аналіз наявних технологій розділення повітря з точки зору можливості їх застосування в енергетичних установках, також наведено якісну характеристику найбільш перспективних способів отримання кисню.

У другому блоці інформаційних джерел роботи [11–13] стосуються збагачення киснем дуттьового повітря в печах, зокрема плавильних. Робиться позитивний висновок щодо такого досвіду на основі отриманого зниження витрати палива при збагаченні дуттьового повітря киснем. У роботі [11] приведено узагальнення такого досвіду і при цьому особливо відмічається підвищення температури топкового середовища. На жаль, досвід

модифікацій дуттьового повітря киснем у печах не вдається перейняти на потреби підняття енергоефективності енергетичних котлів через дві основні причини. Коефіцієнт корисної дії печей і котлів має різні фізичні сутності, і процеси в топках печей і котлів мають вагомні відмінності. До того знайдені джерела інформації стосуються використання природного газу як палива, а в енергетичних парогенераторах більшості українських ТЕС використовується вугілля, а газ іде тільки на підсвітку.

Щодо третього блоку джерел інформації можна їх одразу знову-таки поділити. У світі нині є два підходи до використання кисню в процесах спалювання органічних палив: вугілля – спалювання останнього з використанням кисню в чистому вигляді або з добавкою діоксиду вуглецю ( $\text{CO}_2$ ) та збагачення киснем дуттьового повітря в котлах.

Перший напрям більше розробляється в тих країнах, де основним паливом є вугілля низької якості, – Польщі, Китаї, Швеції, Фінляндії. Ці країни ведуть дослідження нового технологічного оформлення циклу Ренкіна в спеціально розроблених теплоенергетичних установках надкритичних параметрів робочого тіла. Паливом у котлах для цих установок є вугілля, а окиснювачем є кисень у суміші з  $\text{CO}_2$ , який виділяється з продуктів згорання після їх очищення від золи й конденсату методом мембранного розділення та рециркулюється частково в топку котла як робоче тіло. Такий цикл має спеціальну назву «Oxy-fuel combustion», дослідженню його присвячено досить велику кількість публікацій, серед яких найбільш цікавими є такі [14–18]. Але для його реалізації необхідно розробляти й виготовляти нове теплогенеруюче обладнання, що в дійсний час не під силу фінансово електрогенеруючим компаніям України.

Тому в роботі розглянуто другий спосіб використання кисню в процесах спалювання вуглеводних палив – збагачення дуттьового повітря киснем у теплогенеруючих установках, що сьогодні знаходяться в експлуатації.

Узагалі збагачення дуттьового повітря киснем у процесах горіння відомо понад 150 років від патенту Бессемера щодо збагачення доменного дуття киснем та активно використовується в металургії з початку ХХ століття [19]. Однак в інших галузях техніки, у тому числі в енергетиці, цей метод інтенсифікації горіння не знаходив до останнього часу широкого застосування через високу вартість кисню, що отримувався методом криогенного розділення повітря. Лише в останні десятиріччя положення змінилося у зв'язку з розвитком

нових методів отримання кисню – адсорбційного методу [8] і методу мембранного розділення [9].

Вартість отримання кисню цими методами вже дає змогу розглядати можливості впровадження в теплогенеруючих установках.

Проблемі використання кисню для збагачення дуттьового повітря в діючих теплогенеруючих агрегатах і парогенераторах присвячено декілька робіт. У дослідженнях [20–24] відмічається зниження витрати палива при збільшенні концентрації кисню в дуттьовому повітрі, при цьому незалежно від виду палива і типу котла залежності витрати палива від концентрації кисню подібні, вони експоненціальні. Графік підвищення ККД також збільшується експоненціально. У роботі [20] відмічено зростання температури точки роси димових газів при спалюванні природного газу від 58°C при концентрації кисню 21% до 86°C, відповідно, при спалюванні органічного палива в чистому кисні. У праці [21] отримано емпіричні дані роботи газового котла потужністю 5400 кВт при збагаченні дуттьового повітря киснем до 40%. При цьому отримано покращення екологічних характеристик котла. Уміст NOx у димових газах при спалюванні природного газу з використанням збагаченого киснем повітря становив 490 мг/м<sup>3</sup>, а при використанні атмосферного повітря як окисника вміст NOx становив 520 мг/м<sup>3</sup>.

В інших роботах цього блоку джерел проблема розглядається в загальному плані, у них констатується позитивний ефект від збагачення киснем дуттьового повітря й не розглядається конкретний вплив результату цього заходу на процеси в котлі. У більшості з них як паливо приймається до розгляду природний газ.

**Постановка завдання.** Сьогодні в Україні працює 15 ТЕС і 20 ТЕЦ [25], більшість яких використовують як паливо вугілля. Згідно з працею [26], на деяких станціях при паспортному терміні експлуатації 100000 годин обладнання відпрацювало вже 300000 годин. У результаті стан обладнання обумовлює його доволі низьку енергоефективність і високий обсяг забруднюючих викидів у навколишнє середовище, зокрема в атмосферу. Питомі витрати палива збільшуються через нерозрахункові режими та низьку якість палива, склад якого часто не відповідає проектному [27]. Зазвичай це паливо досить низькокалорійне, що призводить до низки негативних факторів. Зниження теплоти згорання призводить до зниження температури факелу, що, у свою чергу, породжує проблему з рідким шлаковидаленням, зменшує глибину вигорання вуглецю, що призводить до

збільшення витрати від механічного недопалу та зі шлаку [28, с. 66]. Такий стан речей зумовлює дослідження в напрямі модернізації експлуатованих на теплових електростанціях парогенераторів. У роботі [29] досліджено вплив температури і способу попереднього нагріву вугільного пилу, а також зменшення присосів на процеси горіння вугільного пилу в топках енергетичних парогенераторів. Установлено вплив зайвини повітря на затримку спалаху летких і позитивний вплив підвищення температури факелу на величину вигорання вуглецю у твердому паливі. У праці [30] розглянуто проблему впливу температури факелу на надійність видалення рідкого шлаку з топки. Зроблено висновок про необхідність підтримання температури факелу на високому рівні. Автори роботи [31] пропонують реконструкцію топки котла ТП-100 у частині заміни пальників з метою підвищення надійності експлуатації й ефективності роботи котла. Усі запропоновані методи підвищення ефективності парогенераторів вимагають суттєвої модернізації парогенераторів із відповідним фінансовим забезпеченням. За таких умов з'являється інтерес до збагачення киснем дуттьового повітря – як до методу, який не потребує складного втручання до конструкцій котлів, що експлуатуються на станціях.

При великих концентраціях кисню температура в топці котла може збільшуватися до величин, при яких стає неприйнятним теплове напруження в топці. Крім того, може суттєво знизитися температура на виході з топки, що призведе до змін у теплообміні в подальших поверхнях нагріву й уведе котел у конденсаційний режим, а також призведе до труднощів у регулюванні пароперегрівачів. Через ці обставини в роботі проведено тепловий розрахунок парового котла ТП-100, який є досить розповсюдженим на українських ТЕС, що використовують як паливо вугілля. Основні технічні характеристики котла представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

**Технічні характеристики котла ТП-100**

Найменування показника	ТП-100
Паропродуктивність, т/год	640
Вид палива	Вугільний пил, газ/мазут
Тиск пари на виході, МПа	13,8
Температура перегрітої пари, °C	570
Температура живильної води, °C	230
ККД котла брутто, %, вугільний пил, газ	87/92

**Виклад основного матеріалу.** Розрахунок проведено згідно з нормативним методом «Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод» 1973 року [32].

Термодинамічні характеристики повітря, азоту, кисню, водяної пари, двоокису вуглецю й інших газів (зокрема при високих температурах), які використані при проведенні розрахунків, прийняті з довідникових джерел [33; 34; 35].

Для проведення теплового розрахунку котла прийнято деякі початкові умови та припущення.

Уважаємо, що повітря складається тільки з азоту (79%) і кисню (21%).

Розрахунки проведені при використанні вугілля марки ГЖП ЦЗФ «Селидівська». Його елементарний склад і теплота згорання наведені в таблиці 2.

Дуттьове повітря попередньо не підігрівається, має температуру  $t^n = 20^\circ\text{C}$ .

Утрати теплоти від хімічної й механічної неповноти згорання ( $q_3, q_4$ ) та втрати теплоти від зовнішнього охолодження ( $q_5$ ) визначаємо за довідковими даними, наведеними в нормативному методі [32]:  $q_3 = 0\%$ ,  $q_4 = 4\%$ ;  $q_5 = 0,26\%$ . При цьому можна вважати, що збагачення дуттьового повітря киснем має призвести до мінімізації втрати з хімічним недопалом  $q_3$ , а котел пройшов процедуру налагодження. Витрати з механічним недопалом  $q_4$  найбільше залежать від стану системи пилоприготування й температури факелу. На стан систем пилоприготування збагачення киснем дуттьового повітря вплинути не зможе, як і на конструкції пальників.

Коефіцієнт надлишку повітря приймаємо  $\alpha = 1$ . Прийнято, що в процесі проходження по газовому тракту котла коефіцієнт надлишку повітря не змінюється, бо він може сильно варіюватися для різних котлів. Присоси залежать від стану котлів.

Оскільки ми прийняли витрату  $q_3$  як відсутню, то можна прийняти зайвину повітря теж як відсутню ( $\alpha = 1$ ) [32].

На погляд авторів, прийняті припущення і спрощення не внесуть кардинальних змін в опис перебігу змін у процесах, що відбуваються в котлі при збагаченні киснем дуттьового повітря.

Тепловий розрахунок показав, що зі збільшенням концентрації кисню в дуттьовому повітрі відбуваються такі зміни:

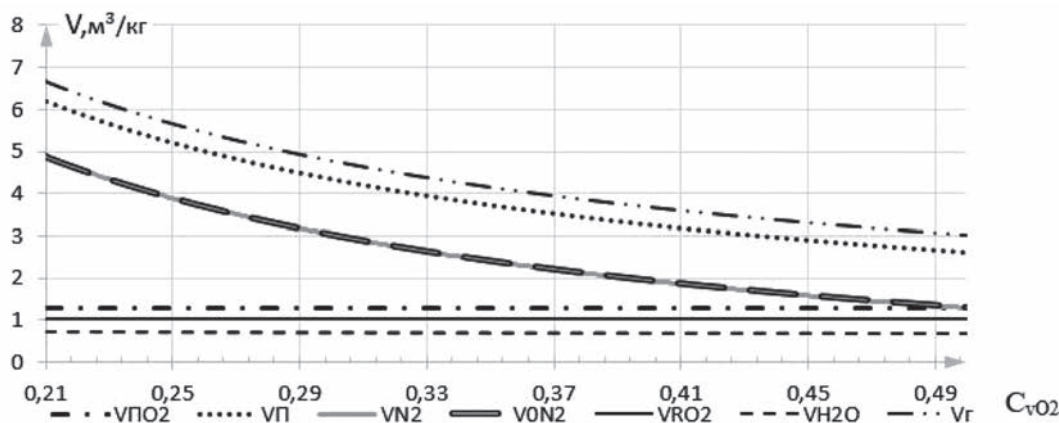
- зменшення об'єму дуттьового повітря (рис. 1);
- зменшення об'єму азоту в дуттьовому повітрі (рис. 1);
- зменшення об'єму димових газів (рис. 1);
- зменшення вмісту (рис. 1) та об'ємної частки азоту в димових газах (рис. 2);
- збільшення об'ємної частки водяних парів у вихідних газах (рис. 2) з одночасним деяким зменшенням їх об'єму (рис. 1);
- збільшення об'ємної частки трьохатомних газів при їх постійному об'ємі в продуктах згорання (рис. 2);
- зниження температури вихідних газів.

Названі основні результати розрахунку супроводжуються також важливими й цікавими обставинами. Так, значення співвідношення відсотків кисню та азоту в дуттьовому повітрі  $N_2^n/O_2^n$  при

Таблиця 2

**Елементарний склад вугілля, прийнятий для розрахунку**

$C^p, \%$	$H^p, \%$	$N^p, \%$	$O^p, \%$	$S^p_k, \%$	$S^p_{op}, \%$	$A^p, \%$	$W^p, \%$	$\Sigma, \%$	$Q_{н}^p, \text{ ккал/кг}$
57,64	4,58	0,72	6,87	1,25	0,77	18,07	10,1	100	5324



**Рис. 1. Залежність об'ємів необхідного кисню, повітря та продуктів згорання вугільного пилу від концентрації кисню в дуттьовому повітрі**

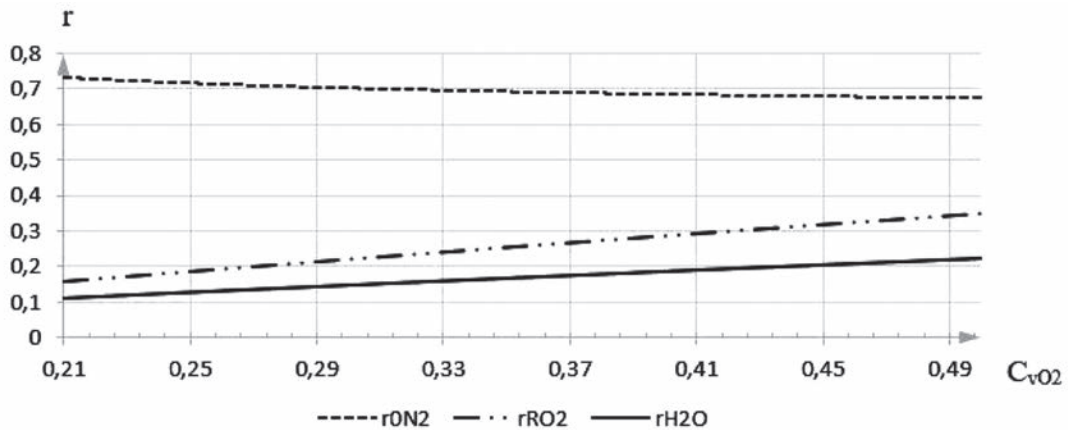


Рис. 2. Залежність об'ємних часток продуктів згорання вугільного пилу від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

зміні концентрації кисню має нерівномірний характер, змінюється за експонентою, що пояснює експоненціальне зменшення об'єму азоту при підвищенні концентрації кисню, а це тягне за собою експоненціальне зменшення об'єму дуттьового повітря та димових газів. Узагалі значну частку ( $\beta$ ) ентальпії димових газів становить ентальпія азоту (рис. 3). Через експоненціальне зменшення об'єму азоту з підвищенням концентрації кисню в дуттьовому повітрі ентальпія вихідних газів також зменшується експоненціально.

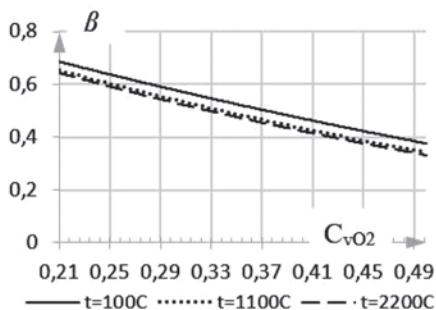


Рис. 3. Залежність частки  $\beta$  ентальпії азоту в димових газах від концентрації кисню в дуттьовому повітрі при різних температурах

Збільшення об'ємних часток, відповідно, і парціального тиску трьохатомних газів і водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням парціального тиску азоту при постійному тиску вихідних газів.

Незначне зменшення об'єму водяної пари у вихідних газах пояснюється зменшенням об'єму дуттьового повітря, відповідно, і водяної пари  $V^{H_2O}=0,0161V^v$ , що міститься в ньому, за умови, що вологовміст газоподібного палива приймаємо  $d_r=0$ , а водяна пара з'являється у вихідних газах унаслідок реакції горіння вуглеводнів (рис. 1).

Зі зменшенням температури, об'єму й ентальпії димових газів зменшується витрата з димовими газами втрати  $q_2$  (рис. 4). Зі зменшенням утрат теплоти  $q_2$  зростає ККД котла. Позитивний ефект спостерігається в усьому діапазоні підвищенні концентрації  $O_2$ , але експоненціальне зменшення об'єму азоту при постійному об'ємі кисню викликає нерівномірність зростання ККД котла. Так, при збільшенні вмісту кисню до 22% ККД зростає на 0,019%, 22–23% – на 0,017% з подальшим зростанням за експонентою (рис. 5).

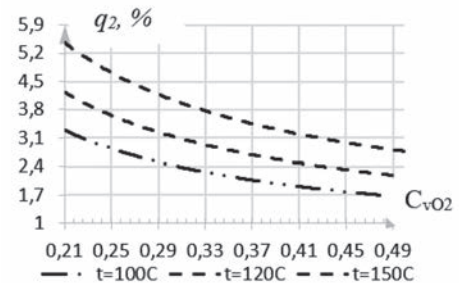


Рис. 4. Залежність витрат теплоти з димовими газами від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

Найбільш помітне зростання ККД, що можна побачити з графіка (рис. 5) залежності його від концентрації кисню, відбувається в діапазоні 21–30% концентрації кисню в дуттьовому повітрі, у подальшому приріст ККД значно зменшується.

Теоретичний аналіз процесу горіння вуглецю [36, с. 206; 37, с. 112] показав, що процес переходить декілька стадій, які спрощено можна розташувати так: прогрів частинки пилу, вихід летких, займання летких і їх горіння, горіння вуглецю. Сьогодні кожна із цих стадій розкладається на менші стадії, їх число може доходити до 11 [38, с. 106]. Але нас цікавить передусім стадія

займання й горіння летких. Чим скоріше пройде займання летких, тим більше часу залишиться в частинки вугільного пилу для вигорання вуглецю, що міститься в ній, за час перебування в топці, бо для горіння вуглецю необхідна висока температура, яка має місце тільки в топці. Затримка в займанні летких залежить від швидкості дифузії кисню до частинки пилу крізь баласт у дуттьовому повітрі – азот. Чим менший уміст азоту, тим скоріше настає займання летких, що зумовлює збільшення глибини вигорання вуглецю. У результаті через збагачення киснем дуттьового повітря ми можемо зменшити витрати зі шлаками  $q_6$  і від механічної неповноти згорання  $q_4$  в тепловому балансі, а від того й ще більше підняти ККД.

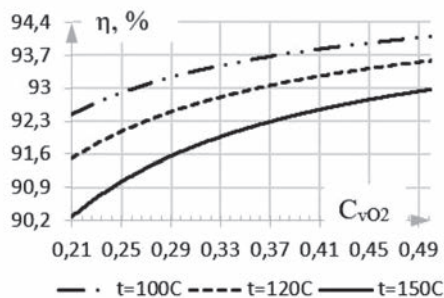


Рис. 5. Залежність ККД котла від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

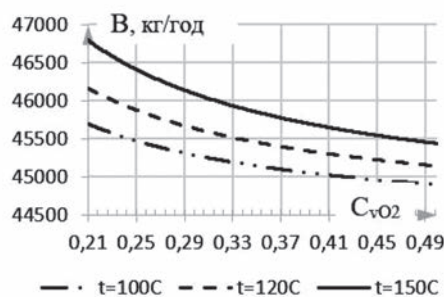


Рис. 6. Залежність витрати палива від концентрації кисню в дуттьовому повітрі

**Висновки.** Збагачення дуттьового повітря киснем призводить до низки змін у роботі теплогенеруючих пристроїв, зокрема парогенераторів на твердому паливі.

Змінюється склад топкового середовища та його теплофізичні характеристики, а також кількість

димових газів. Кількість димових газів зменшується. Збільшується в складі топкового середовища об'ємна частка трьохатомних газів і водяної пари з відповідним зменшенням умісту азоту. Через це інтенсифікуються теплообмінні процеси в топці котла, що призводить до збільшення поглинання теплоти екранними поверхнями топки й падіння температури димових газів на виході з топки.

Зменшення кількості димових газів призводить до зменшення їх швидкостей у конвективних поверхнях, що знижує частку конвективної теплопередачі в загальному теплообміні в повітропідігрівачі й економайзері.

Це повинно було б підтримувати температуру на виході з котла на більш-менш постійному рівні. Але зростання ступеня чорноти димових газів через збільшення об'ємної частки трьохатомних газів і водяної пари все ж таки призводить до її зменшення на виході з котла.

Збагачення киснем дуттьового повітря дає змогу суттєво зменшити зайвину повітря (можливо, і взагалі відмовитися від неї).

Зменшення кількості азоту призводить до зменшення ентальпії димових газів на виході з котла.

Усі ці фактори однозначно призводять до суттєвого зменшення витрати  $q_2$  з димовими газами в тепловому балансі котла, відповідно, і до підвищення ККД. До підвищення ККД призводить також можливість мінімізувати втрати з хімічним недопалом  $q_3$ . Підвищення ККД зменшує витрату палива. Згідно з розрахунком, витрата палива зменшується з 45700 кг/год при незбагаченому киснем дуттьовому повітрі до 44900 кг/год при збагаченні до 50% (рис. 6).

Є ще деякі моменти, які не враховані в загальному аналізі. Це очевидне зменшення споживання електроенергії на привід тягодуттьових машин, пов'язане зі зменшенням об'ємів дуттьового повітря та димових газів, а також для приводу вугільних млинів і систем подачі вугільного пилу в топку котла у зв'язку зі зменшенням споживання палива.

Загалом можна сказати, що збагачення киснем дуттьового повітря – це перспективний метод підвищення енергоефективності теплогенеруючих установок на твердому паливі, що сьогодні знаходяться в експлуатації без суттєвих змін у конструкції котлів.

#### Список літератури:

1. Міхненко С. ВДЕ тренди 2021 року. *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 22–23. URL: <https://aw-therm.com.ua/vde-trendi-2021-roku/> (дата звернення: 10.05.2021).
2. 2050 Long-Term Strategy / Climate Action. URL: [https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050\\_en](https://ec.europa.eu/clima/policies/strategies/2050_en) (дата звернення: 19.03.2020).

3. Солнечная панель дешевле 3 долларов за квадратный метр? Это теперь возможно. *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 30–32. URL: <https://aw-therm.com.ua/pv-panel-deshevle-3-dollarov-za-kvadratnyj-metr/> (дата звернення: 06.06.2021).
4. Хватит ли Земли для ВИЭ? *AW-THERM*. Січень-лютий 2021. С. 26–29. URL: <https://cutt.ly/bm2hW4R> (дата звернення: 12.07.2021).
5. В EDF отметили отсутствие пользы от перехода Германии на возобновляемые источники энергии. URL: <https://energосmi.ru/archives/40145> (дата звернення: 12.07.2021).
6. Oxygen generator plants by Linde. URL: <https://cutt.ly/ObOBGht> (дата звернення: 15.07.2021).
7. PSA and Membrane Gas Separation Technology – The Frequently asked Question. URL: <https://www.poxegioг.com/service/faq.html> (дата звернення: 19.07.2021).
8. Установка короткоцикловой адсорбции (КЦА). URL: <https://cutt.ly/9bOXloo> (дата звернення: 19.07.2021).
9. Мембранные кислородные установки. URL: <https://cutt.ly/qbOXPM3> (дата звернення: 15.07.2021).
10. Кулик М.П., Кравець Т.Ю., Семерак М.М. Аналіз наявних технологій розділення повітря для підвищення ефективності спалювання палива в теплоенергетиці. URL: <https://cutt.ly/ebOBhaB> (дата звернення: 15.07.2021).
11. Використання кисню і збагаченого киснем повітря в нагрівальних печах, колодязях, стендах розігрівання сталерозливних ковшів / І.Н. Карп, А.Н. Зайвий, Е.П. Марцевой, К.Е. П'яних. *Енерготехнології та ресурсозбереження*. 2012. № 3. С. 18–29.
12. Экономические аспекты обогащения воздушного дутья кислородом в нагревательных и термических печах / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев. *Металлургия: республиканский межведомственный сборник научных трудов*. Вып. 35. Минск : БНТУ, 2014. С. 8–16.
13. Интенсификация тепловых процессов в высокотемпературных установках на примере нагревательных печей ОАО «БМЗ» путем обогащения воздушной смеси кислородом / С.М. Кабишов, И.А. Трусова, П.Э. Ратников, Д.В. Менделев. *Литье и металлургия : научно-производственный журнал*. 2012. № 3 (67). С. 218–221.
14. Sanghyun Park, Jungeun A. Kim, Changkook Ryu, Won Yang, Young Ju Kim, Sangil Seo, School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon Korea «Effects of gas and particle emissions on wall radiative heat flux in oxy-fuel combustion». URL: <https://cutt.ly/xbOMa1q> (дата звернення: 19.07.2021).
15. Yukun Hu, KTH Royal Institute of Technology School of Chemical Science and Engineering Department of Chemical Engineering and Technology Energy Processes Stockholm, Sweden, «CO<sub>2</sub> capture from oxy-fuel combustion power plants». URL: <https://cutt.ly/qbOMzpt> (дата звернення: 19.07.2021).
16. Isabel Guedea, Irene Bolea, Carlos Lupiáñez, Luis I. Díez, Luis M. Romeo., (CIRCE, Spain), «Oxyfuel combustion of Spanish anthracite in fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/EbOMmf1> (дата звернення: 19.07.2021).
17. Monika Kosowska-Golachowska, Adam Luckos, Konrad Klos, Tomasz Musial, (Czestochowa University of Technology Institute of Thermal Machinery Armii Krajowej Czestochowa, Poland), «Oxy-combustion of different coals in a circulating fluidized bed». URL: <https://cutt.ly/5bOMENx> (дата звернення: 19.07.2021).
18. Toni Pikkarainen, Jaakko Saastamoinen, Heidi Saastamoinen, Timo Leino and Antti Tourunen, (Technical Research Centre of Finland), «Development of 2<sup>nd</sup> generation oxyfuel CFB technology – smallscale combustion experiments and model development under high oxygen concentrations». URL: <https://cutt.ly/obOMYQt> (дата звернення: 19.07.2021).
19. Nov. 11, 1856: Bessemer Becomes the Man of Steel. URL: <https://www.wired.com/2010/11/nov-11-1856-bessemer-becomes-the-man-of-steel-2/> (дата звернення: 20.07.2021).
20. Ратников П.Э., Менделев Д.В. Оптимизация топливно-кислородных режимов сжигания газообразного топлива в теплогенерирующих установках.
21. Техничко-економическая эффективность использования дутья, обогащенного кислородом, в отопительных котлах малой мощности / П.Э. Ратников, Д.В. Менделев, И.А. Трусова, С.М. Кабишов. *Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. Серия «Энергетика»*. 2013. № 6. С. 52–58.
22. Методика оценки энергоэффективности обогащения воздуха кислородом при сжигании газообразного топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова и др. *Энергоэффективность*. 2013. № 1. С. 32–34.
23. Эффективность применения кислорода при сжигании различных видов топлива / В.И. Тимошпольский, С.М. Кабишов, И.А. Трусова, Д.В. Менделев, Г.А. Румянцева. *Энергоэффективность*. 2013. № 12. С. 36–38.
24. Мищенко М.В., Маслов В.А., Дзюбенко О.Л. Повышение экономической эффективности процессов топливных теплоэнергетических установок путем обогащения технологического воздуха кислородом. *Современные научные исследования и инновации*. 2011. № 7.



25. Список тепловых электростанций Украины. URL: <https://cutt.ly/bm2jJcZ> (дата звернення: 20.07.2021).
26. Клепиков В.Б., Мехович С.А., Клепикова С.В. Экономический, энергоресурсосберегающий и экологический аспекты экономии электроэнергии в Украине. *Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит*. 2010. № 12 (82). URL: <https://cutt.ly/gbOVIM7> (дата звернення: 19.07.2021).
27. Дрьомін В.П., Костенко Г.П., Згуровець О.В. Аналіз витрат палива блоками ТЕС і можливостей їх економії при регулюванні електроспоживання. *Проблеми загальної енергетики*. 2008. № 17. URL: <https://cutt.ly/vbOVDrP> (дата звернення: 19.07.2021).
28. Белосельский Б.С., Барышев В.И. Низкосортные энергетические топлива: Особенности подготовки и сжигания. Москва : Энергоатомиздат, 1989. 136 с.
29. Семергей В.А., Бирюков А.Б. Совершенствование технологи сжигания пылеугольного топлива в топках энергетических котлов. с. 24.
30. Рохман Б.Б. Численный анализ различных схем реконструкции существующей системы пылеприготовления при переводе парогенератора ТП-100 с АШ на газовый каменный уголь. С. 6–16.
31. Мірошніченко Є.С., Чернявський М.В., Порівняльний аналіз застосування різних схем організації пилосистем котла ТП-100 для спалення кам'яного вугілля з досягненням оптимального топкового режиму. С. 13–32.
32. Тепловой расчет котельных агрегатов. Нормативный метод / под ред. Н.В. Кузнецова и др. Москва : Энергия, 1973. 296 с.
33. Ривкин С.Л. Термодинамические свойства газов. 4-е изд., перераб. Москва : Энергоатомиздат, 1987. 288 с.
34. Термодинамические свойства азота. ГСССД : монография / В.В. Сычев, А.А. Вассерман, А.Д. Козлов и др. Москва : Издательство стандартов, 1977. 352 с.
35. Александров А.А., Григорьев Б.А. Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара : справочник. Москва : МЭИ, 1999. 169 с.
36. Лавров Н.В. Физико-химические основы горения и газификации топлива. Москва : Metallurgizdat, 1957. 288 с.
37. Горение углерода / Л.Н. Хитрин, О.А. Цуханова, Х.И. Колодцев, М.К. Гродзовский. Москва-Ленинград : Издательство АН СССР, 1949. 407 с.
38. Делягин Т.Н., Лебедев В.И., Пермяков Б.А. Теплогенерирующие установки. Москва : Стройиздат, 1986. 560 с.

**Glamazdin P.M., Diachenko A.A. OXYGEN ENRICHMENT OF BLOWING AIR OXYGEN TO INCREASE ENERGY EFFICIENCY OF ENERGY STEAM GENERATORS**

*Electricity needs in Ukraine are met by 15 thermal power plants (TPPs) and 20 thermal power plants (CHPs), which were built in the last century. At present, they do not meet either the EU's environmental or energy efficiency requirements and need to be modernized. One of the means of modernization may be the enrichment of blast air in the boiler plants of thermal power plants and combined heat and power plants, which determines the urgency of the work.*

*The aim of the work is to quantify the possibilities of raising the energy efficiency of TPP and CHP boilers by oxygen enrichment of blast air.*

*To achieve this goal, the following tasks are formulated in the work: conducting thermal calculation of a steam boiler on coal; determining the range of optimal oxygen concentrations in blast.*

*The tasks set in the work were solved by the calculation method using the normative method of thermal calculation of boiler units.*

*The study revealed a positive effect of enrichment of blast air with oxygen for steam boilers using coal as fuel.*

*Enrichment of blast air with oxygen leads to increased boiler efficiency. It is shown that for the operated boilers there is a limit of enrichment of blast air with oxygen, according to which further enrichment requires significant changes in the boiler design.*

*As the temperature of the flare in the furnace increases and the N<sub>2</sub> nitrogen content in the combustion medium decreases, it is fair to expect a more complete combustion of coal dust and, accordingly, a reduction in heat loss with slags (q<sub>δ</sub>). However, reliable results of experimental studies could not be found, so this addition in the furnace balance of the boiler remains unchanged and is taken similarly to the indicator according to the normative method of thermal calculation of boiler units.*

**Key words:** heat power, steam generators, solid fuel, oxygen-enriched blast air, boiler efficiency, nitrogen oxides.

## ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 621.35

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/28>

**Гаврилова А.А.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Суровицький С.В.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

**Майзеліс А.О.**

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

### СПВОСАДЖЕННЯ ЦИНКУ З НІКЕЛЕМ У ПІРОФОСФАТНО-ЦИТРАТНОМУ ЕЛЕКТРОЛІТІ

*Покриття сплавом цинк-нікель використовують як захисні в різних галузях промисловості. Стаття присвячена визначенню впливу умов електроосадження покриттів сплавом цинк-нікель з пірофосфатно-цитратного електроліту на їх властивості з метою оптимізації параметрів технологічного процесу. Об'єкт досліджень – електродні процеси в пірофосфатно-цитратному електроліті для осадження покриттів сплавом Zn-Ni. Використано методи циклічної вольтамперометрії, хронопотенціометрії (потенціостат-гальваностат MTech PGP-550s і метод поляризаційних досліджень корозійних властивостей покриттів у 3,5% NaCl (потенціостат Elins P-45X)). Виявлено значну деполяризацію розряду цинку при співосадженні з нікелем у пірофосфатно-цитратному електроліті, а також значно більшу корозійну стійкість сплаву порівняно із цинком, осадженого з пірофосфатно-цитратного електроліту. Хронопотенціограми осадження покриттів при густині струму, яка вища за 20 мА/см<sup>2</sup>, відображають збільшення потенціалу осадження в часі, що може свідчити про перевищення граничної густини струму осадження сплаву. При цій густині струму вихід сплаву максимальний. Залежність умісту в сплаві нікелю, навпаки, має мінімум при густині струму 30 мА/см<sup>2</sup>. Відмічено, що покриття сплавом, яке осажене при густині струму 20 мА/см<sup>2</sup> і більше, збагачене цинком, ніж покриття, осажене при густині струму 10 мА/см<sup>2</sup>, має, однак, у 1,5 рази більшу швидкість корозії в розчині 3,5% NaCl в основному за рахунок зменшення в 1,7 рази поляризаційного опору сплаву. У цьому корозійному середовищі значення стаціонарного потенціалу сталевих зразків з покриттям сплавом Zn-N є більш від'ємними, ніж корозійний потенціал вуглецевої сталі. Зі збільшенням товщини покриття стаціонарний потенціал у розчині 3,5% NaCl спочатку стає більш електронегативним, але потім зростає, згідно зі зміною складу покриття. Отримані дані свідчать, що покриття сплавом Zn-Ni товщиною 3–10 мкм захищають сталеву поверхню завдяки більш негативному потенціалу і здатні замінити значно більш товсті цинкові покриття.*

**Ключові слова:** електроосадження, сплав цинк-нікель, склад покриття, корозійна стійкість, пірофосфат, цитрат.

**Постановка проблеми.** Цинк захищає вуглецеву сталь від корозії завдяки тому, що його потенціал є більш електронегативним за потенціал сталі, тому цинкове покриття сталевих поверхонь широко розповсюджене для захисту від корозії в різних галузях промисловості, таких як автомобільна, електрична, аерокосмічна тощо. Однак для досягнення високого рівня захисту й збільшення терміну експлуатації в корозійних середовищах цинкове покриття має бути досить

товстим (товщиною зазвичай вище 25 мкм). Збільшення товщини покриття зменшує, наприклад, зварюваність і пластичність сталевих листів під тиском [1]. Це призводить до потреби в більш тонких покриттях із покращеними порівняно із цинком властивостями,

Покриття електроосадженими сплавами цинку та нікелю мають особливо високу корозійну стійкість і кращу морфологію поверхні, ніж чистий цинк [2]. Аерокосмічна промисловість робить акцент на

цинк-нікелевих сплавах як альтернативі токсичним кадмієвим покриттям. Докладаються зусилля щодо заміни кадмію через отруєння саме металом, водневу крихкість і запобігання використанню цінної ванни при його електроосажденні. Тому проведено багато досліджень корозійних властивостей покриттів Zn-Ni залежно від умов їх осаждення [3].

Покриття із цинк-нікелевих сплавів, окрім використання в сталевих кузовах автомобілів [3], розглядаються й для інших застосувань, таких як електрокаталізатори [4], електроди для водневого електролізу [5], покриття для зварювання сталевих дроту, в аерокосмічній галузі й електроніці. Досліджують осаждення цинк-нікелевих покриттів на електротехнічних і будівельних виробках [1], навіть на алюмінієвих сплавах.

Тому створення електролітів для осаждення покриттів сплавом Zn-Ni, які є анодними щодо сталевих поверхонь і мають підвищені корозійні властивості, є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Електроосаждення бінарних сплавів відбувається тоді, коли їх потенціали відновлення з простих іонів близькі або коли додаються ліганди, які утворюють із металами комплекси з різними константами рівноваги.

Електроліти для осаждення покриттів цинк-нікелевими сплавами можна класифікувати на дві основні категорії: кислі (сульфатні, хлоридні, хлораміакатні, ацетатні, цитратні [6; 7]) і лужні (пірофосфатні, діетаноладіамінові, триетаноламінові [8]). Сплавотворення цинку з нікелем має аномальний характер, оскільки Zn, менш благородний метал, осаджується переважно. У лужних електролітах цей характер проявляється більшою мірою [9].

Залежно від вмісту Ni цинк-нікелеві сплави мають різні фази. Як захисний шар від корозії для електроактивної сталі або інших металевих деталей в агресивних середовищах зазвичай використовується гальванічна  $\gamma$ -фаза сплаву Zn-Ni [10; 11], яка має вміст Ni від 15,4 до 24,0 мас. %. Ця фаза має вищу корозійну стійкість, кращі механічні характеристики (твердість, пластичність, зносостійкість і зварюваність) і вищу термостійкість, ніж чистий Zn або інші сплави з Zn.

Використання двох лігандів в електролітах для осаждення сплавів здатне значно покращувати властивості покриттів [12; 13], тому становить інтерес дослідження характеристик покриттів, що отримують у пірофосфатному електроліті з уведенням додаткового ліганду – цитрату, який, окрім того, використовують і як буферну речовину, блискоутворювач і вирівнювач.

**Постановка завдання.** Метою досліджень було визначення впливу товщини й густини струму осаждення покриттів сплавом Zn-Ni з пірофосфатно-цитратного електроліту на їх вихід за струмом, склад і корозійні характеристики.

**Виклад основного матеріалу.** Методика. Циклічні вольтамперні залежності (ЦВА), хронопотенціограми одержані за допомогою потенціостату MTEch PGP-550s, корозійні діаграми – Elins P-45X. Швидкість розгортки потенціалу становила 2–10 мВ/с.

Використовували електроди з платини з робочою площею поверхні  $S = 1 \text{ см}^2$ , які анодно травили в борфторидній кислоті й катодно відновлювали в розчині сульфату натрію. Покриття сплавом Zn-Ni для визначення їх складу та виходу за струмом осаджували на електроди, виготовлені з міді. Для визначення корозійних властивостей покриттів їх осаджували на зразки з вуглецевої сталі Ст. 3 з робочою поверхнею (1,5×1,5) см. Сталеві зразки зачищали силікон-карбідним папером 500–1000 grit, за необхідності знежирювали в розчині лабоміду, травили в розчині HCl протягом 10–5 с. Потім промивали водопровідною та дистильованою водою, додатково зачищали наждачним папером 1000–3000 grit до дзеркального блиску, повторно промивали й сушили. Як допоміжний електрод використовували пластину з платини. Електродом порівняння застосовували насичений хлорид-срібний електрод, стосовно якого наведені потенціали. Дифузійний потенціал усували за допомогою сольового містка, заповненого насиченим розчином KCl з агар-агаром.

Для приготування електролітів використовували концентровані розчини компонентів, що входять до електролітів, склад яких наведено в таблиці 1. Усі реактиви розчиняли в дистильованій воді. Значення рН 8,5 електролітів підтримували додаванням гідроксиду калію або сульфатної кислоти та контролювали в процесі експлуатації кожної порції електроліту за допомогою рН-метра СТ-6020А.

Таблиця 1  
Склади досліджуваних електролітів

Компонент	Склад електроліту, моль/дм <sup>3</sup>	
	1	2
Нікелю сульфат NiSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	–	0,12
Цинку сульфат ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0,2	0,08
Калію пірофосфат K <sub>4</sub> P <sub>2</sub> O <sub>7</sub>	0,4	0,4
Калію цитрат K <sub>3</sub> Cit	0,10	0,10
Калію хлорид KCl	0,2	

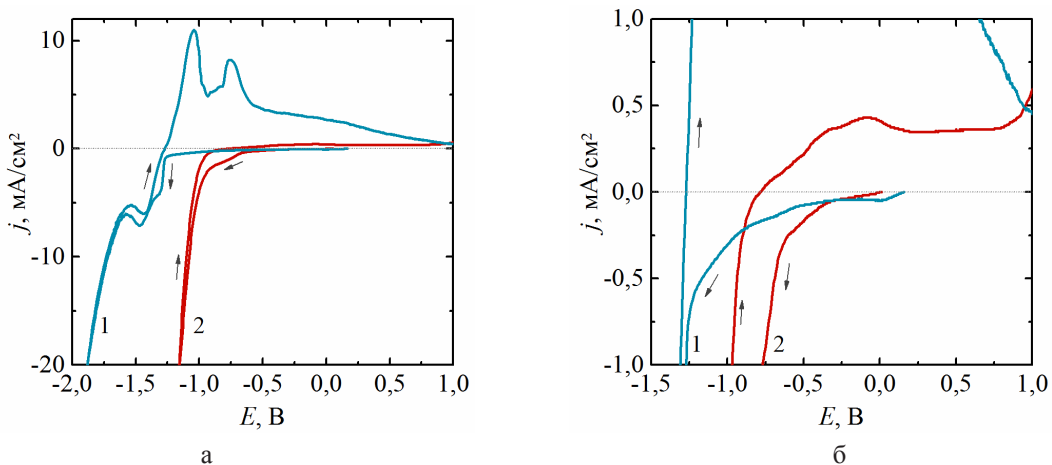
Вихід за струмом покриттів визначали гравіметричним методом. Аналіз елементного складу зразків сплаву здійснювали на спектрометрії СПРУТ. Аналіз фазового складу здійснювали методом рентгенівської дифрактометрії за допомогою установки типу ДРОН.

Результати досліджень. На рис. 1 показано порівняння ЦВА в полілігандних пірофосфатно-цитратних електролітах цинкування та для осадження сплаву Zn-Ni. Присутність іонів нікелю (катодна гілка кр. 2 рис. 1а) деполяризує виділення цинку й суттєво полегшує виділення водню, оскільки перенапряга його виділення на нікелі набагато менша, ніж на цинку. Вільного цинку в сплаві при осажденні до 20 мА/см<sup>2</sup> немає, оскільки потенціал початку анодної гілки на ЦВА в електроліті для осадження сплаву є суттєво більш позитивним, ніж на ЦВА в електроліті цинкування (рис. 1 б). Анодний пік на ЦВА в електроліті для нане-

сення сплаву відповідає розчиненню фази, збагаченої цинком, а фаза, збагачена нікелем, окислюється при більш позитивних потенціалах. Низьке співвідношення кількості електрики під анодними піками щодо кількості електрики під катодними гілками ЦВА, а також форма кривої 2 свідчать про неповне розчинення осаду й високий корозійний опір цього матеріалу в цьому електроліті.

При зниженні швидкості розгортки потенціалу (кр. 1, рис. 2 а) катодний процес утруднюється (поляризація збільшується), що свідчить про збагачення осаду більш негативним цинком, на якому менша перенапряга виділення водню. Про це свідчить і значне збільшення кількості електрики під анодними піками в ділянці розчинення збагаченого цинком осаду (кр. 1, рис. 2 б).

Хронопотенціограми гальваностатичного осадження сплаву на електроді з міді (рис. 3 а) також свідчать про збагачення осаду цинком з часом



Швидкість розгортки потенціалу – 10 мВ/с.  
 Рис. 1. ЦВА на Pt у пірофосфатно-цитратних електролітах № 1 для осадження цинку (1) і № 2 для осадження сплаву Zn-Ni (2)

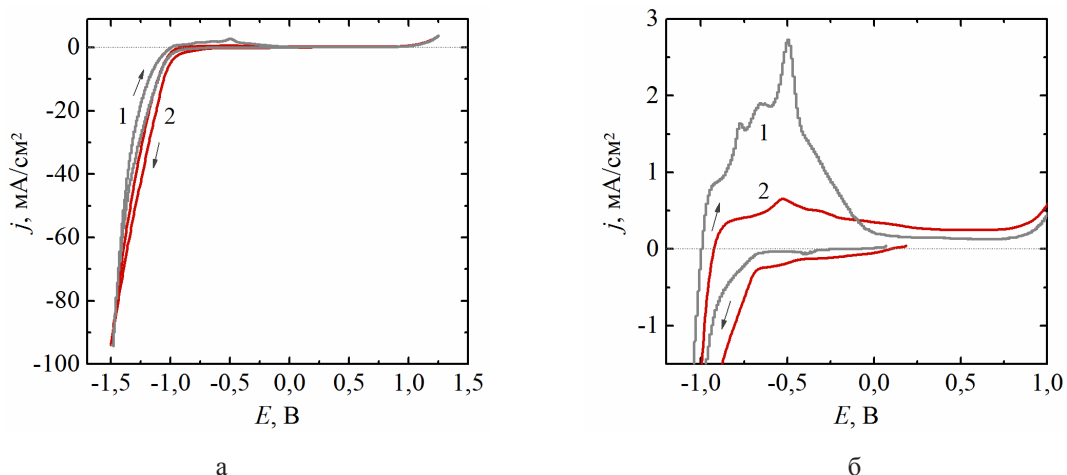


Рис. 2. ЦВА на Pt в електроліті № 2 для осадження сплаву Zn-Ni зі швидкістю розгортки потенціалу, мВ/с: 1 – 2; 2 – 10

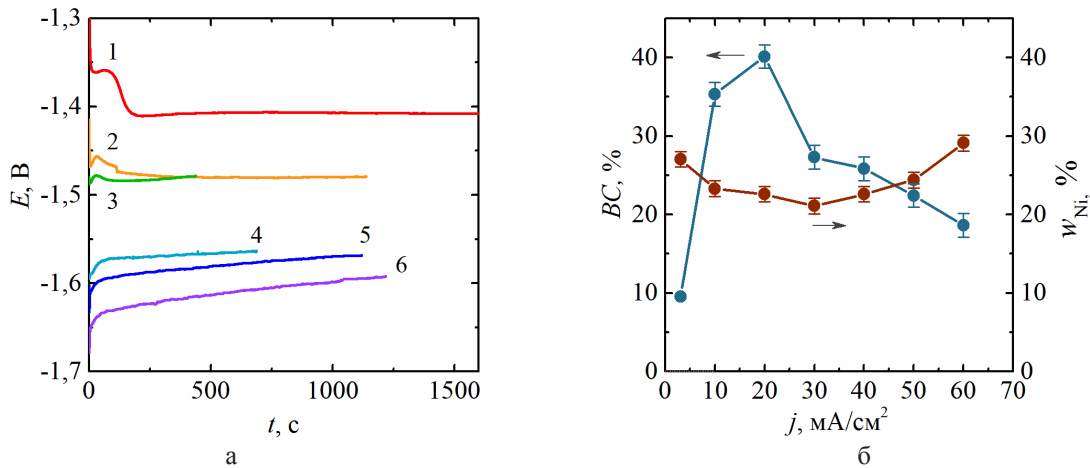


Рис. 3. Хронопотенціограми (а) осадження сплаву Zn-Ni з пірофосфатно-цитратного електроліту № 2 при густині струму, mA/cm<sup>2</sup>: 1 – 3; 2 – 10; 3 – 20; 4 – 30; 5 – 50; 6 – 60, і залежності виходу сплаву за струмом (1б) і вмісту нікелю в осаді (2 б) від густини струму осадження

Таблиця 2

#### Корозійні характеристики покриттів сплавом Zn-Ni

$j_k$ , mA/cm <sup>2</sup>	$R_p$ , Ом	$E_{ст}$ , В	$b_k$ , мВ	$b_a$ , мВ	$j_{кор}$ , мкА/см <sup>2</sup>
10	417	-0,855	98	54	36,5
20	247	-0,875	85	50	55,2

осадження. При густині струму до 20 mA/cm<sup>2</sup> (кр. 1–3) потенціал осадження зсувається в бік більш електронегативних значень потенціалу з часом. Починаючи з 30 mA/cm<sup>2</sup> у перші секунди потенціал є найбільш негативним, з часом повільно зсувається в бік позитивних значень (кр. 4–6), що може свідчити про перевищення граничної густини струму виділення сплаву.

Залежність ВС сплаву від густини струму має максимум при густині струму 20 mA/cm<sup>2</sup> (рис. 3 б, кр. 1). При більш низькій густині струму зниження ВС пов'язано, імовірно, зі збагаченням осаду нікелем (кр. 2), на якому перенапряга виділення водню нижча, і його внесок стає вищим. При більш високій густині струму зростає як вміст нікелю, так і частка виділення водню порівняно з часткою струму, що витрачається на виділення сплаву. В обох випадках у покритті, окрім  $\gamma$ -фази, з'являються фази, збагачені нікелем.

Стационарний потенціал  $E_{ст}$  сплаву, осадженого на сталеву поверхню, при підвищенні густини струму  $j_k$  його осадження зсувається в бік негативних значень (рис. 4), що знаходиться згідно зі зменшенням вмісту нікелю в цьому діапазоні густини струму (кр. 2, рис. 3 б).

Зі збільшенням вмісту цинку (зі збільшенням густини струму) знижується поляризаційний опір покриття  $R_p$  і збільшується густина струму його корозії  $j_{кор}$  (таблиця 2).

Первинний, тонкий, шар покриття сплавом має підвищений вміст нікелю, потім покриття збагачується цинком, але внаслідок більш тривалого електролізу виділення в сплав цинку гальмується й покриття починає збагачуватися нікелем (рис. 5 а).

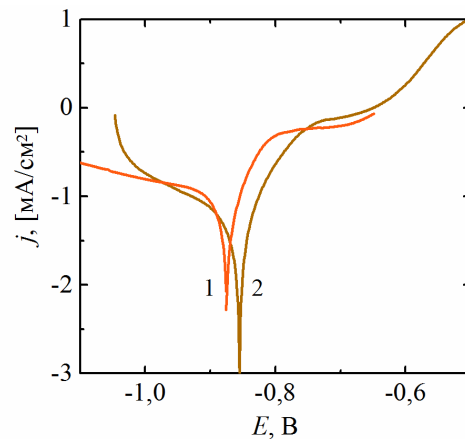


Рис. 4. Корозійні діаграми в розчині 3,5% NaCl сталевих зразків із покриттям сплавом Zn-Ni, що осаджене при густині струму, mA/cm<sup>2</sup>: 1 – 20; 2 – 10

Зі збільшенням товщини покриття стаціонарний потенціал у розчині 3,5% NaCl спочатку стає більш електронегативним, але потім зростає (рис. 5 б), що знаходиться згідно зі зміною складу покриття, а також зі зменшенням вкладу потенціалу сталеві основи в змішаний потенціал зразків з покриттям.

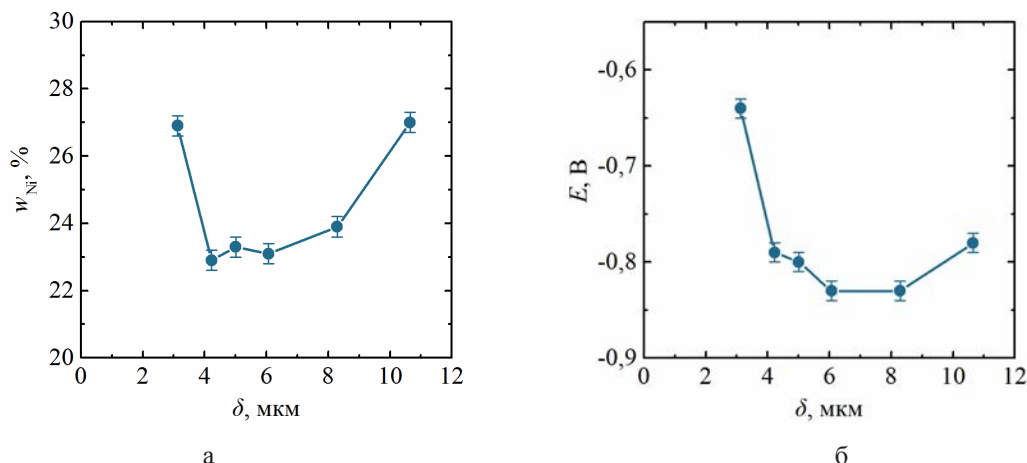


Рис. 5. Залежність вмісту Ni (а) і стаціонарного потенціалу в розчині 3,5% NaCl (б) покриття Zn-Ni, що осаджене при густині струму 20 мА/см<sup>2</sup>, від його товщини

**Висновки.** Виявлено значну деполяризацію розряду іонів цинку при співосажденні з нікелем у пірофосфатно-цитратному електроліті, а також значно більшу корозійну стійкість сплаву порівняно із цинком у цьому електроліті. При зменшенні швидкості розгортки потенціалів в умовах ЦВА сплав, осажденний у такому же діапазоні потенціалів, збагачується цинком.

Збільшення густини струму осаждення сплаву понад 20 мА/см<sup>2</sup> призводить до збільшення потенціалу осаждення в часі, що може свідчити про перевищення граничної густини струму осаждення сплаву. Вихід сплаву за струмом макси-

мальний при густині струму 20 мА/см<sup>2</sup>, уміст у сплаві нікелю мінімальний при 30 мА/см<sup>2</sup>.

Покриття сплавом, що осаджене при густині струму 20 мА/см<sup>2</sup>, має в 1,5 рази більшу швидкість корозії в розчині 3,5% NaCl, ніж покриття, осажене при 10 мА/см<sup>2</sup>, в основному за рахунок зменшення в 1,7 рази поляризаційного опору сплаву, що більш збагачений цинком. Стаціонарний потенціал у цьому корозійному середовищі сталевих зразків з покриттям сплавом різної товщини змінюється згідно зі зміною складу покриття, а також зі зменшенням з товщиною вкладу більш позитивного потенціалу сталеві основи.

#### Список літератури:

1. Zinc-nickel alloy electrodeposition: characterization, properties, multilayers and composites / N. Lotfi, M. Aliofkhaezraei, H. Rahmani, Gh. Barati Darband. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*. 2018. Vol. 54. № 6. P. 1102–1140.
2. Basavanna S., Naik Y.A. Electrochemical studies of Zn-Ni alloy coatings from acid chloride bath. *Journal of applied electrochemistry*. 2009. Vol. 39. № 10. P. 1975–1982.
3. Cyanide formation in zinc-nickel electroplating / B. Sonntag, B. Dingwerth, R. Vogel, B. Scheller. *Galvanotechnik*. 2010. Vol. 101. № 5. P. 992–996.
4. Sheela G., Pushpavanam M., Pushpavanam S. Zinc-nickel alloy electrodeposits for water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*. 2002. Vol. 27. № 6. P. 627–633.
5. Müller C., Sarret M., Benballa M. Some peculiarities in the codeposition of zinc-nickel alloys. *Electrochimica Acta*. 2001. Vol. 46. № 18. P. 2811–2817.
6. Effects of Silica Nanoparticle Co-Deposition on Macrothrowing Power of Zinc-Nickel Alloy Plating from an Acid Sulfate Bath / M. Hino, K. Murakami, K. Muraoka, N. Nagata, T. Kanadani. *Materials Transactions*. 2015. P. M2014329.
7. Effect of diethanolamine and triethanolamine on the properties of electroplated Zn-Ni alloy coatings from acid bath / O. Hammami, L. Dhouibi, P. Berçot, E.M. Rezrazi, E. Triki. *The Canadian Journal of Chemical Engineering*. 2013. Vol. 91. № 1. P. 19–26.
8. Electrodeposition Behavior of a Zn-Ni Alloy in an Alkaline Zincate Solution / H. Nakano, S. Arakawa, Y. Takada, S. Oue, S. Kobayashi. *Materials Transactions*. 2012. Vol. 53. № 11. P. 1946–1951.
9. Chandrasekar M.S., Srinivasan S., Pushpavanam M. Properties of Zinc alloy electrodeposits produced from acid and alkaline electrolytes. *Journal of solid state electrochemistry*. 2009. Vol. 13. № 5. P. 781–789.
10. Gamma-phase Zn-Ni alloy deposition by pulse-electroplating from a modified deep eutectic solution / C. Lei, H.F. Alesary, F. Khan, A.P. Abbott, K.S. Ryder. *Surface and Coatings Technology*. 2020. Vol. 403. P. 126434.

11. Бык Т.В., Цыбульская Л.С. Формирование, структура и свойства электрохимически осаждаемых цинк-никелевых сплавов. *НАН Беларуси*. 2002. № 1. Р. 54.
12. Maizelis A., Bairachniy B. Protection of NdFeB magnets by multilayer coating. *2019 IEEE 39th international conference on electronics and nanotechnology (ELNANO)*. IEEE, 2019. P. 596–599.
13. Електрохімічне осадження сплаву олово-цинк з цитратно-аміакатного електроліту / С.Г. Дерібо, С.А. Лещенко, В.П. Гомозов, Ю.І. Коваленко. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія «Хімія, хімічна технологія та екологія». 2021. № 1 (5). С. 69–75.

#### **Havrylova A.A., Surovitskiy S.V., Maizelis A.O. ZINC AND NICKEL CODEPOSITION IN PYROPHOSPHATE-CITRATE ELECTROLYTE**

*Zinc-nickel alloy coatings are used as protective in various industries. The paper is devoted to determination of the influence of conditions of zinc-nickel alloy electrodeposition from pyrophosphate-citrate electrolyte on their properties in order to optimize the parameters of the technological process. The object of study is electrode processes in pyrophosphate-citrate electrolyte for deposition of coatings with Zn-Ni alloy. The methods of cyclic voltammetry, chronopotentiometry (MTech PGP-550s potentiostat-galvanostat) and the method of polarization studies of the corrosion properties of coatings (Elins P-45X potentiostat) are used. Significant depolarization of the zinc discharge during codeposition with nickel in the pyrophosphate-citrate electrolyte, as well as significantly greater corrosion resistance of the alloy compared to zinc deposited from pyrophosphate-citrate electrolyte. Chronopotentiograms of coatings deposition at current density higher than 20 mA/cm<sup>2</sup> show an increase in deposition potential over time, which may indicate that limiting current density of the deposition of the alloy is exceeded. At this current density, the current efficiency of the alloy is maximal. The dependence of nickel content in the alloy, on the contrary, has a minimum at a current density of 30 mA/cm<sup>2</sup>. It is noted that the alloy coating, which is deposited at a current density of 20 mA/cm<sup>2</sup> and more enriched with zinc than the coating deposited at a current density of 10 mA/cm<sup>2</sup>, has, however, 1.5 times higher corrosion rate in a solution of 3.5% NaCl, mainly due to 1.7 times lower polarization resistance of the alloy. In this corrosive environment, the values of the stationary potential of steel samples coated with Zn-N alloy are more negative than the corrosion potential of carbon steel. As the coating thickness increases, the steady state potential in the 3.5% NaCl solution first is more electronegative, but then increases, which is in accordance with the change in the composition of the coating. The obtained data show that coatings with Zn-Ni alloy with a thickness of 3–10 μm protect steel surface due to more electronegative potential and are able to replace much thicker zinc coatings.*

**Key words:** electrodeposition, zinc-nickel alloy, coating composition, corrosion resistance, pyrophosphate, citrate.

**Голуб Л.С.**

Український державний хіміко-технологічний університет

**Левченко Є.П.**

Український державний хіміко-технологічний університет

## РОЗРОБКА ДОБАВОК БАГАТОФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ДЛЯ ПОЛІМЕРНИХ МАТЕРІАЛІВ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ВІДХОДІВ ОЛІЙНОПЕРЕРОБНОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Сьогодні в Україні гостро стоїть питання застосування в полімерних матеріалах компонентів вітчизняного виробництва. Актуальним є пошук модифікуючих добавок багатоцільового призначення з метою заміни компонентів еластомерних композицій і лакофарбових матеріалів закордонного виробництва на аналогічні продукти українського виробництва. Крім того, важливим завданням є необхідність розширення температурного діапазону та збільшення терміну експлуатації полімерних матеріалів. Одним із ефективних шляхів вирішення цього питання є використання відходів олійнопереробної промисловості. У статті розглянуто можливість використання фосфатидного концентрату, який є відходом на стадії рафінації під час виробництва соняшникової олії, у ролі термостабілізатора та диспергатора в складі полімерних та еластомерних матеріалів. Додавання фосфатидного концентрату й лецитину до складу гумових сумішей показало, що ці добавки можуть виступати не як заміна стеаринової кислоти, а і як ефективні протистаріючі добавки для захисту гум від теплового старіння. Застосування фосфатидного концентрату як активатора-диспергатора в складі гум промислового призначення, призначених для виготовлення протектора вантажних шин, показало, що заміна стеаринової кислоти дає змогу одержати гуми з комплексом властивостей, які практично не поступаються базовим. Найкращі фізико-механічні показники мають вулканізати, які містять 14 мас. ч. суміші фосфатидного концентрату з лецитином. Показано, що оптимальним умістом дослідних добавок у складі алкідної емалі є 1,25% фосфатидного концентрату або 1,25% лецитину. Особливу увагу при виготовленні лакофарбових матеріалів приділяють рівномірному розподілу частинок твердої фази в дисперсійному середовищі. Диспергування пігментів у плівкоутворюючих речовинах або розчинах є найбільш енергоємною та складною стадією виробництва лакофарбових матеріалів. З отриманих результатів видно, що зі збільшенням кількості додавання фосфатидного концентрату й лецитину ступінь перетиру зменшується. Фізико-механічні показники емалі з дослідними добавками близькі до емалі без добавок.

**Ключові слова:** фосфатидний концентрат, еластомерні композиції, фізико-механічні показники, термічна стабільність, диспергатор, лакофарбові матеріали.

**Постановка проблеми.** Проблема довговічності гумових виробів безпосередньо пов'язана зі старінням гум і відповідним цьому процесу погіршенням пружно-міцнісних та еластичних властивостей. В основі старіння гум лежать процеси хімічної та механохімічної деструкції, що протікають в об'ємі виробу. Процеси старіння щороку призводять до вилучення зі сфери активного використання десятків тисяч тонн гумових виробів [1]. Для захисту гум від старіння до складу композиції додають компоненти, які мають протистаріючі властивості.

Лакофарбові матеріали (далі – ЛФМ) являють собою композиції, здатні забезпечувати формування на захищеній поверхні покриттів із заданим комплексом фізико-механічних і декоративних властивостей. Можливість формування

шару покриття визначається полімерним плівкоутворювачем, що є основою будь-якого лакофарбового матеріалу. Для надання спеціальних декоративних та експлуатаційних властивостей до лакофарбових матеріалів додають низку функціональних добавок [2]. Особливу увагу при виготовленні лакофарбових матеріалів приділяють рівномірному розподілу частинок твердої фази в дисперсійному середовищі, для чого застосовують перетирання пігментованих ЛФМ у дисольверах і бісерних млинах. Для покращення ступеня перетиру та зменшення часу виготовлення емалей актуальним є додавання спеціальних модифікаторів – диспергаторів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для встановлення можливості використання в ролі про-



тистаріючих добавок у складі еластомерних композицій досліджено досить широкий спектр сполук, але практично використовуються лише кілька продуктів закордонного виробництва, таких як N-ізопропіл-N'-феніл-п-фенілендіамін (Діафен ФП або IPPD), олігомер 2,2,4-триметил-1, 2-дигідрокінолін (ацентонаніл Н). При цьому найефективніша добавка, діафен ФП, виявляє схильність до дифузії до поверхні виробу з подальшою сублімацією з поверхні. При підвищенні температури дифузія та сублімація діафену ФП прискорюється, що є неприйнятним з огляду на потребу використання виробів з ряду еластомерних композицій в умовах підвищених температур. Необхідність розширення температурного діапазону та збільшення терміну експлуатації полімерних матеріалів потребує пошуку стабілізаторів вітчизняного виробництва, ефективних при високих температурах.

Для кращого розподілення компонентів еластомерних композицій зазвичай використовують активатори-диспергатори. У ролі диспергаторів і вторинних активаторів вулканізації широко застосовуються олеїнова, стеаринова й інші жирні кислоти. З метою пошуку альтернативних активаторів-диспергаторів розглянуто можливість застосування в складі гумових сумішей фосфатидного концентрату (далі – ФК). ФК є побічним продуктом виробництва рослинних олій (соняшникової, соєвої, ріпакової тощо) та виділяється на етапі їх очищення. При гідратації олії фосфатиди поглинають вологу й випадають в осад. Після сепарування олії відокремлені з нього фосфатидні концентрати висушують у вакуум-сушильному апараті, очищають розчиненням у гарячій рафінованій олії, відстоюють добу при 20°C і центрифугують. Фосфатиди не розчиняються у воді, а розчиняються в гарячих жирах та оліях, є хорошими емульгаторами [3]. Найважливішим складником фосфатидного концентрату є фосфоліпіди, які є структурними аналогами некаучукових компонентів натурального каучуку, що забезпечує можливість застосування ФК у складі еластомерних матеріалів. Наявність у ФК сполук, які мають поверхнево-активні властивості, дає змогу припустити можливість заміни стеаринової кислоти в складі еластомерних композицій на основі карболанцюгових каучуків.

Фосфатидний концентрат є поверхнево-активним агентом. Він добре працює на поверхні розділу фаз різних субстанцій. У присутності двох незмішуваних рідких фаз фосфатидний концентрат знижує поверхневий натяг і діє як емульгатор. При взаємодії між твердою і рідкою фазами

фосфатидний концентрат діє як змочувальний і диспергуючий агент. При застосуванні в складі органорозчинних лакофарбових матеріалів фосфатидний концентрат є диспергатором, який покращує ступінь перетиру і твердість емалі [4]. Тому поставлено завдання розробити нову рецептуру алкідної емалі з використанням фосфатидного концентрату в ролі диспергатора.

**Постановка завдання.** Мета статті – розробити модифікуючі добавки багатоцільового призначення на основі фосфатидного концентрату й лецитину з метою заміни компонентів еластомерних композицій і лакофарбових матеріалів закордонного виробництва на аналогічні продукти українського виробництва.

**Виклад основного матеріалу.** Захист каучуків, а також шин і гумотехнічних виробів на їх основі від різних видів старіння до теперішнього часу є одним із першочергових завдань. Пов'язано це зі значним ростом вимог до фізико-механічних властивостей еластомерних композицій за дедалі більших температур. При переробці гумових сумішей необхідно, щоб кристалічні стабілізатори добре диспергувалися в еластомері й у певний момент проявляли високу хімічну активність як протистаріючі добавки, антиоксиданти і протистомлювачі гум. Гарна розчинність і дисперговність стабілізаторів в еластомері забезпечує високу ефективність їх дії за функціональним призначенням.

Істотно поліпшити диспергування компонентів гумових сумішей можна при використанні поверхнево-активних речовин (далі – ПАР). Поверхнево-активні речовини відіграють істотну роль у процесах приготування й переробки гумових сумішей, вони знайшли широке застосування в усіх галузях сучасної промисловості [5]. За обсягом виробництва, асортименту на світовому ринку й важливістю ПАР знаходяться на одному рівні з каучуками, наповнювачами, протистаріючими добавками та іншими інгредієнтами. Таке широке застосування ПАР зумовлено, з одного боку, успіхами в сучасній синтетичній органічній хімії, а з іншого – техніко-економічною ефективністю цих речовин.

Актуальність цього напрямку полягає в розробці й використанні ПАР у складі гумових сумішей, переважно отриманих із промислових відходів різних виробництв і з метою зменшення забруднення навколишнього середовища й у зв'язку з обмеженістю матеріальних ресурсів.

Використання ПАР у складі рецептур гумових сумішей дає змогу поліпшити розподіл наповнювачів, протистаріючої групи, вулканізуючих агентів, тим самим з'являється можливість знизити

їх дозування, здешевлюючи й оптимізуючи гумові суміші. Крім цього, застосування ПАР дає змогу поліпшити технологічність гумових сумішей при виготовленні й переробці, зменшуючи енерговитрати [6].

З метою пошуку альтернативної заміни активаторів-диспергаторів розглянута можливість застосування в складі гумових сумішей фосфатидного концентрату й лецитину. Результати визначення властивостей стандартних гумових сумішей і вулканізаторів на їх основі підтвердили це припущення

(таблиця 1). Застосування ФК як активатора-диспергатора в складі гум промислового призначення, призначених для виготовлення протектора вантажних шин (на основі ненасиченого бутилового каучуку), показало, що заміна стеаринової кислоти дає змогу одержати гуми з комплексом можливостей, які практично не поступаються базовим.

Варто зазначити, що гумові суміші мають більш низьку в'язкість, що дає можливість припустити зниження енерговитрат при їх переробці.

Таблиця 1

**Зведена таблиця фізико-механічних властивостей гум, що містять у складі добавки фосфатидного концентрату й лецитину**

Найменування гумової суміші Склад композиції досліджених добавок	T1 стеарин	T2 фосфатидний концентрат	T3 лецитин	T4 фосфатидний концентрат та лецитин
<b>Режим вулканізації 153°C*10 хв</b>				
Твердість, ум. од.	58	60	59	56
Еластичність, %	43	49	71	51
Умвне напруження при 300% подовження, МПа	4,14	4,86	4,85	6,02
Умвна міцність при розтягуванні, МПа	15,84	17,43	16,06	17,16
Відносне подовження при розриві, %	670	590	640	620
<b>Режим вулканізації 153°C*20 хв</b>				
Твердість, ум. од.	61	62	58	57
Еластичність, %	57	48	57	55
Умвне напруження при 300% подовження, МПа	5,51	2,86	6,77	6,48
Умвна міцність при розтягуванні, МПа	17,83	17,41	14,94	16,04
Відносне подовження при розриві, %	590	545	500	500
<b>Режим вулканізації 153°C*30 хв</b>				
Твердість, ум. од.	62	64	61	58
Еластичність, %	37	55	60	53
Умвне напруження при 300% подовження, МПа	6,26	6,16	7,87	7,61
Умвна міцність при розтягуванні, МПа	17,29	17,23	18,31	18,66
Відносне подовження при розриві, %	525	525	500	520
<b>Випробування гум при нормальних умовах (23–25 °C)</b>				
<b>Режим вулканізації 153°C*20 хв</b>				
Твердість, ум. од.	60	62	57	55
Еластичність, %	35	53	47	48
Умвне напруження при 300% подовження, МПа	7,04	7,87	9,28	8,13
Умвна міцність при розтягуванні, МПа	18,22	18,77	15,49	19,26
Відносне подовження при розриві, %	550	550	420	575
Опір багаторазовим деформаціям при подовженні 200%, тис. ц.	14,58	15,02	12,39	15,41
<b>Випробування гум після теплового старіння 100°C*48 годин</b>				
Твердість, ум. од.	68	63	62	58
Еластичність, %	44	60	51	48
Умвне напруження при 300% подовження, Мпа	9,93	9,54	11,63	9,45
Умвна міцність при розтягуванні, Мпа	16,71	16,72	15,28	18,25
Відносне подовження при розриві, %	440	435	370	470
Опір багаторазовим деформаціям при подовженні 200%, тис. ц.	13,37	13,28	12,22	14,6
Коефіцієнт зміни властивостей	11,25	10,9	1,35	5,24

Графік залежності умовної міцності й відносного подовження при розтягуванні від виду та кількості добавок наведено на рисунку 1.

Як видно з наведених даних, при введенні композиції фосфатидного концентрату з лецитином показники умовної міцності значно вищі, ніж показники гумової суміші без добавок. При введенні фосфатидного концентрату показники майже не відрізняються від стандартної системи. Додавання лецитину в гумову суміш призводить до зниження показників порівняно зі зразками без добавок і зразками з додаванням композиції досліджених сполук.

Графік опору багаторазовим деформаціям при подовженні 200% при 25°C гумових сумішей, які

містять добавки на основі фосфатидного концентрату й лецитину, наведено на рисунку 2.

Обов'язковою умовою отримання якісних пігментованих лакофарбових матеріалів є рівномірний розподіл часток твердої фази в дисперсному середовищі. Необхідні експлуатаційні властивості покриттів, сформованих з пігментованих лакофарбових матеріалів, які досягаються за умови певною мірою дисперсності частинок пігменту й наповнювача. Диспергування пігментів у плівкоутворюючих речовинах або розчинах є найбільш енергоємною і складною стадією виробництва лакофарбових матеріалів. На її виконання витрачається 75–90% усіх енергоресурсів, що використовуються при отриманні алкідної емалі.

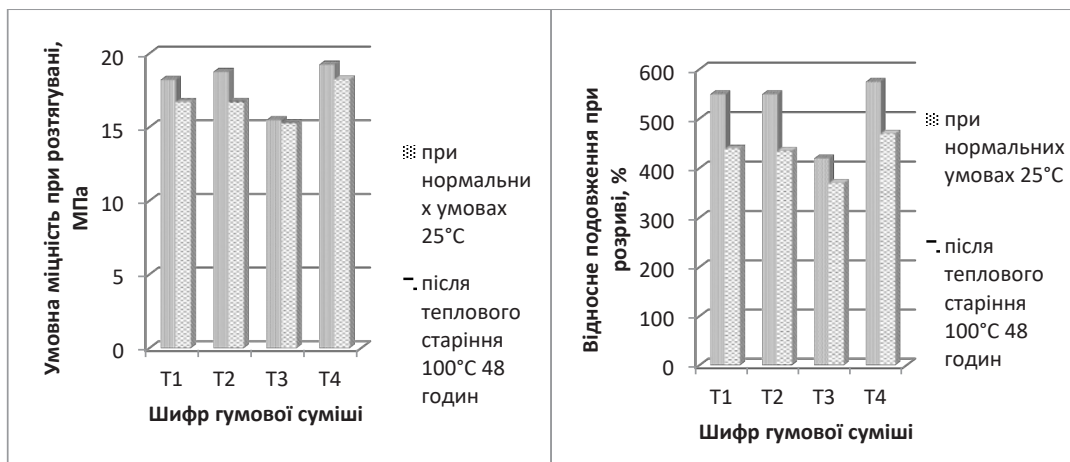


Рис. 1. Графік залежності умовної міцності й відносного подовження при розтягуванні від виду й кількості добавок

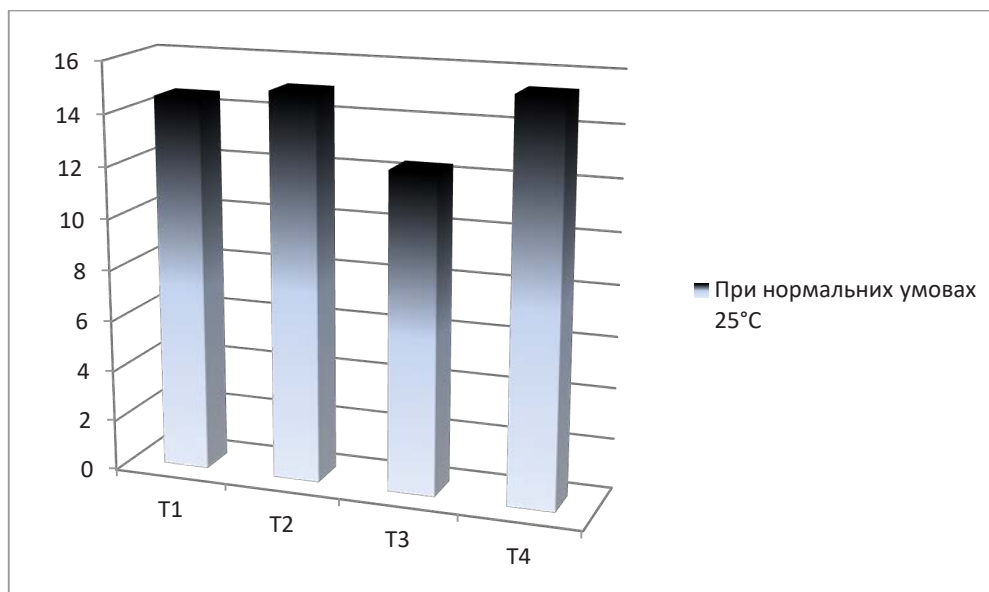


Рис. 2. Графік опору багаторазовим деформаціям при подовженні 200% при 25°C гумових сумішей, які містять добавки на основі фосфатидного концентрату й лецитину

Рецептура запропонованої алкідної емалі з добавкою фосфатидного концентрату та лецитину наведена в таблиці 2.

Таблиця 2  
Рецептура алкідної емалі, яка містить у складі добавки лецитину та фосфатидного концентрату

Компоненти	Кількість	
	%	г
Лак ПФ-060	40	44
Кальцит	40	80
Уайт-спірит	14	28
Сикатив	0,5	1
TiO <sub>2</sub>	5	24
Пігмент	1	24
Протиплівкова добавка	0,1	0,1
Фосфатидний концентрат	0,75	1,5
	1	2
	1,25	2,5
	1,5	3
Лецитин	0,75	1,5
	1	2
	1,25	2,5
	1,5	3

В'язкість алкідної емалі без розведення розчинником з добавкою фосфатидного концентрату та лецитину наведено на рисунку 3. Як бачимо з отриманих результатів, в'язкість із додаванням фосфатидного концентрату знижується, а з додаванням лецитину підвищується. Це пов'язано з тим, що фосфатидний концентрат являє собою рідину, яка краще змішується з іншими компонентами емалі, а лецитин – тверда порошкоподібна

речовина – погано поєднується з емаллю, що призводить до неповного змішування.

Зведені показники дослідженої алкідної емалі наведені в таблиці 3.

Як видно з отриманих результатів, зі збільшенням кількості додавання фосфатидного концентрату, ступінь перетиру зменшується. З додаванням добавки лецитину ступінь перетиру також зменшується. Це пояснюється тим, що ФК та лецитин при введенні до складу емалі виявляють властивості диспергатора. Твердість після 48 годин в емалей із додаванням фосфатидного концентрату знизилася, але вже після 72 годин твердість зросла. Твердість після 48 годин в емалей із додаванням лецитину не показує суттєвих змін, це спостерігається й після 72 годин. Можна зробити висновок, що добавки в емалях покращують їх властивості, а саме стійкість до фізичних та атмосферних впливів.

**Висновки.** Таким чином, проведені дослідження показали доцільність використання фосфатидного концентрату й лецитину в складі лакофарбових і гумовотехнічних матеріалів. Оптимальним є додавання до складу алкідної емалі 1,25% фосфатидного концентрату або 1,25% лецитину. Найкращі показники гуми загального призначення спостерігаються при додаванні композиції фосфатидного концентрату й лецитину в кількості 14 мас. ч. Розроблені добавки багатоцільового призначення для полімерних та еластомерних матеріалів, які дають змогу отримувати вироби з покращеним комплексом фізико-механічних властивостей.

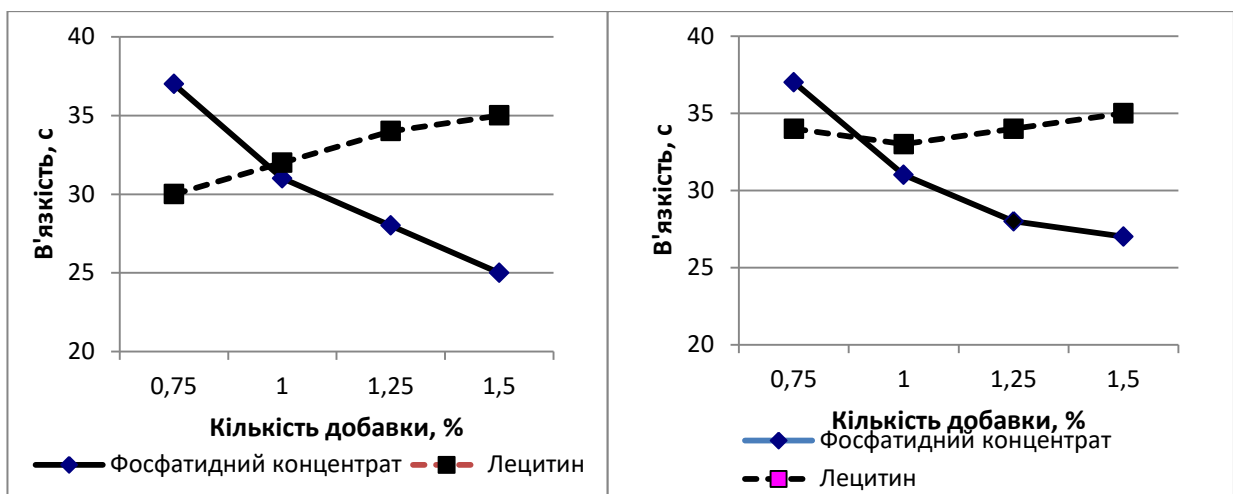


Рис. 3. Графік залежності в'язкості від виду й кількості добавок після 24 та 168 годин

Зведені показники алкідної емалі, яка містить досліджені добавки

Показники	Без добавок	Добавка фосфатидного концентрату, %				Добавка лецитину, %			
		0,75	1	1,25	1,5	0,75	1	1,25	1,5
Твердість через 48 годин після нанесення	0,25	0,25	0,15	0,15	0,14	0,07	0,17	0,18	0,19
Твердість через 72 годин після нанесення	0,25	0,23	0,16	0,17	0,17	0,07	0,19	0,19	0,20
Ступінь перетиру	24	27	23	20	20	28	25	21	21
Блиск 20° 60° 85°	3,8	4,3	2,8	5,0	4,7	1,6	0,9	1,0	0,8
	27,9	30,3	27,3	74,8	32,3	16,4	8,1	8,7	8,3
	59,9	66,5	74,8	73,9	70,2	48,9	22,5	21,2	20,2
Час і ступінь висихання, год	24	22	22	22	23	23	23	23	24
Укривистість плівки, г/м <sup>2</sup>	60	60	60	60	60	60	60	60	60
Еластичність плівки при вигині, мм, не більше	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Масова частка нелетких речовин, %, для емалей	60-66	62	62	62	63	60	60	60	61
Адгезія плівки, бали, не більше	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Стійкість покриття при температурі (20±2)°С до статичного впливу трансформаторного масла, год не менше	Перший сорт 24	23	23	23	23	22	22	22	21
Стійкість покриття при температурі (20±2)°С до статичного впливу води, год, не менше, для емалей не менше	Перший сорт 10	5	5	5	5	7	7	7	7

## Список літератури:

1. Ващенко Ю.М., Голуб Л.С., Ковтунник І.В. Аналіз можливості застосування фосфатидного концентрату у складі еластомерних матеріалів. *Вопросы химии и химической технологии*. 2014. № 2. С. 72–77.
2. Рослинні воски як модифікатори властивостей еластомерних і полімерних матеріалів / Л.Л. Руднева, С.І. Бухкало, О.В. Лакіза, О.В. Черваков. *Вопросы химии и химической технологии*. 2021. № 1. С. 90–100.
3. Аспекти применения подсолнечного лецитина в пищевой промышленности / И.С. Глух, О.И. Школа, В.Е. Клочкова и др. *Наукові праці*. Ч. 2. Одеса : АСТ, 2009. Ч. 2. 179 с.
4. Vaskovsky V.E., Terekhova T.A. HPTLC of phospholipid mixtures containing phosphatidylglycerol I. *High Resol Chromatogr. & S.C.* 1979. V. 2. P. 671–672.
5. Керча Ю.Ю., Онищенко З.В., Кутянина В.С. Структурно-химическая модификация эластомеров. Киев : Наукова думка, 1989. 232 с.
6. Солодкий В.А. Модификация свойств резин системами на основе аминов : дисс. ... канд. техн. наук / УДХТУ. 1990. С. 222.

**Holub L.S., Levchenko Ye.P. DEVELOPMENT OF MULTIFUNCTIONAL ADDITIVES FOR POLYMERIC MATERIALS USING WASTES OF OIL PROCESSING INDUSTRY**

Currently in Ukraine the issue of application of domestically manufactured components in polymer compositions is acute. Development of multi-purpose modifiers to replace imported components in paints and elastomeric compositions likewise is of great importance. In addition, it is also important to expand the temperature range and increase the service life of polymer materials. These tasks can be achieved in a

*number of ways, but one of the more cost effective ones is to use by-products of sunflower oil refining. This article concerns the possible use of phosphatide concentrate – a by-product of sunflower oil refining – as a heat stabilizer and dispersant in polymers and elastomeric compositions. It has been shown that phosphatide concentrate and lecithin act not only as a substitute for stearic acid, but also as effective anti-aging agents to protect rubber from thermal aging. The use of phosphatide concentrate as an activator-dispersant in the composition of industrial tires intended for the manufacture of tire treads showed that the replacement of stearic acid allows to obtain tires with a set of properties comparable to that of an original composition. The best physical and mechanical properties were displayed by vulcanizates containing 14 wt. pt. of the mixture of phosphatide concentrate with lecithin. It is shown that the optimal additives content in alkyd enamel is 1.25 wt. % phosphatide concentrate or 1.25 wt. % lecithin. Particular attention in the manufacturing process of paints and varnishes is paid to the uniform distribution of solid phase particles in the dispersion medium. Dispersion of pigments in film-forming substances or solutions is the most energy-intensive and complex stage of production of paints and varnishes. The results show that with increased additives content, the dispersion fineness increases. Physical and mechanical properties of enamel with experimental additives are close to that of enamel without additives.*

**Key words:** *phosphatide concentrate, elastomeric compositions, physical and mechanical parameters, thermal stability, dispersant, paints and varnishes.*

UDC 661.961.2

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/30>**Zabiaka N.A.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Kanunnikova N.A.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

**Bukatenko N.O.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

## INFLUENCE OF KINETIC PARAMETERS ON HYDROGEN RELEASE BY INTERACTION OF AK7 ALLOY WITH ALKALINE-HALOGENIDE SOLUTION

*In this work, the influence of kinetic parameters on the efficiency of hydrogen evolution by the interaction of cast aluminum alloy brand AK7 with solutions of sodium hydroxide with impurities of fluoride and chloride activators was studied. The activating effect of fluoride and chloride ions with concentrations of 0.2 mol/dm<sup>3</sup> and 0.1 mol/dm<sup>3</sup> on the dissolution of aluminum alloy AK7 in their simultaneous presence in NaOH solution with a concentration of 2.5 mol/dm<sup>3</sup> at a temperature of  $T = 293\text{--}298\text{ K}$ . The results of the obtained data allow to increase the productivity of the process by hydrogen 10 times in comparison with previous experiments. At these concentrations, the rate of hydrogen evolution is 1.12 m<sup>3</sup> per 1 m<sup>2</sup> for 1 hour; which allows to obtain promising results in the production of synthesized gas and to implement this method on an industrial scale.*

*The methods of statistical processing of experimental data calculate the relationship between the rate of corrosion process, the rate of hydrogen evolution and the main indicators of the interaction of the conditions of its dissolution. The obtained regression coefficients determine the most technological patterns of influence of alkaline-halide components of the solution and the time of research on the rate of dissolution of the alloy AK7 and the release of hydrogen for 1 hour.*

*It is determined that the rate of interaction of AK7 alloy with alkaline-halide solutions also depends on the surface purity class. It is established that when the purity class decreases, the rate of dissolution of the alloy increases and the rate of hydrogen evolution increases, which is explained by the presence of the mean values of protrusions and depressions on the test surface of the sample.*

*The choice of the chosen technological class of surface cleanliness, which is  $\nabla 5$ . For a surface with this roughness, the dissolution rate of the aluminum alloy is 1 000 g/m<sup>2</sup> for 1 hour; and the rate of hydrogen evolution is 830 cm<sup>3</sup> for 1 hour.*

**Key words:** hydrogen synthesis, alkali solution, halides, alloy AK7, chemical dissolution, specific gravity of dissolution.

**Introduction.** The development of the modern energy sector requires the use of environmentally friendly energy sources, among which a significant role is played by hydrogen energy. To date, a large number of scientific papers have been devoted to hydrogen production. Particular attention is paid to its use as an alternative and environmentally friendly fuel with high specific performance, which is a source of thermal energy.

The largest volumes of hydrogen are obtained by the vapor-phase method of methane conversion [1–4], but the obtained hydrogen requires additional purification from impurities, which leads to an increase in its cost by 8–10 times compared to natural gas. Intensive use of carbon fuel and, as a result, emissions of toxic

substances require the search for new, affordable, environmentally friendly and safe energy sources in the form of high-purity hydrogen, the advantages of which are the ability to be converted into heat.

**Analysis of recent research and publications.** Modern methods of hydrogen production are characterized by unsatisfactory environmental consequences, high cost of the final product and the difficulty of disposing of by-products of the reaction, which inhibits the development of the hydrogen industry [5]. Given the large scale of aluminum production, its developed infrastructure, in the works [6; 7] developed the concept of EAR. The authors [8–11] carry out the activation of aluminum by various methods, as a result of which the formed

monohydrides interact with water with the release of hydrogen. The rate of such interaction depends on the nature of the activator metals, their content in the alloy, temperature, number of components and their ability to form multicomponent eutectic alloys [12].

This method of hydrogen production has far-reaching goals for the future, but its implementation on an industrial scale takes a long time.

Dissolution of aluminum alloys in alkaline solutions is one of the promising areas in the release of hydrogen [13]. The use of this raw material can successfully solve the problem of obtaining cheap and safe hydrogen energy. In view of this, the chemical behavior of the aluminum alloy AK7 in alkali-chloride solutions was studied in [14–23]. The maximum rates of hydrogen evolution are  $403 \cdot 10^3 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$  in a solution of  $2.5 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaOH} + 0.1 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaCl}$ .

The authors [24; 25] present the results of chemical dissolution of AK7 alloy in alkaline-fluoride solutions. The results of the obtained data show that at a concentration of NaF  $0.1 \text{ mol}/\text{dm}^3$  the rate of hydrogen evolution is increased by 2 times in comparison with the impurities of chloride. However, the obtained hydrogen release rates are low for the application of these methods on an industrial scale.

**The purpose of the work** is to study the kinetic parameters of the rate of hydrogen evolution. To achieve this goal it is necessary to address the following issues:

1. To determine the technological parameters of chemical dissolution of AK7 alloy using simultaneous action of halide activators (NaF and NaCl) in alkaline solution;

2. Investigate the influence of the state of the surface of the aluminum alloy.

**Results and discussions.** In the table 1 shows the data of chemical dissolution of the alloy AK7 in a solution of NaOH with a concentration of  $2.5 \text{ mol}/\text{dm}^3$  with impurities of halide activators NaF and NaCl concentrations of  $0.2 \text{ mol}/\text{dm}^3$  and  $0.1 \text{ mol}/\text{dm}^3$ , respectively, for 1 hour at temperatures of 293–298 K.

The choice of these concentrations of activators is due to the results of studies presented by us in [14–25].

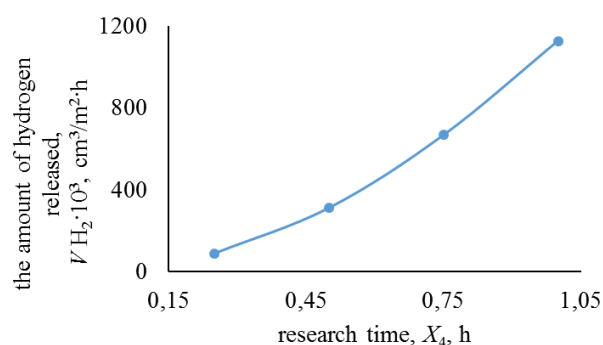
The analysis of table. 1 shows a rapid increase in the rate of dissolution of the aluminum alloy  $\Delta P$  with increasing time of the study. As a result of this behavior, the rate of weight loss increases and the rate of hydrogen evolution.

In Fig. 1 shows the dependence of the rate of hydrogen evolution on the influence of impurities NaF and NaCl concentrations of  $0.2 \text{ mol}/\text{dm}^3$  and

$0.1 \text{ mol}/\text{dm}^3$  in a solution of  $2.5 \text{ mol}/\text{dm}^3 \text{ NaOH}$  for 1 hour at temperatures of 293–298 K.

Table 1  
**Parameters of chemical dissolution of aluminum alloy AK7 in NaOH solutions with impurities NaF and NaCl**

The composition of the electrolyte	$\tau$ , hour	$\Delta P$ , $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$
NaOH $2,5 \text{ mol}/\text{dm}^3$ NaF $0,2 \text{ mol}/\text{dm}^3$ NaCl $0,1 \text{ mol}/\text{dm}^3$	0,25	179
	0,5	643
	0,75	1 366
	1	2 321



**Fig. 1. The rate of hydrogen evolution from the flow of simultaneous action of two activators in an alkaline solution**

The results of studies of the chemical dissolution of the alloy AK7 in alkaline-halide solution are interpreted in the form of table 1 and fig. 1, corresponding to polynomial functions by the following equations:

– changing the dissolution rate of the alloy AK7:

$$\Delta P = 1964,3X_4^2 + 405,3X_4 - 46,86;$$

– hydrogen release rate:

$$V_{H_2} = 948,4X_4^2 + 201,7X_4 - 22,78,$$

where  $X_4$  – time of the study,  $\tau$ , h

Comparing the obtained data of chemical interaction of AK7 alloy with alkaline-chloride and alkaline-fluoride solutions, these results differ significantly from previous works. When using two activators, the rate of hydrogen evolution reaches  $130 \cdot 10^3 \text{ cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ , which allows the promising use of alkali-halide solution on an industrial scale.

The purity class of the samples also affects the change in the specific gravity of the alloy  $\Delta P$  ( $\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ) and the rate of hydrogen evolution  $V_{H_2}$  ( $\text{cm}^3/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ ). In fig. Figures 2–4 show images of the surface structures of the alloy AK7, which correspond to different surface hardnesses after mechanical polishing.

Analysis of fig. 2–4 indicates the different nature of the studied surfaces, which corresponds to different classes of its purity.





Fig. 2. Surface structure of AK7 alloy after mechanical polishing with purity class  $\nabla 3$



Fig. 3. Surface structure of AK7 alloy after mechanical polishing with purity class  $\nabla 5$

In fig. 5 shows a histogram of the dissolution rate of the alloy AK7 in a solution of  $2.5 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaOH} + 0.2 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaF} + 0.1 \text{ mol/dm}^3 \text{ NaCl}$  from the classes of surface purity ( $\nabla 3, \nabla 5, \nabla 7$ ) at temperatures of 293–298 K for 1 hour.

The change in this histogram indicates a significant influence of the state of the alloy surface on the rate of its interaction with the alkaline-halide medium. The metal surface is in contact with the solution in the form of plates with different surface roughness (with dimensions  $R_{max} = 2.5\text{--}10 \text{ }\mu\text{m}$ ). For such a surface, the weight loss of AK7 alloy increases with decreasing class of its purity.

The behavior of the samples (Fig. 5) is determined by the size of the average values of the radii of the protrusions and depressions of the investigated surface. As the purity class decreases from to, the dissolution rate of the alloy increases 2 times and is equal  $\nabla 7$  to  $\nabla 5$   $480 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$  and  $1000 \text{ g/m}^2 \cdot \text{h}$ , and for the surface of the 3rd class increases to  $1400 \text{ g/m}^2$  in 1 hour.

According to fig. 5, the hydrogen evolution rate is similar to the data relative to the rate of dissolution of the alloy. In the 3rd class of surface purity, the rate of synthesized hydrogen is  $1245 \cdot 10^3$  per 1 hour, but it should be noted that this surface roughness is in demand in industry in smaller quantities and therefore its deficiency indicates an economic justification for this choice. Thus, the technologically correct purity class for the synthesis of hydrogen by the interaction of the alloy AK7 with alkali-halide solutions is the surface of the 4–5th purity class. At this sample roughness, the rate of hydrogen evolution is  $830 \cdot 10^3$  per 1 hour.

**Conclusions.** The results of these studies allow us to identify ways to address an important issue, the essence of which is to obtain and use hydrogen in energy and in everyday life. In the study of this

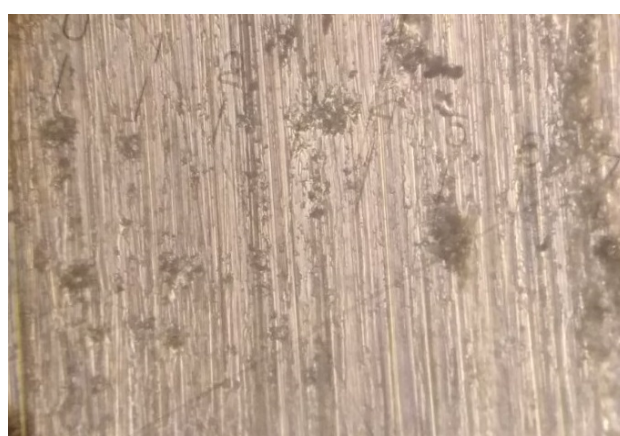


Fig. 4. Surface structure of AK7 alloy after mechanical polishing with purity class  $\nabla 7$

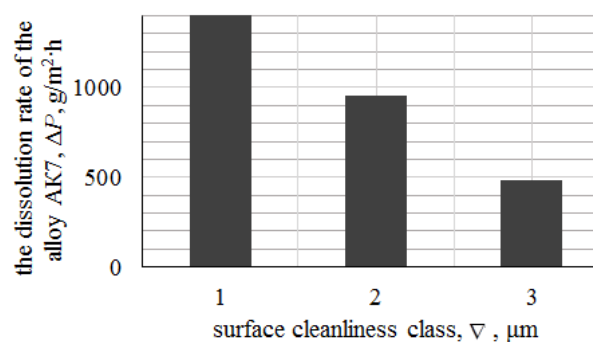


Fig. 5. The dependence of the dissolution rate of the alloy AK7 on the surface purity class: 1 –  $\nabla 3$ ; 2 –  $\nabla 5$ ; 3 –  $\nabla 7$

issue, the use of aluminum alloys AK7 for hydrogen production by interacting with an alkaline halide solution, which solves the problem of obtaining an environmentally friendly and economically feasible energy source, as the reaction of dissolving aluminum alloys by depolarization by hydrogen or oxygen, ie

implementation of this method hydrogen synthesis does not require complex design solutions.

Prospects for further research are the design and implementation of the technological process of

hydrogen production by the interaction of aluminum alloys brand AK7 with alkali-halide solutions to obtain high-quality and environmentally friendly fuel that can be used to produce thermal energy.

#### References:

1. Chakik F.E., Koddami M., Mikou M. Effect of operating parameters on hydrogen production by electrolysis of water. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2017. Vol. 42. P. 25550–25557.
2. Porciunkula C.B., Marcilio N.R., Tessaro I.C., Gerchmann M. Production of hydrogen in the reaction between aluminum and water in the presence of NaOH and KOH. *Brasilian Journal of Chemical Engineering*. 2012. Vol. 29. P. 337–348.
3. Мазанко А.Ф., Камарьян Г.М., Ромашкин О.П. Промышленный мембранный электролиз: пособие для инженеров, конструкторов и научных работников. Москва : Химия, 1989. 240 с.
4. Кулешов В.Н., Довбыш С.А., Удрис Е.Я., Славнов Ю.А., Григорьев С.А., Яштулов Н.А. Высокоэффективные композитные катоды для щелочного электролиза воды. *Журнал прикладной химии*. 2017. № 3. С. 327–331.
5. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Металевий хімічний цикл синтезу водню для потреб енергетики. *XI Міжнародна науково-практична конференція магістрантів та аспірантів* : матеріали конференції, м. Харків, 18–21 квітня 2017 р. : у 3–х ч. Ч. 3. Харків : НТУ «ХП», 2017. С. 28–29.
6. Kozin L.F., Volkov S.V. Production of high-parameters hydrogen with application of energy-accumulating substances. *Europe Hydrogen Energy conf.*, Sept 2–5, 2003. Alpeexpo, Grenoble, France, Res.: C 01/20.
7. Козін Л.Ф., Волков С.В., Гончаренко С.Г., Данильцев Б.І. Одержання водню з використанням енергоаккумуляуючих речовин. *Фундаментальні проблеми водневої енергетики*. 2010. С. 9–37.
8. Драганов Б.Х., Сироватка М.А. Сонячна система генерації водню. *Відновлювальна енергетика*. 2013. № 1. С. 5–7.
9. Байрачний Б.І., Желавська Ю.А., Вороніна О.В., Ковальова А.А., Руденко Н.А. Дослідження впливу природи електродного матеріалу на параметри електросинтезу водню. *Вісник НТУ «ХП». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2016. № 35. С. 64–69.
10. Байрачний Б.І., Желавська Ю.А., Бондаренко Л.М., Руденко Н.О., Желавський С.Г. Використання відновлювальних джерел енергії в електросинтезі водню без виділення кисню. *Вісник НТУ «ХП». Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2017. № 49. С. 5–10.
11. Байрачний Б.І., Мишина Е.Б., Коваленко Ю.І., Мнацакарян Р.Э. Электрокаталитические материалы для устройств солнечной и водородной энергии. *Энергосбережение. Все об энергоэффективности и ресурсосбережении. Тема: Зеленая энергия*. 2013. № 4. С. 27–29.
12. Козин Л.Ф., Волков С.В. Современная энергетика и экология. Проблемы и перспективы. Киев : Наукова думка, 2006. 272 с.
13. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Хімічний цикл синтезу водню з використанням сплавів алюмінію для отримання екологічно безпечного тепла в енергетиці. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : мат. XXV міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2017, м. Харків, 17–19 травня 2017 р. : у 4-х ч. Ч. III. Харків : НТУ «ХП», 2017. С. 25.
14. Забіяка Н.А. Влияние кинетических параметров на производительность выделения водорода из щелочно-хлоридных растворов. *Экология и промышленность*. Харьков, 2019. № 1. С. 55–58.
15. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б., Руденко Н.О., Желавська Ю.А. Вплив технологічних параметрів на ефективність виділення водню шляхом розчинення алюмінієвого сплаву АК7. *Colloquium-journal*. Warszawa, Poland, 2019. № 6 (30). С. 24–27.
16. Байрачний В.Б., Забіяка Н.А., Желавський С.Г., Бондаренко Л.Н. Моделирование параметров растворения алюминиевого сплава АК-7 в щелочных растворах для синтеза водорода. *Современные электрохимические технологии и оборудование – 2017* : тезисы док. междунар. науч.-технич. конф., г. Минск, 28–30 ноября 2017 г. Минск, 2017. С. 231–235.
17. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Отримання водню взаємодією сплаву алюмінію марки АК-7, активованого добавками NaOH та NaCl з водою. *Тези доп. XII міжнар. наук.-практ. конф. магістрантів та аспірантів*, м. Харків, 17–20 квітня 2018 р. Харків, 2018. С. 43–44.
18. Руденко Н.О., Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Алюмодеполяризаційний синтез водню в розчинах гідроксиду натрію. *Тези доп. XIII всеукр. конф. молодих вчених та студ. з актуальних питань хімії*, м. Харків, 2–4 травня 2018 р. Харків, 2018. С. 86.
19. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Отримання водню за допомогою алюмінієвого сплаву в лужних розчинах. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. XXVI міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2018, м. Харків, 16–18 травня 2018 р. Харків, 2018. С. 231.

20. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Дослідження оптимального складу електроліту на швидкість отримання водню в лужному розчині. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я* : тези доп. XXVII міжнар. наук.-практ. конф. MicroCAD-2019, м. Харків, 15–17 трав. 2019 р. Харків, 2019. С. 252.

21. Байрачний Б.И., Желавская Ю.А., Пилипенко А.И., Руденко Н.А., Забіяка Н.А. Использование сплавов алюминия для электрохимического получения водорода из щелочно-хлоридных растворов. *Современные электрохимические технологии и оборудование – 2019* : тезисы док. междунар. науч.-технич. конф., г. Минск, 13–17 мая 2019 г. Минск, 2019. С. 209–212.

22. Байрачний Б.И., Руденко Н.А., Желавская Ю.А., Забіяка Н.А. Получение водорода растворением алюминиевых сплавов в щелочно-хлоридных растворах. *Стратегия качества в промышленности и образовании* : тезисы док. XV междунар. конф., г. Варна, 3–6 июня 2019 г. Варна, 2019. С. 32–35.

23. Забіяка Н.А., Руденко Н.О., Байрачний В.Б., Байрачний Б.І., Дідоренко В.М. Корозійне розчинення алюмінієвих сплавів в виробництві водню для потреб енергетики. *Актуальні питання хімії та інтегрованих технологій* : тези доп. міжнар. наук.-практ. конф., м. Харків, 7–8 листопада 2019 р. Харків, 2019. С. 151.

24. Забіяка Н.А., Байрачний В.Б. Вплив кінетичних параметрів на ефективність виділення водню шляхом розчинення сплаву АК7 в лужних розчинах з домішками активаторів. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну*. 2019. № 5. С. 115–121.

25. Байрачний Б.І., Забіяка Н.А., Байрачний В.Б., Руденко Н.О., Лещенко С.А. Моделирование технологических параметров синтеза водню розчиненням сплаву АК7 в лужних розчинах. *Colloquium-journal*. 2020. № 33. С. 55–58.

### **Забіяка Н.А., Кануннікова Н.О., Букатенко Н.О. ВПЛИВ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА ВИДІЛЕННЯ ВОДНЮ ШЛЯХОМ ВЗАЄМОДІЇ СПЛАВУ АК7 З ЛУЖНО-ГАЛОГЕНІДНИМ РОЗЧИНОМ**

У роботі вивчався вплив кінетичних параметрів на ефективність виділення водню шляхом взаємодії ливарного алюмінієвого сплаву марки АК7 із розчинами натрію гідроксиду з домішками фторидних і хлоридних активаторів. Доведено активуючу дію фторидних і хлоридних іонів концентраціями 0,2 моль/дм<sup>3</sup> та 0,1 моль/дм<sup>3</sup> на розчинення алюмінієвого сплаву АК7 за їх одночасної присутності в розчині NaOH концентрацією 2,5 моль/дм<sup>3</sup> за температури  $T = 293\text{--}298\text{ K}$ . Результати отриманих даних дозволяють збільшити продуктивність процесу за воднем у 10 разів у порівнянні з попередніми дослідженнями. За таких концентрацій швидкість виділення водню становить 1,12 м<sup>3</sup> в перерахунку на 1 м<sup>2</sup> протягом 1 години, що дає можливість отримати перспективні результати в одержанні синтезованого газу й втілити такий спосіб у промислові масштаби.

Методами статистичної обробки експериментальних даних розраховані співвідношення між швидкістю корозійного процесу, швидкістю виділення водню та основними показниками взаємодії умов його розчинення. Отримані регресійні співвідношення визначають найбільш технологічні закономірності впливу лужно-галогенідних компонентів розчину й часу проведення досліджень на показники швидкостей розчинення сплаву АК7 і виділення водню протягом 1 години.

Визначено, що швидкість взаємодії сплаву АК7 із лужно-галогенідними розчинами також залежить від класу чистоти поверхні. Установлено, що під час зменшення класу чистоти відбувається ріст показника швидкості розчинення сплаву й збільшується швидкість виділення водню, що пояснюється наявністю розмірів середніх значень виступів і впадин на дослідній поверхні зразка.

Обґрунтовано вибір обраного технологічного класу чистоти поверхні, який становить  $\nabla 5$ . Для поверхні з такою шорсткістю показник швидкості розчинення алюмінієвого сплаву становить 1 000 г/м<sup>2</sup> протягом 1 години, а швидкість виділення водню дорівнює 830 см<sup>3</sup> за 1 годину.

**Ключові слова:** синтез водню, розчин лугу, галогеніди, сплав АК7, хімічне розчинення, клас чистоти поверхні.

**Миронюк О.В.**

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

**Баклан Д.В.**

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

## ВИЗНАЧЕННЯ ПОВЕРХНЕВОЇ ЕНЕРГІЇ СТОХАСТИЧНИХ СУПЕРГІДРОФОБНИХ СТРУКТУР НА ОСНОВІ КАРБОНАТУ КАЛЬЦІЮ

У статті досліджується подрібнений кальцит з різним гранулометричним складом марок Normcal-2 і Normcal-100. Проведено функціоналізацію кальциту за допомогою стеаринової кислоти. Сучасні роботи з гідрофобізації поверхонь використовують складні методи одержання текстур, що унеможлиблює використання цього ефекту на великих площах. Одним з простих шляхів вирішення проблеми є використання традиційного методу нанесення покриттів, наприклад, пневматичним розпиленням або зануренням з наступним випаровуванням органічного розчинника або води. При цьому основним фактором, який визначає стабільність стану Касі поверхні, є геометрія частинок дисперсної фази, яка формує структуру. У роботі проведено аналіз останніх публікацій і встановлено, що співвідношення критичного значення поверхневої енергії текстурованих та відповідних плоских поверхонь є на поточний момент не досить дослідженим. Також не досить висвітленим є процес втрати гідрофобних властивостей поверхнями на основі мікророзмірних елементів текстури у разі зниження значень поверхневого натягу змочуючої рідини. У роботі було встановлено взаємозв'язок між критичними значеннями поверхневої енергії плоских та мікротекстурованих супергідрофобних поверхонь на основі карбонату кальцію. Варіювання поверхневого натягу пробних рідин для текстурованих поверхонь було здійснено на основі зміни співвідношення компонентів у водно-етанольній суміші. Поверхневий натяг сумішей було визначено методом сталагмометрії. Встановлено критичні значення поверхневого натягу, визначені за методом Зісмана для текстурованих поверхонь. Показано залежність стійкості стану Касі від дисперсності структуроутворюючих частинок, яка своєю чергою визначається відстанню між елементами текстури поверхонь. Встановлено, що перспективним напрямом одержання поверхонь, стійких до дії ПАР та олів, є використання структур з якомога нижчим періодом, оброблених речовинами з власною низькоповерхневою енергією.

**Ключові слова:** супергідрофобність, карбонат кальцію, стеаринова кислота, поверхнева енергія, стохастичні структури.

**Постановка проблеми.** Більшість сучасних робіт, що присвячені інженерії супергідрофобних поверхонь, використовують складні для масштабування методи одержання текстур [1]. Це робить неможливим використання цього ефекту на великих площах, наприклад, в авіакосмічній галузі, в автомобільній та будівельній індустрії. Одним зі шляхів вирішення проблеми масштабування є використання традиційного методу нанесення покриттів – пневматичним розпиленням або зануренням з наступним випаровуванням носія. Останнім може виступати як органічний розчинник, так і вода. Для формування поверхневої структури такі покриття повинні містити мінімальну кількість плівкоутворювача – значно

нижчу за критичну концентрацію. При цьому основним фактором, який визначає стабільність стану Касі поверхні, є геометрія частинок дисперсної фази, яка формує структуру.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Відомо, що розмір «виступів» на поверхні повинен бути значно меншим за розміри краплі рідини для реалізації ефекту. У роботах [2; 3] було розглянуто використання дворівневих ієрархічних структур – мікророзмірні частинки містять на своїй поверхні нанорозмірні виступи, або зв'язані частинки. Перший рівень забезпечує механічну стабільність та високі стартові значення кутів змочування та скочування, а другий рівень – стійкість структури до дії оточуючих факторів – водяної пари, розчинів

з пониженим поверхневим натягом, змочування водною фазою, яка потрапляє на поверхню з певною швидкістю, тощо [4]. Матеріалами, які використовуються для одержання названих структур є, в основному, досить гідрофільні сполуки – оксиди кремнію, цинку та алюмінію, які для реалізації стану Касі стосовно води потребують функціоналізації речовинами з низькою поверхневою енергією. З цих речовин найбільш вживаними є фторовані вуглеводні з активними функціональними групами, що здатні взаємодіяти з поверхнею оксидів. У разі використання дисперсних карбонатів кальцію та інших мінералів з основною поверхнею для функціоналізації застосовують олеїнову або стеаринову кислоту і їх солі.

Історичне рівняння Касі-Бакстера (1) [5] пов'язує кут змочування текстурованої та ідентичної за хімічним складом плоскої поверхні:

$$\cos \theta_e = f(\cos \theta_s + 1) - 1 \quad (1)$$

де  $\theta_e$  – власне кут змочування текстурованої поверхні;  $\theta_s$  – кут змочування плоскої гідрофобізованої поверхні;  $f$  – доля площі поверхні, яка контактує з краплею рідини.

Незважаючи на те, що в більш пізніх роботах [6] демонструється неможливість використання цього простого рівняння для об'єктивного опису супергідрофобних поверхонь, у найбільш достовірному на поточний момент підході, який розглядає щільність лінії трифазного контакту [7], кут змочування плоскої поверхні також використовується як основа для подальшого розрахунку. Отже, вагомість цього параметру не викликає сумнівів.

В оглядовій статті [8] зазначаються основні проблеми, які обмежують технологічне впровадження супергідрофобних поверхонь. Однією з основних є нестійкість цих поверхонь до дії рідин з пониженим значенням поверхневого натягу, зокрема, розчинників та розчинів поверхнево-активних речовин. Вплив останніх залежить як власне від їх концентрації, так і її відношення до критичної концентрації міцелотворення (яка своєю чергою визначається хімічною структурою ПАВ) [9].

Розглянуто також залежність кутів змочування супергідрофобних поверхонь різної текстури від поверхневого натягу рідини, що змочує [10]. Незважаючи на спірне порівняння властивостей гідрофобізованих поверхонь різного хімічного складу, авторами переконливо показана значна роль саме текстури поверхні, що забезпечує стабільність стану Касі в умовах наднизької поверхневої енергії.

**Постановка завдання.** Відкритим залишається питання про співвідношення критичного значення поверхневої енергії текстурованих та

відповідних плоских поверхонь. Також не досить висвітленим є процес втрати гідрофобних властивостей поверхнями на основі мікророзмірних елементів текстури у разі зниження значень поверхневого натягу змочуючої рідини.

Метою роботи є встановлення взаємозв'язку між критичними значеннями поверхневої енергії плоских та мікротекстурованих супергідрофобних поверхонь на основі карбонату кальцію.

Для досягнення цієї мети в роботі використовуються дисперсні частинки кальциту різного гранулометричного складу, проводиться їх функціоналізація стеариною кислотою, встановлюються та порівнюються критичні значення поверхневої енергії для цих матеріалів.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** У роботі було використано подрібнений кальцит Normcal-2 і Normcal-100 (Туреччина). Всі покриття наносилися методом наливу на скляну поверхню і подальшою сушкою за 50°C для видалення розчинника. Стеаринова кислота була придбана у Sigma-Aldrich (США).

Величини кута змочування води вимірювали за допомогою цифрового гоніометра. Для аналізу морфології краплі води на поверхні використовувалися камера Delta Optical HCDE-50 (Китай) і відповідне програмне забезпечення ScopeTek View (Китай).

Дисперсні частинки наповнювачів відігравали роль агенту, що формує текстуру поверхні. З рис. 1 видно, що за геометричною формою частинки близькі до сколів кубічної, частинки суцільні, а їх поверхня не розвинена, як наприклад, у випадку осажденного карбонату кальцію [11]. Розподіл частинок за розмірами дрібної крейди є значно ширшим ніж у крупної. Значення середнього розміру дрібної фракції становить 4,2 мкм, а крупної – 45 мкм.

З урахуванням рекомендації щодо кількості модифікатору [12] обробку поверхні обох фракцій карбонату кальцію здійснювали в 1 мас. % етанольному розчині стеаринової кислоти. Після витримки 5 г кожної фракції в 30 мл розчину протягом 24 годин рідину над осадом було декантовано, а дисперсні матеріали промиті двократно чистим етанолом та відфільтровані на паперовому фільтрі.

Одержана суспензія була нанесена на поверхню стандартного предметного скла для мікроскопії та рівномірно висушена для одержання суцільного шару. Такі зразки за рахунок створення щільної структури поверхні (рис. 2) товщиною 0,3–0,5 мм здатні стабільно утримувати краплі деіонізованої води в стані Касі та мають порівняно низькі значення кутів скочування – до 10 градусів.

Звертає на себе увагу те, що такі стохастичні поверхні не є рівномірними, тобто сказати, що вони є упорядкованими і характеризуються періодом структури, що є сталим і виводиться безпосередньо з розміру частинок, не можна. Однак певні патерни організації виступів структури все ж таки повторюються. Для крупної фракції середня максимальна відстань між виступами в кластері знаходиться в межах 300 мкм, для дрібної – 65 мкм. В останньому випадку матеріал також містить невелику кількість крупної фракції, що зумовлює включення в названу структуру.

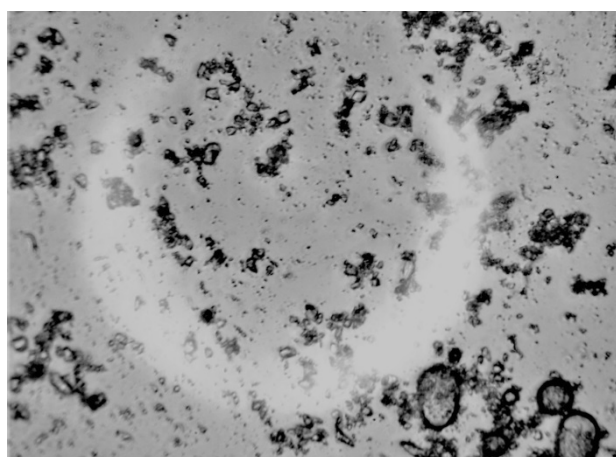
Ці характеристичні розміри структури бралися до уваги під час гоніометричного дослідження при виборі розміру крапель тестових рідин. Їх об'єм становив 18 мкм, а середній діаметр – 1,8 мм.

Незважаючи на відсутність зв'язуючого, одержані плівки мають достатню механічну міцність

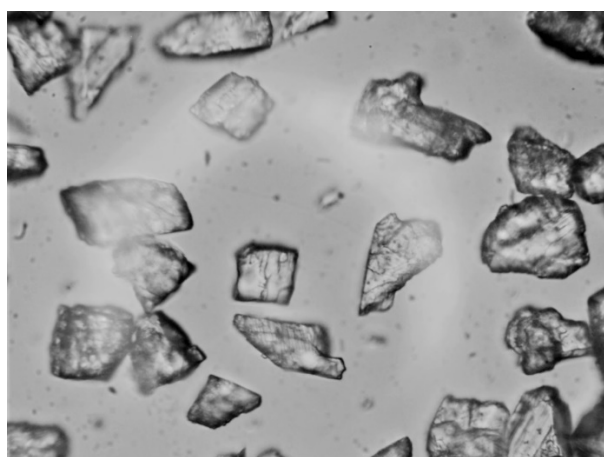
для стабільного утримання крапель деіонізованої води (рис. 3).

Варіювання поверхневого натягу пробних рідин для текстурованих поверхонь здійснювалося на основі зміни співвідношення компонентів у водно-етанольній суміші. Поверхневий натяг сумішей вимірювався методом сталагмометрії, а результати порівнювалися з наявними в літературі [13]. Оскільки у разі підвищення вмісту етанолу значення поверхневого натягу суміші зменшуються за рахунок зменшення його полярної компоненти, закономірно знижуються і значення кута змочування систем (рис. 4).

Система на основі крупної фракції (крива 1 на рис. 4) хоча і характеризується підвищеними значеннями кута змочування, але швидко переходить у стан змочування і вже за вмісту спирту 32 об. % має кут, порівняний з кутом модифікатора. Дрібніша фракція (крива 2 на рис. 4) має кут змочу-

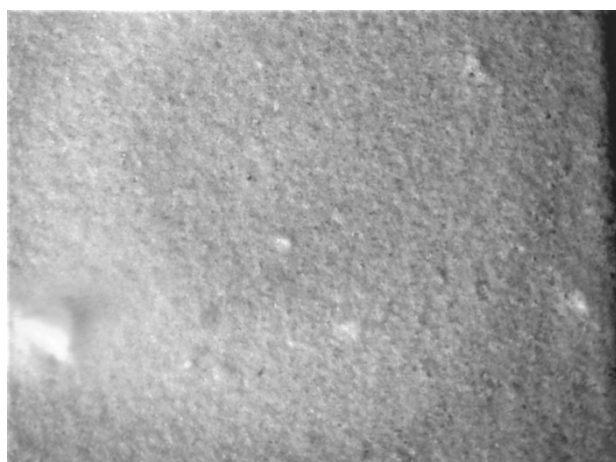


а

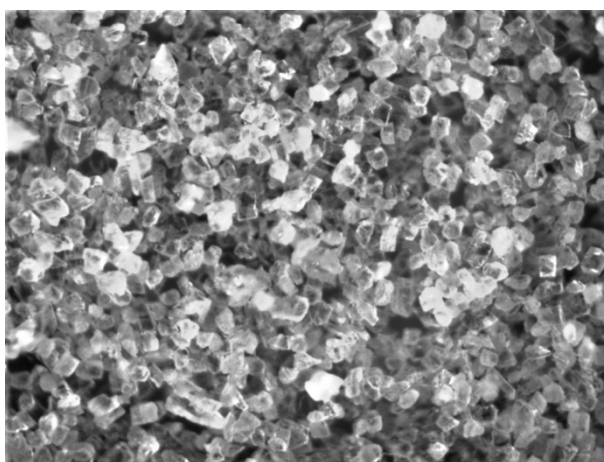


б

Рис. 1. Мікроскопія частинок дисперсного кальциту (збільшення в 400 разів): а – дрібна фракція; б – крупна фракція



а



б

Рис. 2. Поверхня покриттів на основі обробленої стеариновою кислотою карбонату кальцію на основі фракціонованих матеріалів (збільшення в 50 разів): а – дрібна фракція; б – крупна фракція

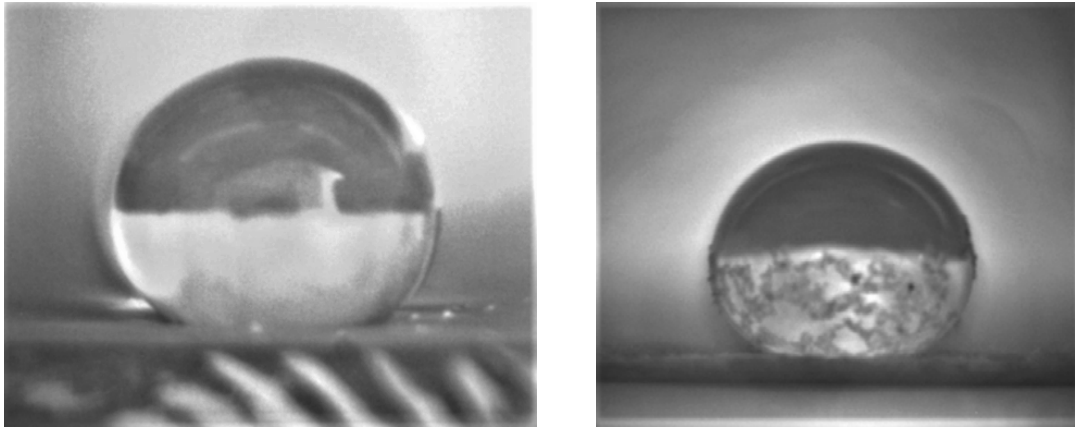


Рис. 3. Краплі води на поверхні покриттів на основі:  
а – дрібної фракції; б – крупної фракції

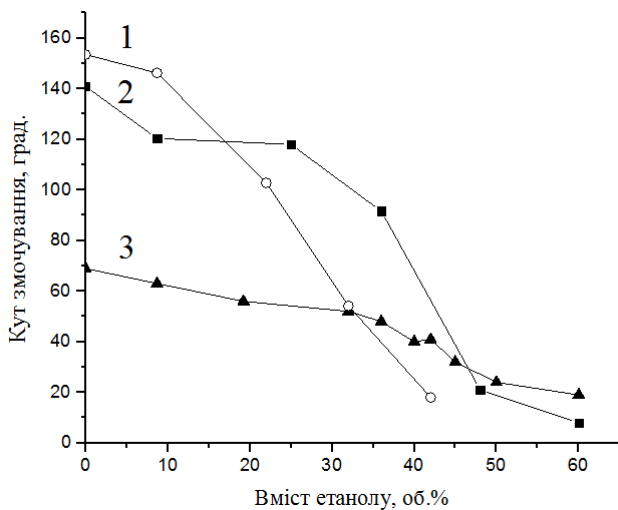


Рис. 4. Залежність кута змочування від вмісту етанолу в пробній рідині для систем: 1 – покриття на основі крупної фракції; 2 – покриття на основі дрібної фракції; 3 – плоска поверхня стеаринової кислоти

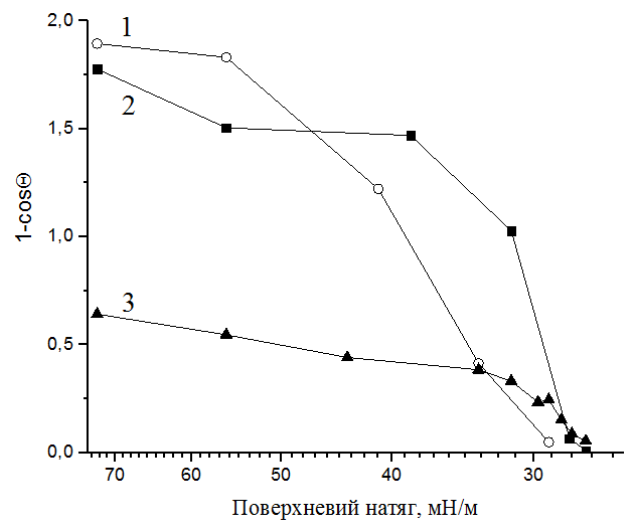


Рис. 5. Графік Зісмана для систем: 1 – покриття на основі крупної фракції; 2 – покриття на основі дрібної фракції; 3 – плоска поверхня стеаринової кислоти

вання водою на 12 градусів нижче ніж крупна, але виявляє більшу стабільність: стан Касі остаточно зникає за вмісту спирту в суміші на рівні 47 об. %.

У роботі приймалося, що активована поверхня карбонату кальцію характеризується зниженою полярністю на рівні зі стеариновою кислотою та, відповідно, її критична енергія змочування може бути знайдена методом Зісмана [14]. Цим же методом була визначена і поверхнева енергія стеаринової кислоти (рис. 5).

Як видно з кривої стеаринової кислоти (3 на рис. 5), поверхнева енергія цієї речовини становить близько 27 мН/м, що збігається з даними роботи [15] та за порядком співпадає з поверхневою енергією жирних кислот [16].

Криві, що належать структурованим поверхням (1 та 2 на рис. 5), принципово відрізняються

від кривої стеаринової кислоти наявністю гістезису, що відповідає стану Касі. Звертає на себе увагу положення точки перегину кривих, що відповідає переходу з цього стану до стану Вентцеля. Для дрібної фракції абсциса цієї точки становить 33 мН/м, а для крупної – 48 мН/м, тобто покриття з меншою відстанню між елементами структури характеризуються підвищеною стійкістю до рідин з низьким значенням поверхневого натягу.

Втім реальна поверхнева енергія обробленої поверхні карбонату кальцію, як видно з графіка, наближається до поверхневої енергії модифікатора – стеаринової кислоти. Невелика відмінність критичної енергії у дрібної та крупної фракції (26,5 та 28,6 мН/м відповідно) найвірогідніше зумовлена похибкою вимірювання.

**Висновки.** Встановлено, що критичні значення поверхневого натягу, визначені методом Зісмана для текстурованих поверхонь, еквівалентні цим значенням модифікаторів. Тобто енергетичні умови повного змочування у стохастичних системах, сформованих з дисперсних частинок, можна сформулювати, знаючи лише відповідні параметри модифікатора.

Показано, що стійкість стану Касі залежить від дисперсності структуроутворюючих частинок, яка своєю чергою визначає відстань між еле-

ментами текстури таких поверхонь. Зменшення цієї відстані, з одного боку, призводить до зменшення кута змочування таких поверхонь водою, а з іншого – до підвищення їх стійкості до дії рідин з низькою полярністю у сенсі зниження енергії переходу від стану Касі до стану Вентцеля.

З огляду на зазначене перспективним напрямом одержання поверхонь, стійких до дії ПАР та олив, є використання структур з якомога нижчим періодом, оброблених речовинами з власною низькоповерхневою енергією.

#### Список літератури:

1. Yildirim Erbil H. Practical Applications of Superhydrophobic Materials and Coatings: Problems and Perspectives. *Langmuir*. 2020. Vol. 36. No. 10. P. 2493–2509.
2. Wen R., Xu S., Zhao D., Lee Y.C., Ma X., Yang R. Hierarchical Superhydrophobic Surfaces with Micropatterned Nanowire Arrays for High-Efficiency Jumping Droplet Condensation. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2017. Vol. 9. No. 51. P. 44911–44921.
3. Lee E., Lee K.H. Facile fabrication of superhydrophobic surfaces with hierarchical structures. *Scientific Reports*. 2018. Vol. 8. No. 1. P. 4101.
4. Hauschwitz P. Large surface functionalization by laser-induced micro and nanostructures. 2021.
5. Cassie A.B.D., Baxter S. Wettability of porous surfaces. *Trans. Faraday Soc.* 1944. Vol. 40. P. 546–551.
6. Gao L., McCarty T.J. How Wenzel and Cassie were wrong. *Langmuir*. 2007. Vol. 23. P. 3762–3765.
7. Extrand C.W. Criteria for ultralyophobic surfaces. *Langmuir*. 2004. Vol. 20. P. 5013–5018.
8. Hooda A., Goyat M.S., Kumar Pandey J., Kumar A., Gupta R. A review on fundamentals, constraints and fabrication techniques of superhydrophobic coatings. *Progress in Organic Coatings*. 2020. Vol. 142. P. 105557.
9. Chang F.M., Sheng Y.J., Chen H., Tsao H.K. From superhydrophobic to superhydrophilic surfaces tuned by surfactant solutions. *Applied Physics Letters*. 2007. Vol. 91. No. 9. P. 094108.
10. Dufour R., Perry G., Harnois M. et al. From micro to nano reentrant structures: hysteresis on superomniphobic surfaces. *Colloid Polym Sci*. 2013. Vol. 291. P. 409–415.
11. Tlili M., Amor M., Gabrielli C., Joiret S., Maurin G. On the initial stages of calcium carbonate precipitation. *European Journal of Water Quality*. 2006. Vol. 37. P. 89–108.
12. Cao Z., Daly M., Clémence L., Geever L.M., Major I., Higginbotham C.L., Devine D.M. Chemical surface modification of calcium carbonate particles with stearic acid using different treating methods. *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 378. P. 320–329.
13. Ghahremani H., Moradi A., Abedini-Torghabeh J., Hassani S.M. Measuring surface tension of binary mixtures of water + alcohols from the diffraction pattern of surface ripples. *Der Chemica Sinica*. 2011. Vol. 2. No. 6. P. 212–221.
14. Hejda F., Kousal J. Surface Free Energy Determination by Contact Angle Measurements – A Comparison of Various Approaches. *Proceedings of Contributed Papers. Proceedings of the 19th Annual Conference of Doctoral Students*. 2010. P. 25–30.
15. Gros A.T., Feuge R.O. Surface and interfacial tensions, viscosities, and other physical properties of some n-aliphatic acids and their methyl and ethyl esters. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1952. Vol. 29. P. 313–317.
16. Chumpitaz L.D.A., Coutinho L.F., Meirelles A.J.A. Surface tension of fatty acids and triglycerides. *Journal of the American Oil Chemists Society*. 1999. Vol. 76. P. 379–382.

#### **Myronyuk O.V., Baklan D.V. DETERMINATION OF STOCHASTIC SUPERHYDROPHOBIC STRUCTURES SURFACE ENERGY BASED ON CALCIUM CARBONATE**

*The article investigates crushed calcite with different particle size distribution of Normcal-2 and Normcal-100 brands. Functionalization of calcite with stearic acid was performed. Modern works on surface hydrophobization use complex methods of obtaining textures, which makes it impossible to use this effect on large areas. One simple way to solve the problem is to use the traditional method of coating, for example, pneumatic spraying or immersion, followed by evaporation of organic solvent or water. In this case, the main factor that determines the stability of the Kasi surface is the geometry of the particles of the dispersed phase, which forms the structure. The paper analyzes the recent publications and finds that the ratio of the critical*



value of the surface energy of textured and the corresponding flat surfaces is currently insufficiently studied. Also insufficiently illuminated is the process of loss of hydrophobic properties of surfaces based on micro-dimensional elements of the texture while reducing the values of surface tension of the wetting fluid. The relationship between the critical values of the surface energy of flat and microtextured superhydrophobic surfaces based on calcium carbonate was established. The variation of the surface tension of the test liquids for textured surfaces was carried out on the basis of the change in the ratio of the components in the water-ethanol mixture. The surface tension of the mixtures was determined by stalagmometry. The critical values of surface tension determined by the Zisman method for textured surfaces are established. The dependence of the stability of the Cassie state on the dispersion of structure-forming particles is shown, which in turn is determined by the distance between the elements of the surface texture. It is established that a promising direction of obtaining surfaces resistant to surfactants and oils is the use of structures with the shortest possible period, treated with substances with their own low surface energy.

**Key words:** superhydrophobicity, calcium carbonate, stearic acid, surface energy, stochastic structures.

## ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 641.05

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/32>

**Фролова Н.Е.**

Національний університет харчових технологій

**Тищенко О.М.**

Національний університет харчових технологій

**Губар Т.М.**

Національний університет харчових технологій

**Козут Д.О.**

Національний університет харчових технологій

**Овсяник А.Г.**

Національний університет харчових технологій

### РОЗШИРЕННЯ АСОРТИМЕНТУ СТРАВ ІЗ ПОЛІЗЕРНОВОЇ СУМІШІ ВЕГІТАРІАНСЬКОГО МЕНЮ ДЛЯ РЕСТОРАНІВ ТА АЮРВЕДИЧНИХ КАФЕ

*Стаття присвячена питанню розширення асортименту страв вегетаріанського спрямування із полізернової сировини у меню спеціалізованих закладів ресторанного господарства. Розглянуто можливість науково обґрунтованого комбінування різних зернових культур для удосконалення технології сухих зернових сніданків, включення яких до щоденного харчового раціону сприятиме зміцненню здоров'я українців і профілактиці аліментарно обумовлених захворювань.*

*Критерієм вибору сировини для полізернової композиції був амінокислотний профіль за незамінними амінокислотами. Проаналізовано амінокислотний склад борошна пшеничного, рисового, гречаного, вівсяного, кукурудзяного, амарантового. Основою рецептури вибрано цільнозернове пшеничне борошно з наступним комбінуванням із борошном гречаним і вівсяним для збалансування амінокислотного складу білків і збагачення комплексом біологічно активних речовин, що входять до їх складу.*

*У дослідженнях використано органолептичний, фізичний, фізико-хімічні та розрахункові методи. Вплив гречаного та вівсяного борошна на технологічний процес та якість сухариків вивчали у сумішах із цільнозерновим пшеничним із заміною його у кількості 10, 15, 20%. Досліджували фізико-хімічні та технологічні властивості цільнозернового пшеничного, гречаного, вівсяного борошна та тіста, отриманого на основі полізернових композицій.*

*Готові полізернові сухарики підвищеної біологічної цінності за рахунок покращеного амінокислотного складу досліджували за фізико-хімічними та органолептичними показниками.*

*Запропоновані науково обґрунтовані розробки сприятимуть організації здорового харчування людей різних конституцій за аюрведичними приписами, дозволять розширити асортимент страв аюрведичної кулінарії у меню ресторанних підприємств і привернути увагу до Аюрведи, стародавньої науки про здоровий розум, наміри, життя людини.*

**Ключові слова:** вегетаріанство, полізернова суміш, цільнозернове борошно, гречане борошно, вівсяне борошно, сухарики, Аюрведа.

**Постановка проблеми.** Останнім часом у світі набирає популярності такий тип харчування, як вегетаріанство, який передбачає повну або часткову відмову від продуктів тваринного

походження. Існують різні причини переходу людей на цей тип харчування: модні тенденції, наслідування інших людей, релігійні, філософські та екологічні мотиви. Але основними під-

ставами є користь для здоров'я та морально-етичні настанови.

Найбільш вагому роль вегетаріанський тип харчування відіграє у профілактиці та лікуванні серцево-судинних і онкологічних захворювань, а також порушень у роботі шлунково-кишкового тракту та психічних розладів [1].

Вегетаріанство є пріоритетним типом харчування Аюрведи [2], який враховує вплив продуктів харчування як на процес травлення, так і на свідомість, оскільки рівень свідомості контролює якість та кількість споживаної людиною їжі. Зазначимо, що Аюрведа унікає догми «всі повинні» => на користь індивідуально розроблених страв, продуктів для задоволення потреб конкретної людини [3].

Люди, які відмовляються від м'яса, часто стикаються з такою проблемою, як неготовність нашого суспільства до вегетаріанства. Вона проявляється в тому, що в закладах ресторанного господарства досить малий вибір страв, які не містять продуктів тваринного походження.

Якщо йдеться про «заміну» м'яса, то насамперед згадуються різні зернові та бобові культури. Це насамперед цільнозернове борошно, різні крупи, які є природними біокоректорами [4].

Оскільки полізернові культури, на відміну від горіхів, фруктів та сиру, перед вживанням у їжу треба варити, то ті вегетаріанці, які не мають часу на готування вдома, відзначають як істотну незручність відсутність страв із такої сировини на підприємствах ресторанного господарства, аюрведичних кафе.

Саме все вищезазначене слугує передумовою для розширення асортименту страв із полізернової сировини для продукції вегетаріанського меню. Включення до складу страви науково обгрунтованої комбінації різних зернових культур дозволить отримати популярний серед населення вегетаріанський продукт – зернові сухарики полізернового складу, які сприятимуть поліпшенню здоров'я українців.

У літературних джерелах відсутні систематизовані дані щодо обгрунтованого поєднання полізернового комплексу в рецептурах сухих сніданків, складеного з цільнозернового борошна різних зернових культур, раціонального підбору співвідношення складників композиції.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В асортименті виробів із зернових культур лідируючу позицію посідають традиційні вироби із пшеничного борошна [5].

Технологічна переробка зерна пшениці в сортове борошно передбачає видалення зародку,

алейронового шару та оболонки зерна, які є цінними природними «коморами» білка, жиру, вітамінів і мінеральних речовин.

Це позначається на якості традиційних продуктів із пшеничного борошна вищого гатунку. Вони мають високу енергетичну цінність, не збалансовані за амінокислотним складом. У них відзначається лімітування за лізином, який є найбільш дефіцитною у світовому харчовому балансі незамінною амінокислотою, а також треонін та триптофан. Водночас, такі вироби мають низький вміст низки вітамінів та мінеральних речовин [6].

Сучасне виробництво функціональних зернових продуктів розширюється у вигляді напівфабрикатів, збагачених сухих сніданків, сухариків та інших продуктів [7]. Із кожним роком популярність цих продуктів зростає. За статистикою, 43% українських споживачів купують снеки один раз на тиждень, 19% – два-три рази на тиждень, а 11% – щодня [8].

До рецептури таких продуктів останнім часом входить цільнозернове пшеничне борошно, яке порівняно з борошном пшеничним вищого гатунку містить значну кількість вітамінів групи В, мінеральних речовин – кальцію, магнію, фосфору, заліза та харчових волокон, загальна кількість яких складає 8,2...11,5 % сухих речовин. Цінним є наявність клітковини, яка стимулює перистальтику кишечника, перешкоджає всмоктуванню холестерину і запуску гнильних процесів в кишечнику [9].

Хлібопекарські властивості такого борошна є близькими до властивостей борошна другого гатунку, а споживчі властивості виробів із нього – питомий об'єм, пористість, формостійкість, органолептичні показники – значно кращі, ніж у виробів з обойного борошна [10].

Актуально до рецептури таких продуктів окрім пшеничного борошна додавати пластівці та борошно круп'яних культур, які є природними біокоректорами з високим вмістом біологічно цінних білків, не перетравлюваних полісахаридів та інших корисних для організму людини речовин [11].

Також присутній високий вміст вітамінів групи В, фосфору, калію, магнію та заліза. Приміром, оздоровчі властивості вівсяному борошну надає високий вміст харчових волокон, серед яких фізіологічне значення має полісахарид бетта-глюкан, який сприяє зниженню в крові вмісту холестерину. До гречаного борошна входить рутин, який підвищує міцність кровоносних судин, а також лецитин та аргінін, що також знижують рівень холестерину [11, 12].

Отже, виробництво зернових сухариків полізернового складу є раціональним підходом до розширення асортименту вегетаріанських зернових сніданків з одночасним підвищенням харчової та біологічної цінності продуктів масового споживання.

За положеннями Аюрведи індивідуальне харчування передбачає врахування особливостей трьох основних типів конституційного складу людського організму – дош, які відповідають за всі реакції людини, в тому числі відношення до харчування та сили травного вогню – Агни [13].

Розглядаючи властивості трьох дош – Вата, Пітта та Капха, слід враховувати вплив харчування на основі зернових культур на рівновагу дош в організмі [14].

Люди конституції Вата-доша, як правило, сухі, переважно високі, часто вітряні, нестійні. Злаки рекомендується обов'язково включати до раціону у приготованому стані. Сухі зернові сніданки можна включати до раціону для різноманітності та їх поживності.

Люди конституції Пітта-доша є гарячими, активними, володіють гарним травленням. До продуктів персоналізованого харчування рекомендують різні грінки, крекери, сухарі, бублики, сушки, сухі сніданки.

Основні властивості людей конституції Капха-доша – це вологість і холод. Це означає, що у розробленні персоналізованого харчування необхідно вибирати продукти з протилежними властивостями – сухі і теплі. Отже, зернові сухі сніданки є хорошим початком робочого дня.

**Формулювання цілей статті (постановка завдання).** Метою статті є розроблення страв із полізернової суміші для вегетаріанського меню ресторанів та аюрведичних кафе за рахунок формування рецептури зернових сухариків полізернового складу, що є концептуальним підходом до розширення асортименту вегетаріанських сніданків із підвищенням харчової та біологічної цінності продуктів масового споживання.

У дослідженнях нами було використано органолептичний, фізичний, фізико-хімічний, мікробіологічний та розрахунковий методи.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сухарики – це хлібобулочний виріб. Основою всіх сухариків є борошно, здебільшого пшеничне або житнє. Серед цілої низки розроблених напрямів підвищення біологічної цінності борошняних виробів та зниження їх калорійності для розширення меню вегетаріанських страв для ресторанних підприємств та аюрведичних кафе вибрано цілнозернове борошно пшениці, а також його комбінування з борошном інших зернових культур із взаємним збалансуванням білкового складу, а також збагаченням комплексом БАР, що входять до їх складу.

Отже, під час вибору зернового складника сухариків ми звернулися до амінокислотного складу зернових культур, зокрема: борошно пшеничне, рисове гречане, вівсяне, кукурудзяне, амарантове.

Було складено таблицю амінокислотного профілю за незамінними амінокислотами (НАК) [15], розраховано амінокислотний скор АК, за яким встановлено першу лімітовану НАК.

У таблиці 1 систематизовано та узагальнено значення АК борошна досліджуваних зернових культур.

Першою лімітованою НАК в усіх досліджуваних видах борошна є лізин, окрім амарантового борошна. Також спостерігається лімітування за метіоніном + цистином. (борошно амарантове, гречане, пшеничне). Значною мірою досліджувані види зернового борошна лімітовані за треоніном.

На рис. 1, 2, 3 показано порівняння відсотку забезпеченості відповідно білка ФАО/ВООЗ найбільш лімітованими НАК, зокрема лізином, метіонін + цистином та треоніном, у дослідних видах борошна.

Отже, з погляду отримання повноцінної за білковим складом композиції обрано такі зернові культури: цілнозмелене пшеничне борошно як основа композиції. Гречане борошно як джерело

Таблиця 1

**Значення НАК\* борошна досліджуваних зернових культур**

Борошно	Вміст білка, %	Амінокислотний скор							
		Лей	Ізо	М+Ц	Ліз	Т+Ф	Трео	Вал	Трип
Рисове	7,13	1,18	1,09	1,24	0,66	1,45	0,91	1,23	1,12
Пшеничне	13,00	1,07	1,02	0,81	0,48	1,33	0,71	0,89	1,08
Гречане	13,25	0,89	0,94	0,86	0,92	0,96	0,96	1,03	1,43
Вівсяне	10,00	1,03	1,03	1,20	0,69	1,53	0,83	1,22	1,60
Кукурудзяне	9,42	1,74	0,90	1,12	0,52	1,50	0,93	1,02	0,74
Амарантове	13,56	0,93	1,07	0,88	1,01	1,07	1,03	1,00	1,33

\*Ліз – лізин, Лей – лейцин, Ізо – ізoleyцин, М+Ц – метіонін+цистин, Т +Ф – тирозин+фенілаланін, Тре – треонін, Вал – валін, Трип – триптофан

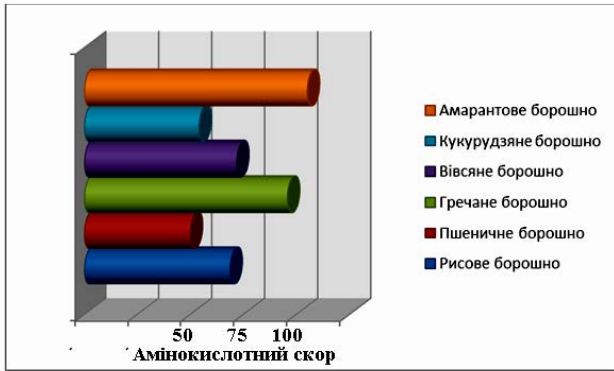


Рис. 1. Порівняння амінокислотного скору лізину дослідних видів борошна

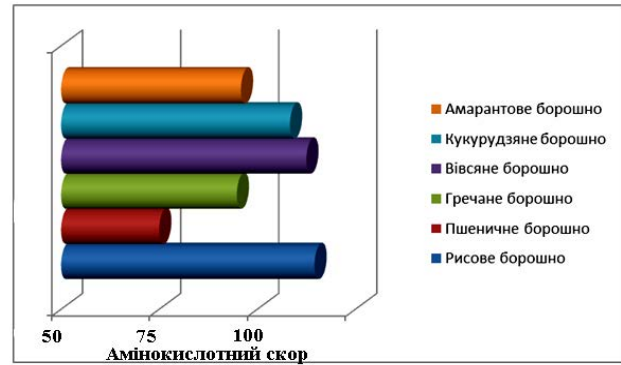


Рис. 2. Порівняння амінокислотного скору метіоніну+цистину дослідних видів борошна

лейцину, лізину, треоніну та валіну, оскільки АС цих НАК більший від пшеничного борошна. Вівсяне борошно як джерело метіоніну+цистину, лізину, треоніну, валіну.

У табл. 2 наведено обґрунтування технологічної та функціональної доцільності вибору зернової сировини у виробництві сухариків.

Нами було поставлено завдання створити сухариків із покращеним амінокислотним складом. Для виконання цього завдання обрали 14 рецептур із різними відсотковими співвідношеннями пшеничного, вівсяного та гречаного видів борошна. Варіанти композицій та розрахунки амінокислотного скору готових сухариків наведено у табл. 3.

З наведених розрахунків видно, що покращеним, порівняно з базовим варіантом, є останній, 14-й варіант. У цьому варіанті вміст пшеничного борошна знижено до 60%. Проте таке співвідношення складових комбінації може негативно проявитися в реологічних показниках готового продукту, тому ми використовували композиції з заміною пшеничного борошна від 20%.

Для з'ясування впливу гречаного борошна (ГБ), вівсяного борошна (ВБ) на технологічний процес та якість сухариків готували суміші із цільнозернового пшеничного борошна з заміною його 10, 15, 20%. Контролем був зразок, виготовлений із цільнозернового борошна без додавання ГБ, ВБ. Результати досліджень наведено у табл. 4.

З наданих даних можна відзначити, як змінюються контрольовані показники тіста, сухариків

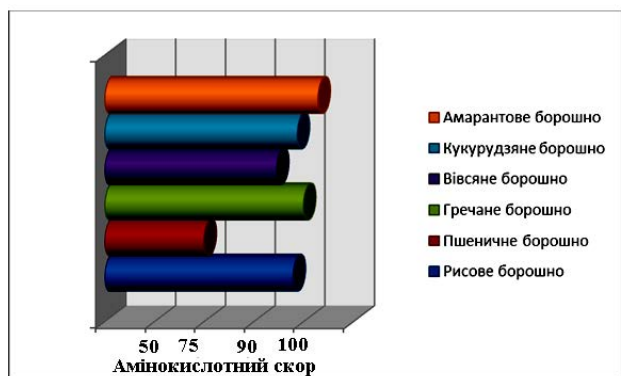


Рис. 3. Порівняння амінокислотного скору треоніну дослідних видів борошна

від різних комбінацій складових частин. Разом із гречаним та вівсяним борошном до загального замісу надходять їх складники, які впливають на фізико-хімічні, колоїдні та біохімічні процеси виготовлення сухариків. Чим більше їх вноситься до тіста, тим виразніше помітні зміни показників технологічного процесу та якості сухариків.

Також відзначалося збільшення водопоглинальної здатності, що пояснюється тим, що білок борошна гречки володіє більш високою водоутримуючою здатністю, ніж клейковина пшениці, структурою крохмальних зерен гречки та високим вмістом некрохмальних полісахаридів. Вівсяне борошно містить велику кількість слизеутворюючого полісахариду – ліхеніну, який активно набухає та також утримує велику кількість вологи.

Таблиця 2

**Технологічна та функціональна доцільність вибору сировини у виробництві сухариків**

Сировина для виготовлення полізернових сухариків	Технологічна та функціональна доцільність
Борошно пшеничне цільнозернове Гречане борошно Вівсяне борошно	Зниження калорійності, збагачення харчовими волокнами, збалансування амінокислотного складу за лізином та іншими НАК, збільшення вмісту мінеральних речовин, вітамінів та інших БАР

Розрахунки амінокислотного скору рецептур сухариків

Пшеничне борошно	рецептура	1,00	0,90	0,90	0,80	0,80	0,80	0,70	0,70	0,70	0,75	0,75	0,70	0,65	0,60
Гречане борошно		0,00	0,10	0,00	0,10	0,20	0,00	0,30	0,00	0,15	0,15	0,10	0,20	0,25	0,30
Вівсяне борошно		0,00	0,00	0,10	0,10	0,00	0,20	0,00	0,30	0,15	0,10	0,15	0,10	0,10	0,10
Незамінні аК		Розрахунок вмісту НАК білкової комбінації													
Лейцин		7,46	7,34	7,43	7,31	7,22	7,41	7,10	7,38	7,24	7,25	7,30	7,19	7,13	7,07
Ізолейцин		4,08	4,05	4,08	4,05	4,02	4,08	3,99	4,09	4,04	4,04	4,05	4,02	4,00	3,99
Метіонін+цистинє		2,85	2,87	2,99	3,00	2,88	3,12	2,90	3,26	3,08	3,01	3,07	3,02	3,03	3,04
Лізин		2,62	2,86	2,74	2,98	3,11	2,86	3,35	2,97	3,16	3,10	3,04	3,23	3,35	3,47
Тирозин+фенілаланін		8,00	7,77	8,12	7,89	7,55	8,24	7,32	8,36	7,84	7,78	7,95	7,67	7,56	7,44
Треонін		2,85	2,95	2,90	3,00	3,05	2,94	3,15	2,99	3,07	3,05	3,02	3,10	3,15	3,20
Валін		4,46	4,53	4,62	4,69	4,59	4,79	4,66	4,95	4,81	4,72	4,77	4,76	4,79	4,83
Триптофан		1,08	1,12	1,13	1,17	1,15	1,18	1,19	1,24	1,21	1,18	1,19	1,20	1,22	1,24
Амінокислотний скор															
Лейцин		1,07	1,05	1,06	1,04	1,03	1,06	1,01	1,05	1,03	1,04	1,04	1,03	1,02	1,01
Ізолейцин		1,02	1,01	1,02	1,01	1,00	1,02	1,00	1,02	1,01	1,01	1,01	1,01	1,00	1,00
Метіонін+цистин		0,81	0,82	0,85	0,86	0,82	0,89	0,83	0,93	0,88	0,86	0,88	0,86	0,87	0,87
Лізин		0,48	0,52	0,50	0,54	0,57	0,52	0,61	0,54	0,58	0,56	0,55	0,59	0,61	0,63
Тирозин+фенілаланін		1,33	1,30	1,35	1,32	1,26	1,37	1,22	1,39	1,31	1,30	1,33	1,28	1,26	1,24
Треонін		0,71	0,74	0,72	0,75	0,76	0,74	0,79	0,75	0,77	0,76	0,75	0,77	0,79	0,80
Валін		0,89	0,91	0,92	0,94	0,92	0,96	0,93	0,99	0,96	0,94	0,95	0,95	0,96	0,97
Триптофан		1,08	1,12	1,13	1,17	1,15	1,18	1,19	1,24	1,21	1,18	1,19	1,20	1,22	1,24

Таблиця 4

Хімічний склад, фізико-хімічні та технологічні властивості цільнотривого пшеничного борошна та ГБ+ВБ (% на СР)

Показники	Контроль	Внесено % борошна замість пшеничного						
		Вівсяного			Гречаного			
		10	15	20	10	15	20	
Тісто								
Вміст сирової клейковини, %	23,8	21,9	20,9	19,2	21,1	20,3	19,1	
Масова частка вологи, %	45	46	46,3	46,5	46,6	46,9	47	
Кислотність, град	початкова	3,2	3,2	3,4	3,6	3,4	3,6	3,8
	кінцева	4,2	4,4	4,6	4,8	4,6	4,8	5
Сухарики								
Питомий об'єм, см <sup>3</sup> /г	2,61	2,55	2,43	2,31	2,45	2,38	2,22	
Кислотність, град	3,6	3,8	4	4,2	4	4,2	4,4	
Пористість, %	72	70	69	65	68	66	62	

Водночас борошно цих зернових культур містить пентозани та харчові волокна, що володіють високими водопоглинальними властивостями. Тісто з частковою заміною пшеничного борошна більше розріджується внаслідок збільшення в ньому рідкої фази. Відзначимо, що вівсяне борошно, вбираючи воду, перетворюється в однорідну суміш, і в тісті його дрібні частинки рівномірно розподіляються по всій масі. Гречане борошно, набухаючи, не втрачає форму і в тісті знаходиться у вигляді включень. Враховуючи вищезазначені дослідження, було вирішено обрати таку рецептуру (табл. 5).

Таблиця 5

Рецептура новостворених сухариків

Вид сировини	Витрати сировини, кг на 1000 т
Пшеничне борошно	600,00
Гречане борошно	170,00
Вівсяне борошно	85,00
Розпушувач	5,00
Сіль	25,00

Готовий продукт було перевірено на безпечність та відповідність вимогам нормативної документації.

Фізико-хімічні показники та органолептичні показники сухариків із полізернової суміші борошна наведено в табл. 6, 7.

Таблиця 6  
Фізико-хімічні показники готового продукту

Показник	Значення
Вологість, %	13
Вміст харчових волокон, %	9
Вологоутримуюча здатність, %	78

Таблиця 7  
Органолептичні показники сухариків із полізернового борошна

Показники	Оцінка	Характеристика
Поверхня сухариків	7	Гладенька, без тріщин та розривів
Забарвлення	8	Рівномірне. Без підгорілої
Форма	9	Шматочки сухариків однакові, прямокутної форми
Смак	9	Властивий даному виду сухариків
Запах	9	Запах притаманний сухарикам з приємним ароматом

Тривалість випікання сухариків – 40–54 хв. Випечені сухарики (рис. 4) охолоджують та використовують за призначенням.

**Висновки.** Розглянуто вплив включення до раціону українців, зокрема тих, які дотримуються принципів вегетаріанського харчування, сухих сніданків на основі зернових культур на рівновагу дош Вата, Пітта та Капха в організмі за положеннями Аюрведи.

На основі аналізу амінокислотного складу з метою отримання повноцінної за білковим складом композиції обрано такі зернові культури: цілнозмелене пшеничне борошно як основа



Рис. 5. Готові полізернові сухарики

рецептури, гречане борошно як джерело лейцину, лізину, треоніну та валіну, вівсяне борошно як джерело метіоніну + цистину, лізину, треоніну, валіну.

Технологічна та функціональна доцільність виробництва полізернових сухариків на основі борошна пшеничного цілнозернового, гречаного, вівсяного – це зниження калорійності сухих сніданків, збалансування амінокислотного складу незамінними амінокислотами, збагачення їх харчовими волокнами, мінеральними речовинами, вітамінами та іншими есенціальними біологічно активними речовинами.

Виробництво зернових сухариків полізернового складу сприятиме розширенню асортименту страв аюрведичної кулінарії підвищеної харчової та біологічної цінності у меню спеціалізованих закладів ресторанного господарства.

Сухі зернові сніданки рекомендовані для включення до персоналізованого харчування осіб всіх трьох основних типів конституцій, що є гарним початком робочого дня. Структура українських закладів харчування дозволяє готувати аюрведичні страви, організувати їх виробництво на великих та малих майданчиках, спеціалізованих закладах. Вони мають увійти до структури харчування українців та органічно доповнити склад традиційної української кухні.

#### Список літератури:

1. Проблеми здорового харчування в Україні [Електронний ресурс] Матеріал міжнародної наукової конференції на тему «Проблеми здорового харчування в Україні». – 2020. Режим доступу // <http://dSPACE.nuft.edu.ua/jspui/handle/123456789/18574>
2. Агніваса, А. Введение в Аюрведу /пер. с англ. М.:Профит-Стайл, 2011. 160 с.
3. Аюрнутригеноміка: персоналізоване харчування, натхнене Аюрведою, від початку і доказів". *Журнал традиційної та комплементарної медицини* 5.4 (2015): 228–233.
4. Козіонова, А.В. Ведична кулінарія для сучасних господинь / А.В. Козіонова. - 12-е изд. - Москва: Філ. кн., 2015. 272 с.
5. Сирохман І.В. Якість і безпечність зерноборошняних продуктів. Навчальний посібник [Текст] / І.В. Сирохман, Т.М. Лозова. – К.: Центр навчальної літератури, 2006. – 384 с.
6. Капрельянц Л.В. Лікувально-профілактичні властивості харчових продуктів та основи дієтології / Л. В. Капрельянц, А. П. Петросьянц. Одеса : Друк, 2011. 269 с.

7. Тюряева С.В. Сухари-сухарики /С.В. Тюряева// Хлебопродукты. –2016. №3. С.46–49.
8. Використання зернових пластівців у технології оздоровчих продуктів / В.І. Дробот, Л.А. Михонік, О.Д. Тесля, А.Б. Семенова // Хлібопекарська і кондитерська промисловість України. 2013. № 1(98). С. 3–4.
9. Минеева, Е.М., and А.Р. Ещенко. «Использование цельнозерновой муки в производстве крекеров». Материалы докладов XII Международной конференции «Торты. Вафли. Печенье. Пряники–2020. Производство–Рынок–Потребитель»/Международная промышленная академия 26–28 февраля 2020 г. М.: 2020.–169 с.. Vol. 26. 2020.
10. Шаболкина, Елена Николаевна, and С. Н. Шевченко. «Результаты изучения реологических и хлебопекарных показателей теста, полученного из смесей пшеничной муки и продуктов переработки зерна овса голозерного». *Зернобобовые и крупяные культуры* 4 (36) (2020).
11. Панкина, И.А., and А.А. Бобырева. «Перспективы использования различных видов муки в хлебопекарной промышленности». *Современная биотехнология: актуальные вопросы, инновации и достижения*. 2020.
12. Капрельянц Л.В. Лікувально-профілактичні властивості харчових продуктів та основи дієтології / Л.В. Капрельянц, А.П. Петросьянц. Одеса : Друк, 2011. 269 с.
13. Сан Лайт Большая энциклопедия Аюрведы. 1000 целительных советов: М, АСТ, 2012, 245 с
14. Питание по Аюрведе / авт.-сост. Б.Л. Смолянский, Л.В. Белова. М. : Изд-во ЭКМО, 2005. 208 с
15. Химический состав пищевых продуктов, Книга 2, Справочные таблицы Содержания аминокислот, жирных кислот, витаминов, макро- и микроэлементов, органических кислот и углеводов, Скурихин И.М., Волгарев М.Н., 1987, 284 с.

**Frolova N.E., Tishchenko O.M., Gubar T.M., Kohut D.O., Oatmeal A.G. EXPANSION OF ASSORTMENT OF DISHES OF POLYGRAIN MIXTURE OF VEGETARIAN MENU FOR RESTAURANTS AND AYURVEDIC CAFES**

*The article is devoted to the issue of expanding the assortment of vegetarian dishes from raw grains in the menu of specialized restaurant establishments. The possibility of scientifically substantiated combination of different grain crops to improve the technology of dry breakfast cereals, the inclusion of which in the daily diet will help strengthen the health of Ukrainians and prevent food-related diseases.*

*The criterion for selecting raw materials for the polygrain composition was the amino acid profile of essential amino acids. The amino acid composition of wheat, rice, buckwheat, oat, corn, amaranth flour was analyzed. The basis of the recipe is selected whole wheat flour, followed by combination with buckwheat and oat flour to balance the amino acid composition of proteins and enrich the complex of biologically active substances that are part of them.*

*Organoleptic, physical, physicochemical and calculation methods were used in the research. The influence of buckwheat and oat flour on the technological process and the quality of crackers was investigated in mixtures with whole wheat with its replacement in the amount of 10, 15, 20%. The physicochemical and technological properties of whole grain wheat, buckwheat, oatmeal and dough obtained on the basis of polygrain compositions were studied.*

*Finished polygrain crackers of high biological value due to the improved amino acid composition were investigated for physicochemical and organoleptic indexes.*

*The proposed scientifically based developments will promote the organization of healthy nutrition of people of different constitutions according to Ayurvedic prescriptions, will expand the assortment of Ayurvedic dishes in the menu of restaurant establishments and draw attention to Ayurveda, the ancient science of common sense, intentions, human life.*

**Key words:** *vegetarianism, polisernovaisis mixture, wholemeal flour, buckwheat flour, oatmeal, crackers, Ayurveda.*



# ТРАНСПОРТ

УДК 656.13

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/33>**Волков Д.В.**

Приазовський державний технічний університет

## ВПЛИВ ЗИМОВИХ КЛІМАТИЧНИХ ФАКТОРІВ СХІДНОУКРАЇНСЬКОГО РЕГІОНУ НА ОПІР РУХУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто зимові природно-кліматичні фактори Східноукраїнського регіону, їх вплив на опір руху автомобільного транспорту. Висвітлюються умови географічного середовища, аналізується їх дія на транспортні процеси: інтенсивність відводу тепла від агрегатів, зменшення сили тяги транспортних засобів, підвищення опору руху. Температурний режим Східноукраїнського регіону нестійкий. У зимовий період спостерігаються при різких коливаннях температури часті відлиги. Вологість повітря в Східноукраїнському регіоні в зимові місяці підвищена, що негативно впливає на потужність двигуна автотранспорту, на питому витрату бензину. Установлено, що різка зміна температури повітря разом з вітром сприяють утворенню на дорожньому полотні шуги – суміші шматків льоду з водою, що впливає на коефіцієнт зчеплення, призводить до збільшення сили опору руху. Розглянуто фізико-механічні властивості шуги. Доведено, що сила шугового опору залежить від опорів руйнування її розсування шуги, інерційного та гідродинамічного опорів. Схематично зображено сили, що діють на автомобіль при русі по шугі: аеродинамічна, інерції руху, тяжіння, тяги на колесах, опору ковзання, гідродинамічна. Виведено диференціальне рівняння руху автомобіля по шугі, згідно з яким аеродинамічна сила при русі по шугі зростає зі збільшення швидкості руху, сила інерції змінюється відповідно до зміни прискорення, сила тяги перевищує сили зчеплення коліс з дорогою, сила опору ковзання пов'язана з перетворенням механічної енергії на внутрішню теплоту, а сила гідродинамічного опорів спрямована протилежно швидкості руху автомобіля й залежить від числа Рейнольдса та числа Фруда. Виявлено, що опір руху в зимових умовах Східноукраїнського регіону зазнає подвійний опір: в'язкий і гравітаційний, зумовлений деформацією шуги. Фазові зміни шуги – режеляційна фірнізація (танення й замерзання), спричинені природно-кліматичними умовами. Отже, опір руху в зимових умовах призводить до зростання гістерезисних втрат, до збільшення витрат палива, що підвищує екологічне забруднення Східноукраїнського регіону.

**Ключові слова:** природно-кліматичні фактори, Східноукраїнський регіон, автомобільний транспорт, експлуатація, опір руху, сила опору, шуга, сніг, температура.

**Постановка проблеми.** Зимові природно-кліматичні фактори є одними із основних чинників, що впливають на дорожнє полотно, експлуатаційні характеристики роботи транспорту. Східноукраїнський регіон вирізняється різкими змінами температур, частими відлигами, що сприяє утворенню шуги – суміші крижаних кристалів і шматків льоду з водою у вигляді кашоподібної маси [1, с. 212], і створює особливості опору руху автомобільного транспорту.

При цих обставинах висувається необхідність дослідження опору руху автомобільного транспорту в умовах впливу зимових кліматичних факторів Східноукраїнського регіону. Опір руху в шугі призводить до зростання гістерезисних

утрат, а також до збільшення щільності палива, що, у свою чергу, при змінних режимах роботи двигуна (під час пуску й роботи в холостому режимі) призводить до перевитрат палива, збільшує шкідливий вплив автомобіля на навколишнє середовище. Ураховуючи високий рівень екологічного забруднення Східноукраїнського регіону, ця проблема стоїть особливо гостро.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

У процесі дослідницької роботи вивчені теоретичні праці вітчизняних і зарубіжних учених. Питанням впливу атмосферно-кліматичних факторів на показники тягово-швидкісних властивостей автомобіля, на процеси якості його роботи приділяли увагу Ю.А. Хегай [2] та Н.С. Захаров [3].

Дослідження впливу низьких температур навколишнього повітря на експлуатаційну, паливну економічність автомобіля, на роботу агрегатів, механізмів і систем автомобілів проводили Д.А. Захаров [4], В.А. Кунцман, А.Н. Бабакін, А.Ю. Сергєєв [5].

Дослідження для вирішення завдань, пов'язаних з проблемою опору руху в зимовий період, здійснювали Н.С. Вольська [6], Л.В. Барахтанова, І.О. Донато, А.А. Анікіна [7] та інші. У роботі В.С. Макарова [8] наведена методика розрахунку й оцінки прохідності машин при криволінійному русі по снігу з урахуванням режимів руху. Питання дослідження вибору конструкційних параметрів рушіїв, що забезпечують ефективність руху колісних машин по снігу, розглядали С.Є. Манянін [9] і Д.В. Зезюлін [10]. У роботі Я.Е. Богайчука [11] порушено питання підвищення експлуатаційних паливно-економічних та екологічних показників автомобілів у зимовий період.

Дослідження льодового опору (модельні випробування в льоду), пов'язані з морським транспортом, у 2009 році проводили Ендрю Палмер і Джон Демпсі (університет Кларксона, штат Нью-Йорк) [12]. Нові підходи до експериментальних досліджень льодового опору судів на моделях запровадили Д.А. Семенов, В.А. Зуєв, Є.М. Грамузов та інші. На дорогах льодовий опір майже не

розглядався. В.О. Ковригін [13] займався вивченням підвищення безпеки автомобілів в умовах експлуатації на основі аналізу характеристик зчеплення шин із льодом.

У літературі відсутні будь-які дані з досліджень опору руху автомобіля в умовах наявності суміші – води, снігу й льоду (шуги). Це питання є найменш вивченим, тому становить інтерес і є актуальним.

**Постановка завдання.** Мета статті – провести аналіз впливу зимових кліматичних факторів Східноукраїнського регіону на опір руху автомобіля; визначити сили, що діють при русі автомобіля по шугі; установити диференціальне рівняння руху автомобіля по шугі.

**Виклад основного матеріалу.** Природно-кліматичні фактори – це умови географічного середовища: клімат, температура, вітровий режим, опади тощо.

У зимових умовах природно-кліматичні фактори є одними з основних чинників, що впливають на дорожнє полотно, експлуатаційні характеристики роботи транспорту, його надійність, а також екологічні показники (рис. 1).

Клімат Східноукраїнського регіону помірно континентальний. Характерна особливість зимових умов – часті відлиги, що призводить при перепадах температур до виникнення ожеледиці та шуги.

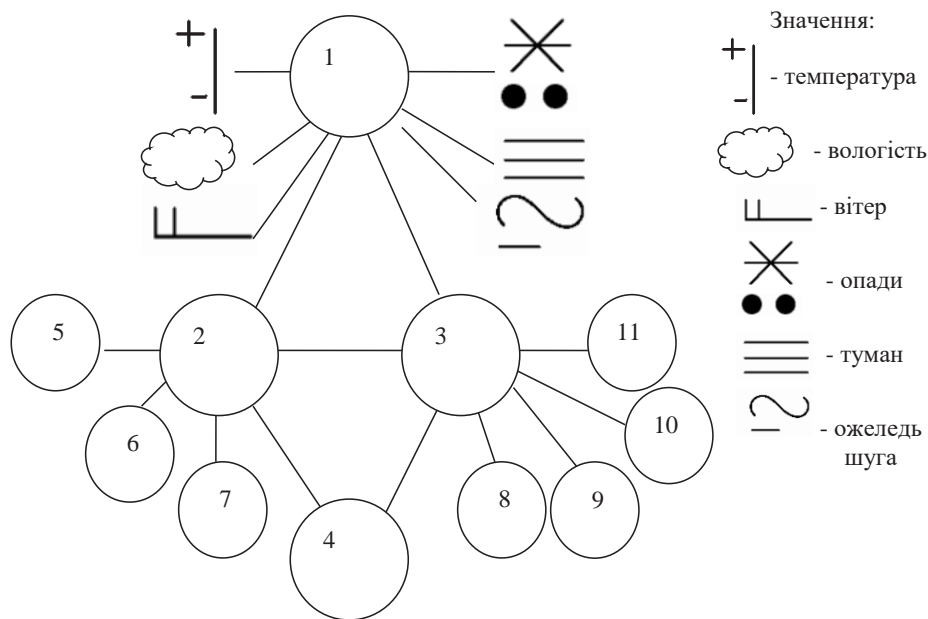


Рис. 1. Вплив природних факторів на роботу автотранспорту в зимових умовах: 1 – природно-кліматичні фактори; 2 – дорожні фактори; 3 – експлуатаційні фактори; 4 – екологічні фактори; 5 – стан полотна; 6 – зчеплення; 7 – видимість; 8 – швидкість; 9 – опір руху; 10 – витрата палива; 11 – зношування деталей

Безпосередній вплив на формування клімату Східноукраїнського регіону надають Сибірський антициклон, Арктичний і Азорські максимуми.

Температурний режим Східноукраїнського регіону нестійкий. У зимовий період спостерігаються різкі коливання температури. З приходом холодних повітряних мас спостерігається різке зниження температури до  $-15$  –  $-25^{\circ}\text{C}$ . Теплі повітряні маси приносять підвищення температури до  $10$ – $13^{\circ}\text{C}$ , які супроводжуються відлигами. Середні зимові температури становлять  $-6$  –  $-8^{\circ}\text{C}$  [14].

Нестійка температура повітря впливає на збільшення сили опору руху і зменшення сили тяги транспортних засобів.

Вітровий режим Східноукраїнського регіону пов'язаний із проходженням смуги високого атмосферного тиску, так званої осі Воейкова, яка проходить уздовж лінії Луганськ-Дніпро, між Добропільським і Бахмутським районами Донецької області. На північ від цієї смуги переважають відносно теплі вітри, на сході – холодні північно-східні та східні вітри, їх швидкість становить до  $5$ – $6$  м/с.

Режим вітру Донецької області формується під впливом рельєфу Донецької височини, позначається також вплив Азовського моря й впливає на інтенсивність відводу тепла від агрегатів транспорту, що призводить до зниження їх температурного режиму під час руху.

Зимова кількість опадів в Східній Україні становить від  $60$  мм до  $90$  мм [14] переважно у вигляді снігу й дощу, що ускладнює роботу автомобільного транспорту і збільшує ризик аварійної ситуації.

Вологість повітря в Східноукраїнському регіоні в зимові місяці підвищена й коливається в межах  $85$ – $97\%$  [14]. Підвищена вологість негативно впливає на працездатність транспорту: потужність двигуна автотранспорту знижується на  $2\%$  на кожні  $10$  г вмісту води в  $1$  кг повітря, а питома витрата бензину збільшується на  $2,7\%$  [15, с. 64].

Під впливом різкої зміни температур і вітру змінюється фазовий стан опадів, які перетворюються на суміш крижаних кристалів і шматків льоду з водою (шуги) на дорожньому полотні, що впливає на коефіцієнт зчеплення, тобто на критерій слизькості [15, с. 79]:

$$K_z = K_x - K_u(V - V_x), \quad (1)$$

де:  $K_z$  – коефіцієнт зчеплення;  $K_x$  – коефіцієнт зчеплення при швидкості  $x$ ;  $K_u$  – коефіцієнт зміни зчеплення залежно від стану дороги (шуги);  $V$  – швидкість.

Зі збільшенням швидкості руху значення коефіцієнта зчеплення  $K_c$  знижується.

До іншого фактору, що впливає на коефіцієнт зчеплення в зимовий період, можна віднести щільність і товщину шуги (рис. 2). Орієнтовно щільність шуги  $P_c$  варіюється від  $0,06$  до  $0,20$  г/см<sup>3</sup> [1, с. 212], при цьому коефіцієнт зчеплення зменшується до  $0,2$ .

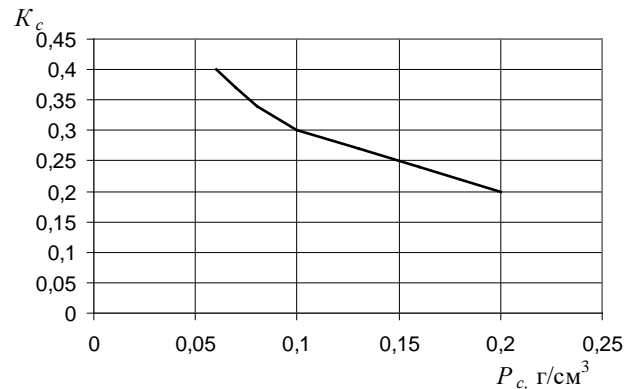


Рис. 2. Залежність коефіцієнта зчеплення  $K_c$  від щільності шуги  $P_c$

Опір при русі по шугі залежить від її фізико-механічних властивостей, товщини, від розмірів, конфігурації та згуртованості крижин. До основних фізико-механічних характеристик шуги відносять модуль пружності, межу міцності на вигин, динамічний коефіцієнт тертя шуги об машину й силу тертя.

Модуль пружності приблизно дорівнює  $E \approx (35-62) \cdot 10^4$  Н/см<sup>2</sup> [16, с. 235], межа міцності на вигин  $b_p$ , а також динамічний коефіцієнт тертя шуги об машину можна прийняти  $f_T = 0,08$ – $0,15$ .

При русі в шугі машина вдаряється об неї, іноді вповзає, частинки шуги облягають нижню частину корпусу автомобіля, сила шугового опору  $R_{ш}$  становить:

$$R_{ш} = R_{ш1} + R_{ш2} + R_{ш3} + R_g, \quad (2)$$

де  $R_{ш1}$  – опір від руйнування шуги;  $R_{ш2}$  – опір від розсування зруйнованої шуги;  $R_{ш3}$  – інерційний опір;  $R_g$  – гідродинамічний опір.

Кожен із цих складників, у свою чергу, ділиться на дві частини: міцність маси, кінематика руху частинок шуги та механічне тертя шуги.

При цьому величина гідродинамічного опору в шугі розподіляється на два складники: в'язкісний складник, що залежить від числа Рейнольдса, і гравітаційний складник, який залежить від числа Фруда [16, с. 112], і має вигляд:

$$R_g = Re_u + Fr_u = \frac{VL}{h_u} + \frac{V^2}{gL} \quad (3)$$

де  $V$  – швидкість автомобіля, м/с;  $L$  – довжина автомобіля, м;  $h_u$  – кінематична в'язкість шуги;  $g$  – відносне прискорення, що характеризує дію зовнішньої сили, м/с<sup>2</sup>.

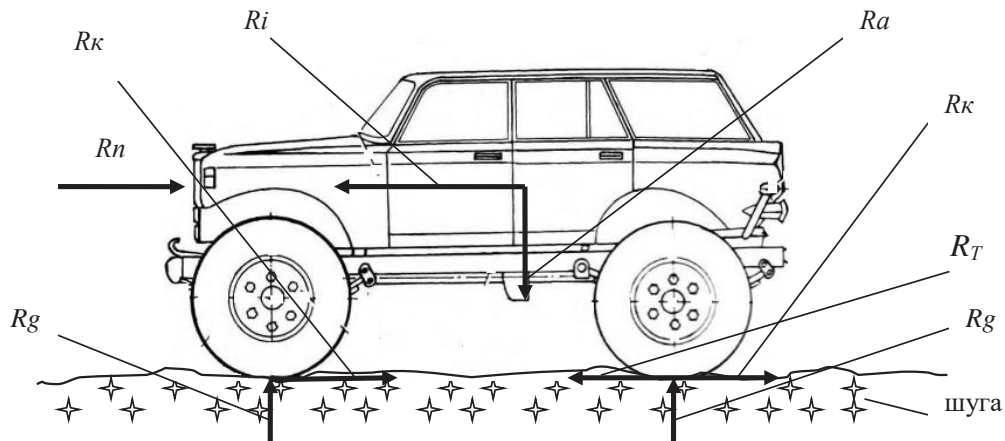


Рис. 3. Схема сил, що діють при русі автомобіля по шугі:  $R_n$  – сила опору повітря (аеродинамічна);  $R_i$  – сила інерції руху;  $R_a$  – сила тяжіння (вага автомобіля);  $R_T$  – сила тяги на колесах;  $R_k$  – сила опору ковзання;  $R_g$  – сила гідродинамічного опору

Сили, що діють на автомобіль при русі по шугі, наведені на рис. 3.

Сила опору повітря  $R_n$  (аеродинамічна сила) при русі по шугі пропорційна квадрату швидкості й зростає зі збільшенням швидкості руху. Сила інерції  $R_i$  змінюється відповідно до зміни прискорення [9, с. 105]. Сила тяжіння  $R_a$  тим більша, чим більший гідродинамічний опір шуги. Сила тяги  $R_T$  при русі автомобіля по суміші шматків льоду з водою перевищує сили зчеплення коліс з дорогою, що сприяє пробуксовці провідних коліс. Сила опору ковзання  $R_k$  спрямована вздовж поверхні зіткнення коліс з шугою й пов'язана з перетворенням механічної енергії у внутрішню теплоту. При цьому сила гідродинамічного опору  $R_g$  спрямована протилежно швидкості руху автомобіля.

Диференціальне рівняння руху автомобіля по шугі  $R_{Au}$  має вигляд:

$$R_{Au} \frac{dy}{dt} = \sum_{j=1}^N R_j = R_n + R_i + R_a + R_T + R_k + R_g = L_R \frac{\rho V^2}{2} S_M + \frac{Gj}{g} + mg + \frac{O_{mk}}{r_k} + K_{mp} C_\theta + \frac{VL}{h_u} + \frac{V^2}{gL} \quad (4)$$

де  $L_R$  – лобовий опір автомобіля;  $\rho$  – щільність повітря, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – швидкість, м/с;  $S_M$  – міделевий пере-

різ, м<sup>2</sup>;  $G$  – вага автомобіля, Н;  $j$  – відносне прискорення м/с;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.  $m$  – маса автомобіля, кг;  $O_{mk}$  – обертаючий момент колеса, Нм;  $r_k$  – радіус колеса, м;  $K_{mp}$  – коефіцієнт тертя ковзання, Н;  $C_\theta$  – сила реакції дороги, Н.

Таким чином, автомобільний транспорт при русі в зимових умовах Східноукраїнського регіону зазнає подвійного опору (в'язкісний + гравітаційний), зумовлений деформацією шуги. Фазові зміни шуги – режеляційна фірнізація (танення й замерзання), спричинені природно-кліматичними умовами та пов'язані з коливаннями температур, вітровим режимом і вологістю.

**Висновки.** У статті досліджено опір руху автомобільного транспорту в шугі, утвореної під впливом зимових кліматичних факторів Східноукраїнського регіону. Визначено сили, що діють при русі автомобіля по шугі. Виведено формулу сили шугового опору, встановлено диференціальне рівняння руху автомобіля по шугі. Отримані результати є певним внеском у вивчення теоретичних питань опору руху колісних транспортних засобів за наявності шуги. Порушена проблема потребує подальшого дослідження.

#### Список літератури:

1. Справочник дорожных терминов / за ред. проф. В.В. Ушакова. Москва : Экономико-консультационный ЦЕНТР «ЭКОН», 2005. 303 с.
2. Хегай Ю.А. Влияние атмосферно-климатических факторов на показатели тягово-скоростных свойств и топливной экономичности автомобиля. *Актуальные вопросы современной науки*. 2009. Вып. № 6-1. С. 82–88.
3. Захаров Н.С. Влияние сезонных условий на процессы изменения качества автомобилей : дисс. ... докт. техн. наук : 05.22.10. Тюмень, 2000. 523 с.
4. Захаров Д.А. Влияние зимних условий эксплуатации автомобилей на топливную экономичность двигателей : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.10. Тюмень, 2000. 19 с.
5. Кунцман В.А., Бабакин А.Н., Сергеев А.Ю. Влияние климатических условий на работоспособность машин. *Евразийский союз ученых*. 2018. Вып. 5 (50). С. 65–68.

6. Вольская Н.С. Разработка методов расчета опорно-тяговых характеристик колесных машин по заданным дорожно-грунтовым условиям в районах эксплуатации : дисс. ... докт. техн. наук : 05.05.03. Москва, 2008. 370 с.
7. Барахтанов Л.В., Аникин А.А., Донато И.О. Физико-механические свойства снега как полотна пути для движения машин. *Наука и образование* : электронное научно-техническое издание. 2010. № 10. С. 16–19. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/160649.html> (дата звернення: 15.04.2021).
8. Макаров В.С. Методика расчета и оценка проходимости колесных машин при криволинейном движении по снегу : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Нижний Новгород, 2009. 21 с.
9. Манянин С.Е. Повышение проходимости колесных и гусеничных машин по снегу путем научно обоснованного выбора конструктивных параметров движителей : дисс. ... докт. техн. наук : 05.05.03. Нижний Новгород, 2019. 412 с.
10. Зезюлин Д.В. Разработка методики выбора конструкционных параметров движителей, обеспечивающих эффективность движения колесных машин по снегу : автореф. дисс. ... канд. техн. наук : 05.05.03. Нижний Новгород, 2013. 17 с.
11. Богайчук Я.Э. Влияние низкотемпературных условий эксплуатации на экологичность автомобилей : дисс. ... канд. техн. наук : 05.22.10. Тюмень, 2004. 172 с.
12. Andrew Palmer, John Dempsey. MODEL TESTS IN ICE. *Proceedings of the 20th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions, Luleå, Sweden*. 2009. June 9–12. P. 322–332.
13. Ковригин В.А. Повышение безопасности автомобилей в условиях эксплуатации на основе анализа характеристик сцепления их шин со льдом : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10. Иркутск, 2014. 203 с.
14. Український гідрометеорологічний центр: Інформаційний сервер погоди. URL: <https://meteo.gov.ua/ua/34712> (дата звернення: 15.09.2020).
15. Эксплуатация автомобильной техники в сложных условиях : руководство / И.В. Балабай, В.Н. Щербинин, В.Н. Чулков и др. Москва : Воениздат, 1984. 128 с.
16. Войткусский Я.Н. Сопротивление движению судов. Ленинград : Судостроение, 1988. 287 с.

#### **Volkov D.V. THE INFLUENCE OF WINTER CLIMATIC FACTORS OF THE EASTERN UKRAINIAN REGION ON THE RESISTANCE OF MOTION OF AUTOMOTIVE TRANSPORT**

*The article discusses the winter natural and climatic factors of the East Ukrainian region, their influence on the resistance to the movement of road transport. The conditions of the geographical environment are highlighted, their impact on transport processes is analyzed: the intensity of heat removal from the units, a decrease in the traction force of vehicles, an increase in resistance to movement. The temperature regime of the East Ukrainian region is unstable. In winter, frequent thaws are observed with sharp temperature fluctuations. Air humidity in the East Ukrainian region in the winter months is increased, which negatively affects the engine power of vehicles, the specific consumption of gasoline. It has been established that a sharp change in air temperature together with the wind contributes to the formation of frazil ice on the roadway – a mixture of pieces of ice with water, which affects the coefficient of adhesion and leads to an increase in the force of resistance to movement. The physical and mechanical properties of the frazil ice are considered. It is proved that the force of frazil ice resistance depends on the resistance of destruction and expansion of the frazil ice, inertial resistance and hydrodynamic resistance. A schematic representation of the forces acting on the car when moving along the frazil ice. The differential equation of the car motion along the frazil ice is derived. According to which the aerodynamic force during moving along the frazil ice increases with an increase in the speed of movement, the inertial force changes in accordance with the change in acceleration, the traction force exceeds the adhesion of the wheels to the road, the sliding resistance force is associated with the transformation of mechanical energy into internal heat, and the hydrodynamic resistance force is directed in the opposite direction vehicle speed and depends on the Reynolds number and on the Froude number. It was revealed that resistance to movement in winter conditions in frazil ice leads to an increase in hysteresis losses, as well as to an increase in fuel losses, and increases environmental pollution of the East Ukrainian region.*

**Key words:** climatic factors, East Ukrainian region, road transport, operation, resistance to movement, resistance force, sludge, snow, temperature.

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Якусевич Ю.Г.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Ліганенко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДИК РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТІВ ТЕПЛОВІДДАЧІ Й ПАДІННЯ ТИСКУ ПРИ КИПІННІ ХОЛОДОАГЕНТІВ У ПЛАСКИХ ЗМІЙОВИКАХ

*На суднах широкого розповсюдження набули змієвикові випарники та кожухотрубні випарники з внутрішньотрубним кипінням холодоагенту в горизонтальних трубах. Виходячи з необхідності зменшення викидів озоноруйнуючих холодоагентів, сьогодні вживаються заходи щодо створення холодильних систем з малим умістом холодоагенту. Цьому сприяє, зокрема, кипіння холодоагенту в трубах або інших каналах з невеликим прохідним перетином.*

*На забезпечення роботи значної кількості випарників при різних температурах кипіння витрачається багато електроенергії. З позиції енергоефективності при внутрішньотрубному кипінні холодоагентів необхідно досягати високої інтенсивності тепловіддачі та малого падіння тиску двофазного потоку. Розробка таких холодильних систем вимагає точного розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та падіння тиску холодоагентів. У статті проведено дослідження методик розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та падіння тиску при кипінні холодоагентів у плоских змієвиках. За результатами аналізу, удосконалену методику Domanski, Hermes можна вважати найбільш прийнятною для розрахунку падіння тиску двофазного потоку в колінах змієвиків, оскільки при наближенні масового паровмісту до одиниці спостерігається виражене зниження падіння тиску. Це відрізняє її від інших методик, що брали участь в аналізі, і відповідає фізиці процесу.*

*На підставі проведеного дослідження можна стверджувати, що на вже знайдені оптимальні значення масової швидкості й відповідної їй різниці впливають усі змінні, включаючи вид холодоагенту. У реальних умовах кількість сполучень змінних може бути досить значною, у зв'язку з цим кожен випадок повинен розглядатися й оброблятися окремо, завдання небагато спрощується, якщо накладені певні обмеження на деякі змінні. Успішному її вирішенню сприяє наявність програми спільного розрахунку тепловіддачі й падіння тиску при кипінні холодоагентів у трубах змієвика.*

**Ключові слова:** змієвик, коефіцієнт тепловіддачі, тиск, суднові холодильні машини, холодоагент.

**Постановка проблеми.** У системах охолодження вантажних і житлових приміщень сучасних суден, а також технологічного обладнання, включаючи апарати для низькотемпературної обробки продуктів (наприклад, суден рибпромислової галузі), широко застосовуються теплообмінні апарати (випарники) із внутрішньотрубним кипінням холодоагенту. На забезпечення роботи значної кількості випарників при різних температурах кипіння витра-

чається багато електроенергії. З позиції енергоефективності при внутрішньотрубному кипінні холодоагентів необхідно досягати високої інтенсивності тепловіддачі та малого падіння тиску двофазного потоку. Ці величини залежать від багатьох факторів. Якщо, наприклад, збільшується масова швидкість холодоагентів  $w$ , то підвищується як середній коефіцієнт тепловіддачі (далі – КТВ), так і падіння тиску. З підвищенням КТВ зменшується різниця

між середніми температурами внутрішньої стінки труб і киплячого холодоагенту, що призводить до зниження втрат у випарнику. Збільшення ж падіння тиску супроводжується зниженням тиску й температури кипіння холодоагенту на виході з випарника, через що зменшуються продуктивність компресора та холодильний коефіцієнт. Виходячи з необхідності зменшення викидів озоноруйнуючих холодоагентів, сьогодні вживаються заходи щодо створення холодильних систем з малим умістом холодоагенту. Цьому сприяє, зокрема, кипіння холодоагенту в трубах або інших каналах з невеликим прохідним перетином. Розробка таких холодильних систем вимагає точного розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та падіння тиску холодоагентів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Значний внесок у дослідження тепловіддачі та гідродинаміки двофазних потоків зробили такі відомі вчені, як С.С. Кутателадзе, В.М. Боришанський, Г.М. Данілова, Д.А. Лабунцов, О.О. Гоголін. Вивченням режимів плинну двофазних потоків при кипінні рідин у гладких трубах також займалися Л.С. Стерман, М.Г. Стюшин. Серед закордонних дослідників, що займалися цією темою, варто відзначити М.М. Shah, S.G. Kandlikar, J.R. Thome, P.A. Domanski, C. Wang, R.H.S. Winterton.

**Постановка завдання.** Метою статті є дослідження методик розрахунку коефіцієнтів тепловіддачі та падіння тиску при кипінні холодоагентів у пласких змійовиках.

**Виклад основного матеріалу.** На суднах широкого розповсюдження набули змієвикові випарники (повітроохолоджувачі) та кожухотрубно випарники з внутрішньотрубним кипінням холодоагенту в горизонтальних трубах. Повітроохолоджувачі зазвичай складаються з ряду змієвиків (шлангів), виконаних із горизонтальних труб однакових розмірів. Коліна, за допомогою яких утворюються змієвики, можуть розташовуватися у вертикальній, горизонтальній або похилій площинах. Іноді не всі коліна мають однакову орієнтацію. У змієвиковому випарнику теплопритік до холодоагенту відбувається на прямих ділянках горизонтальних труб. Через коліна теплопритік виявляється незначним, оскільки вони знаходяться поза потоком повітря. Це дає змогу при визначенні КТВ розглядати змієвик як пряму трубу, що нагрівається. Довжина зони кипіння  $l_k$  визначається числом  $n_m$  та довжиною  $l_m$  окремих труб, у яких кипить холодоагент. Зона перегріву пари тут не розглядається. У горизонтальних трубах змієвика, як і в одиночній трубі, що нагрівається, локальні КТВ та обумовлені

тертям градієнти тиску  $dP_m/dz$  змінюються за нелінійним залежностями. Для розрахунку кожну трубу плаского змієвика необхідно поділити на короткі ділянки. Різноманіття конструкцій змієвиків і схем руху холодоагенту в них не дає змоги виконати розрахунки середнього КТВ та повне падіння тиску  $\Delta P_n$  за єдиною методикою.

Для визначеності припустимо, що всі горизонтальні труби змієвика технічно гладкі, мають однакову довжину  $l_m$  та розташовуються в одній площині, усі коліна мають однаковий радіус  $R_k$ , щільність теплового потоку до всіх труб однакова, а коліна знаходяться поза потоком охолоджуваного середовища. При цьому пласкі змієвики можуть розташовуватися вертикально, горизонтально або мати однаковий кут нахилу  $\theta$  відносно горизонталі.

Подача рідкого холодоагенту у вертикально або похило розташовані змієвики може здійснюватися зверху або знизу. Внутрішній діаметр  $d_m$ , довжина  $l_m$  та кількість труб  $n_m$  можуть варіюватися в широкому діапазоні за умови дотримання допустимого зниження температури насичення холодоагенту  $\Delta t_s \leq 5^\circ\text{C}$ . Припустимо, що внутрішній діаметр коліна співпадає з діаметром  $d_m$  труби. Радіус вісьової лінії коліна  $R_k$  не може бути меншим зовнішнього діаметру труби  $d_s$ . Зазвичай приймається співвідношення  $\frac{2R_k}{d_m} = 2,5 \dots 6$ . Його можна привести до вигляду  $R_k = z \cdot d_m$ , приймаючи  $z = 1,25 \dots 3$ .

При зроблених припущеннях труби змієвика, у яких відбувається кипіння холодоагенту, можна розглядати як суцільну трубу, яка обігрівается, довжиною  $L = l_m \cdot n_m$ . Поділ її на короткі ділянки повинен здійснюватися з урахуванням місць розташування коліна. Оскільки теплопритік до холодоагенту в колінах не враховується, масовий паровміст  $x$  та ентальпія суміші  $i_c$  в них не змінюється.

Умовно можна вважати, що в колінах виконується падіння тиску без зміни термодинамічного стану холодоагенту. Необхідно кожну трубу конкретного змієвика поділити на однакову кількість ділянок  $n_y$ . Загальна кількість ділянок розглянутої суцільної труби становить:  $n_{oy} = n_m \cdot n_y$ . Щоб звести до мінімуму похибку усереднення локальних значень, рекомендується приймати його близьким до 100. Кількість перетинів першої труби становить:  $n_{c1} = n_y + 1$ . З урахуванням прийнятих допущень для наступних труб воно збігається з кількістю ділянок. Загальна кількість перетинів, для яких обчислюються шукані змінні, становить  $n_c = n_{oy} + 1$ .

Типова схема розподілу на ділянки змійовика, що складається з чотирьох труб і трьох колін показана на рис. 1. Якщо прийняти  $n_y = 25$ , то  $n_{oy} = 100$ .

Коліна знаходяться в перетинах з номерами 26, 51, 76. Як бачимо, входу та виходу чергового коліна присвоюється однаковий номер. Чітка нумерація перетинів змійовика важлива також з позиції усереднення локальних значень КТВ та градієнта тиску.

Падіння тиску відбувається на коротких ділянках труб і в колінах. Тому доводиться підсумовувати результати, отримані в перетинах від другого до останнього. При підсумовуванні падінь тиску в колінах можна використовувати той самий підхід,

оскільки відсутність даних у проміжних рядках не впливає на результат додавання.

Не завжди труби змійовика вдається розділити на цілу кількість ділянок  $n_y$ , щоб загальна їх кількість становила  $n_{oy} = 100$ . Поділ змійовиків на короткі ділянки залежно від кількості труб  $n_m$  з указуванням номерів перетинів на вході-виході колін змійовика наведено в таблиці 1. У цій таблиці також наведена кількість перетинів труби  $n_c$  та колін  $n_k$ . Загальна кількість ділянок варіюється від 95 до 108 одиниць. Вона становить рівно сто лише в п'ятьох змійовиках, що містять від 2 до 20 труб. Можливі й інші варіанти розподілу змійовиків на короткі ділянки.

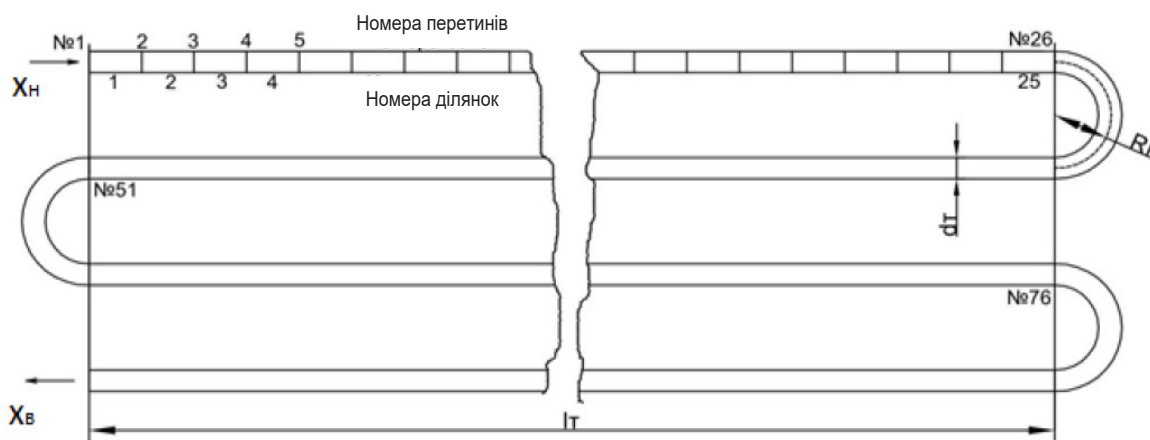


Рис. 1. Умовна схема поділу змійовика з чотирьох труб на ділянки

Таблиця 1

Поділ змійовика на ділянки та нумерація перетинів

Кількість					Номера перетинів на вході-виході колін змійовика
$n_m$	$n_k$	$n_y$	$n_{oy}$	$n_c$	
2	1	50	100	101	51
3	2	33	99	100	34, 67
4	3	25	100	101	26, 51, 76
5	4	20	100	101	21, 41, 61, 81
6	5	17	102	103	18, 35, 52, 69, 86
7	6	14	98	99	15, 29, 43, 57, 71, 85
8	7	12	96	97	13, 25, 37, 49, 61, 73, 85
9	8	11	99	100	12, 23, 34, 45, 56, 67, 78, 89
10	9	10	100	101	11, 21, 31, 41, 51, 61, 71, 81, 91
11	10	9	99	100	10, 19, 28, 37, 46, 55, 64, 73, 82, 91
12	11	8	96	97	9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 65, 73, 81, 89
13	12	8	104	105	9, 17, 25, 33, 41, 49, 57, 65, 73, 81, 89, 97
14	13	7	98	99	8, 15, 22, 29, 36, 43, 50, 57, 64, 71, 78, 85, 92
15	14	7	105	106	8, 15, 22, 29, 36, 43, 50, 57, 64, 71, 78, 85, 92, 59
16	15	6	96	97	7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 49, 55, 61, 67, 73, 79, 85, 91
17	16	6	102	103	7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 49, 55, 61, 67, 73, 79, 85, 91, 97
18	17	6	108	109	7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 49, 55, 61, 67, 73, 79, 85, 91, 97, 103
19	18	5	95	96	6, 11, 16, 21, 26, 31, 36, 41, 46, 51, 56, 61, 66, 71, 76, 81, 86, 91
20	19	5	100	101	6, 11, 16, 21, 26, 31, 36, 41, 46, 51, 56, 61, 66, 71, 76, 81, 86, 91, 96



З таблиці 1 можна зробити висновок, що зі збільшенням кількості труб змійовика  $n_m$ , зменшується кількість ділянок  $n_y$  кожної з них. На точність усереднення локальних значень цей факт впливає слабо, оскільки загальна кількість коротких ділянок змійовика зберігається близькою до 100. Для обмеження повного падіння тиску в змійовику  $\Delta P_n$  зі збільшенням його труб  $n_m$ , як правило, зменшують їх довжину  $l_m$ . В іншому випадку значне падіння тиску  $\Delta P_n$  призведе до зниження температури насичення холодоагенту  $\vartheta_s$ .

Оскільки змійовикові випарники складаються з горизонтальних труб і колін, проводилася порівняльна оцінка методик розрахунку падіння тиску в колінах [1–6] з метою визначення найбільш достовірної методики. Чисельні значення падіння тиску двофазного потоку R22 та R404A при  $t_0 = -30^\circ\text{C}$

в коліні з параметрами:  $d_m = 0,012$  м;  $R_x = 0,018$  м при масовій швидкості  $\omega_p = 60 \text{ кг} / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$ , отримані за цими методиками, наводяться в таблиці 2 для шести значень масового паровмісту  $x$ .

За наведеними методиками зі зростанням паровмісту падіння тиску збільшується, що можна пояснити зниженням щільності двофазної суміші. Характерні значні розбіжності втрат тиску в коліні при низькому паровмісті  $x = 0,01$ . Вони відрізняються в  $5,3/0,41=13$  разів для R22 та у  $3,22/0,29=11$  разів для R404A.

На рис. 2, 3 побудовані криві, отримані за розрахунковим значенням з таблиці 2 для холодоагенту R404A й температури кипіння  $t_0 = -30^\circ\text{C}$ .

У діапазоні паровмістів  $x=0,8\dots 0,99$  за методикою [6] спостерігається зниження втрат тиску, за методикою [3] вони змінюються слабо, а за іншими

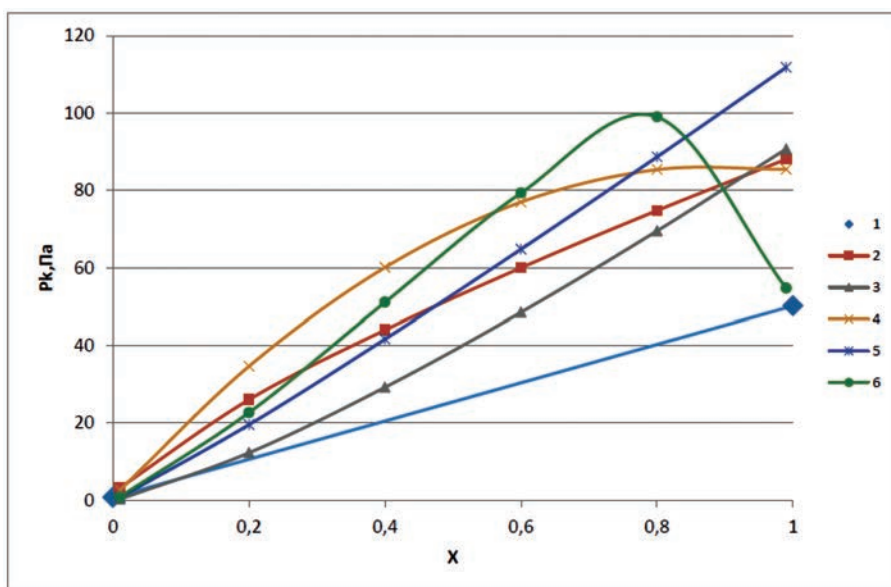


Рис. 2. Залежність падіння тиску в коліні змійовика від масового паровмісту при  $\omega_p = 60:3 / (\text{м}^2 \cdot \text{с})$

Таблиця 2

Падіння тиску двофазного потоку R22 та R404A у коліні змійовика, Па

Автори	Паровміст $x$					
	0,01	0,2	0,4	0,6	0,8	0,99
методик	R22	R22	R22	R22	R22	R22
	R404A	R404A	R404A	R404A	R404A	R404A
[2]	4,3	37,6	63,8	87,2	108,8	128,2
	3,22	26,01	43,99	59,95	74,75	88,03
[3]	0,4	17,2	41,0	68,1	97,6	127,4
	0,29	12,28	29,21	48,49	69,48	90,68
[4]	3,5	51,0	89,1	115,0	129,0	130,0
	2,61	34,63	60,04	76,94	85,33	85,42
[5]	1,0	27,7	59,0	91,7	125,0	158,0
	0,75	19,55	41,62	64,76	88,61	111,78
[6]	1,2	37,0	84,1	130,9	163,5	90,3
	0,87	22,68	51,05	79,27	98,95	54,70

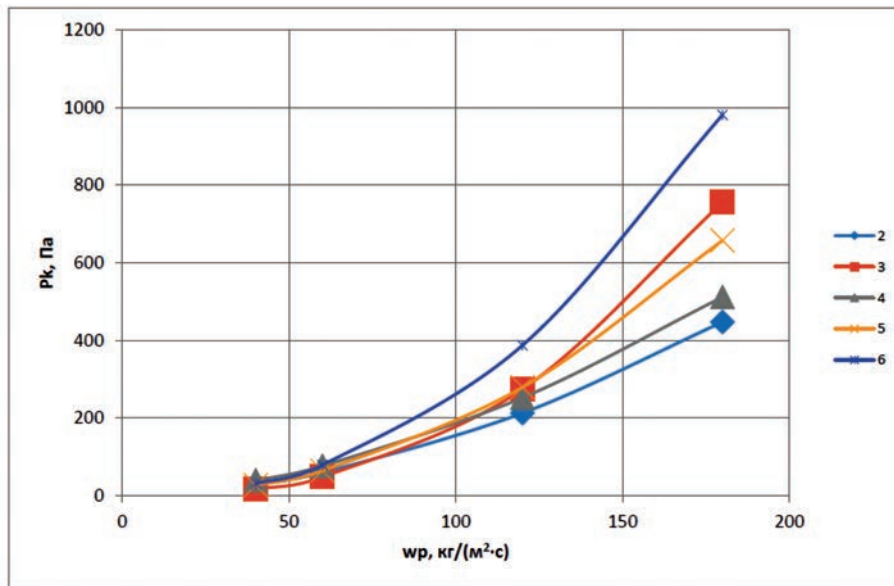


Рис. 3. Залежність падіння тиску в коліні від масової швидкості холодоагенту при  $x = 0,6$

методиками продовжується збільшення втрат тиску майже за лінійною залежністю (див. рис. 2).

Наведені в таблиці 2 втрати тиску холодоагенту R22 виявляються вищими, ніж у R404A. Завищені значення втрат тиску при паровмістах, близьких до одиниці, указують на недоліки методик. Лише за однією з них при високих паровмістах утрати тиску в колінах  $\Delta P_n$  зменшується.

На рис. 3 можна побачити, що зі збільшенням масової швидкості холодоагенту ростуть і втрати тиску. При більш високих температурах кипіння та менших відношеннях діаметра труби  $d_m$  та радіусу осьової лінії  $R_k$  методика [3] надає недостовірні дані.

Утрати тиску знижуються з підвищенням температури кипіння, це пояснюється зниженням щільності суміші потоку при її підвищенні. Зі збільшенням відношення:  $z = R_k / d_m$  збільшуються й утрати тиску. Швидше за все це пов'язано з тим, що збільшуються лінійні втрати напору. За більшістю методик, зі збільшенням діаметра труби  $d_m$  та радіуса осьової лінії коліна  $R_k$  простежується підвищення втрат тиску, виняток ста-

новить методика [3], що має складний характер зміни параметрів.

**Висновки.** За результатами аналізу, удосконалену методику Domanski, Hermes [6] можна вважати найбільш прийнятною для розрахунку падіння тиску двофазного потоку в колінах змійовиків, оскільки при наближенні масового паровмісту до одиниці спостерігається виражене зниження падіння тиску. Це відрізняє її від інших методик, що брали участь в аналізі, і відповідає фізиці процесу.

На підставі проведеного дослідження можна стверджувати, що на вже знайдені оптимальні значення масової швидкості та відповідної їй різниці впливають усі змінні, включаючи вид холодоагенту. У реальних умовах кількість сполучень змінних може бути досить значною, у зв'язку з цим кожен випадок повинен розглядатися й оброблятися окремо, завдання дещо спрощується, якщо накладені певні обмеження на деякі змінні. Успішному її вирішенню сприяє наявність програми спільного розрахунку тепловіддачі та падіння тиску при кипінні холодоагентів у трубах змійовика.

#### Список літератури:

1. Ito H. Pressure losses in smooth pipe bends. *Journal of Basic Engineering*. 1960. Vol. 82, P. 131–143.
2. Gronnerud R. Investigation in liquid hold-up, Flow resistance and Heat Transfer in Circular Type Evaporators, part IV: Two-phase Resistance in boiling refrigerants. *Bulletin de l'Inst. du Froid, Annexe*. 1972. № 1. P. 127–138.
3. Chisholm D. Two-phase flow in pipelines and heat exchangers. London, 1983. 304 p.
4. Geary D.F. Return bend pressure drop in refrigeration systems. *ASHRAE Transaction*. 1975. Vol. 81. № 1. P. 250–265.
5. Chen I.Y. Single-phase and two-phase frictional characteristics of small U-type wavy tubes. *International Journal Heat Mass Transfer*. 2004. Vol. 47. P. 2241–2249.

6. Domanski P.A. An improved correlation for two-phase pressure drop of R22 and R410A in 180° return bends. *Proceedings of the 11-th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering*. 2006. P. 1006–1051.
7. Wojtan L. Investigation of flow boiling in horizontal tubes: Part II- Development of new heat transfer model for stratified-wavy, dryout and mist flow regimes. *International Journal Heat Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. P. 2970–2985.
8. Da Silva Lima R.J. Flow boiling in horizontal smooth tubes: new heat transfer results for R-134a at three saturation temperatures. *Applied Thermal Engineering*. 2009. Vol. 29. Iss. 7. P. 1289–1298.
9. Huo X. Boiling two-phase pressure drop in small diameter tubes. Brunel University Research Archive, 2007. 11 p.
10. Colombo L.P.M. Flow patterns, heat transfer and pressure drop for evaporation and condensation of R134A in microfin tubes. *International Journal Refrigeration*. 2012. Vol. 35. P. 2150–2165.

**Daki O.A., Yakusevich Yu.G., Trishin V.V., Liganenko V.V. RESEARCH OF METHODS OF CALCULATION OF HEAT RELEASE COEFFICIENTS AND PRESSURE DROPPING AT BOILING OF REFRIGERATORS IN FLAT COILS**

*Coil evaporators and shell-and-tube evaporators with intra-tube boiling of refrigerant in horizontal pipes have become widespread on ships. Based on the need to reduce emissions of ozone-depleting refrigerants, measures are currently being taken to create refrigeration systems with low refrigerant content. This is facilitated, in particular, by the boiling of the refrigerant in pipes or other channels with a small cross-section. A lot of electricity is used to ensure the operation of a significant number of evaporators at different boiling points. From the standpoint of energy efficiency in the in-tube boiling of refrigerants, it is necessary to achieve a high intensity of heat transfer and a small pressure drop of the two-phase flow. The development of such refrigeration systems requires accurate calculation of heat transfer coefficients and pressure drop of refrigerants. In the article the research of methods of calculation of coefficients of heat transfer and pressure drop at boiling of refrigerants in flat coils is carried out. According to the results of the analysis, the improved Domansky method, Hermes can be considered the most acceptable for calculating the pressure drop of two-phase flow in the knees of the coils, because when approaching the mass vapor content to one, there is a marked decrease in pressure drop. This distinguishes it from other methods involved in the analysis and corresponds to the physics of the process. Based on the study, it can be argued that the already found optimal values of mass velocity and the corresponding difference are influenced by all variables, including the type of refrigerant. In real conditions, the number of combinations of variables can be quite significant, in this regard, each case must be considered and processed separately, the task is slightly simplified if certain restrictions are imposed on some variables. Its successful solution is facilitated by the presence of a program for the joint calculation of heat transfer and pressure drop during the boiling of refrigerants in the coil pipes.*

**Key words:** coil, heat transfer coefficient, pressure, ship refrigerators, refrigerant.

**Дакі О.А.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Якусевич Ю.Г.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Тришин В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Ліганенко В.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## **ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СУДНОВИХ ХОЛОДИЛЬНИХ МАШИН ЗА РАХУНОК УДОСКОНАЛЕННЯ ПРОЦЕСІВ ВНУТРІШНЬОТРУБНОГО КИПІННЯ ХОЛОДОАГЕНТІВ У ВИПАРНИКАХ**

*Холодильні машини застосовуються на морських судах для збереження продуктів, комфортного кондиціонування повітря. Проектування й експлуатація риболовецьких суден, газозовів, пасажирських суден неможливі без застосування холодильних машин. Разом холодильні машини сучасних суден різного призначення споживають значну кількість електроенергії, яка генерується на судні, тому їх ефективна робота має вагомим значенням. Підбір оптимальних сполучень конструктивних і режимних параметрів холодоагенту підвищує енергоефективність суднових холодильних систем. У статті обґрунтовано методи підвищення енергоефективності суднових холодильних машин за рахунок удосконалення процесів внутрішньотрубного кипіння холодоагентів у випарниках. За результатами проведеного дослідження визначено шляхи вдосконалення процесів теплообміну в змійовиках холодильних машин суден. Щільність теплового потоку переважно залежить від умов тепловіддачі на зовнішній стороні труб (виду та швидкості охолоджуваного середовища, виду та ступеня оребрення, температурного напору). При заданому або обраному значенні збільшення швидкості супроводжується ростом коефіцієнта тепловіддачі на стороні холодоагенту. На жаль, водночас збільшується падіння тиску киплячого потоку. Через це знижуються температура насичення й тиск усмоктування, що знижує ефективність роботи компресора. У кожному конкретному випадку можна підібрати оптимальне значення швидкості, при якому необоротні втрати будуть найменшими. Обґрунтовано доцільність застосування чисельного методу визначення оптимальних сполучень конструктивних і режимних параметрів змійовиків випарників; виконано підбір оптимальних значень масової швидкості залежно від щільності теплового потоку та підбір оптимальної довжини зони кипіння семи холодоагентів у широкому діапазоні умов їх кипіння.*

**Ключові слова:** енергоефективність, коефіцієнт тепловіддачі, внутрішньотрубне кипіння, суднові холодильні машини, холодоагент.

**Постановка проблеми.** Монреальський протокол 1987 року й інші міжнародні угоди з охорони навколишнього середовища визначили перехід на озонобезпечні холодоагенти. Наявні методики розрахунку показників ефективності й фізичних процесів теплообміну поширюються, як правило, на кілька традиційних холодоагентів. Вони обме-

жені у використанні при переході на нові холодоагенти, що ускладнює проектування, підбір та аналіз експлуатації випарників з внутрішньотрубним кипінням холодоагенту. У зв'язку з цим виникла необхідність удосконалення методів теплового та гідромеханічного розрахунку випарників, що базується на узагальнених методиках визначення

локальних коефіцієнтів тепловіддачі (далі – КТВ) та падінь тиску, які враховують теплофізичні й термодинамічні властивості нових холодоагентів. Раніше тепловий і гідравлічний розрахунки проводили роздільно, а падіння тиску холодоагенту не визначалося. Це могло призводити до зниження продуктивності компресора та зростання його питомого енергоспоживання.

Холодильні машини (далі – ХМ) застосовуються на морських судах для збереження продуктів, комфортного кондиціонування повітря. Проектування й експлуатація риболовецьких суден, газозовів, пасажирських суден неможливі без застосування ХМ. Разом ХМ сучасних суден різного призначення споживають значну кількість електроенергії, яка генерується на судні, тому ефективна їх робота має вагоме значення. Підбір оптимальних сполучень конструктивних і режимних параметрів холодоагенту підвищує енергоефективність суднових холодильних систем.

Таким чином, дослідження й розвиток методів визначення параметрів, які характеризують інтенсивність тепловіддачі та зниження температури насичення в процесі кипіння холодоагентів у горизонтальних трубах і плоских змійовиках, є актуальним завданням.

#### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Дослідження, викладене в статті, ґрунтується на працях таких вітчизняних і закордонних учених у галузі тепловіддачі та гідродинаміки двофазних потоків, як В.М. Боришанський, Г.М. Данілова, Д.А. Лабунцов, О.О. Гоголін, М.М. Shah, S.G. Kandlikar, J.R. Thome, P.A. Domanski, C. Wang.

**Постановка завдання.** Мета статті – обґрунтування методів підвищення енергоефективності суднових холодильних машин за рахунок удосконалення процесів внутрішньотрубного кипіння холодоагентів у випарниках.

**Виклад основного матеріалу.** Випарники суднових ХМ здійснюють охолодження повітря або рідини (розсолу, води). У першому випадку їх називають повітроохолоджувачами (ПО), а в дру-

гому – кожухотрубними випарниками з кипінням робочої речовини в міжтрубному просторі або всередині труб. Перевагами внутрішньотрубного кипіння є зменшення кількості холодоагенту в апараті, що знижує ймовірність його потрапляння в навколишнє середовище [1]. У суднових випарниках, як правило, застосовуються горизонтальні труби з міді або сталі. За допомогою колін у них утворюються змійовики, а в кришках кожухотрубних випарників передбачаються перегородки, що забезпечують послідовний рух холодоагенту через задану кількість труб. Загальна довжина труб одного ходу холодоагенту (змійовика)  $l_s$  є розрахунковою величиною. Її можна представити у вигляді добутку довжини прямих труб  $l_m$  та їх кількості  $n_m$ , тобто  $l_s = l_m \cdot n_m$ . З метою отримання необхідної холодопродуктивності  $Q_0$  як змієвикові, так і кожухотрубні випарники компонують із визначеної кількості змійовиків.

Є дослідження, які вказують на взаємозв'язок між теплообміном і гідродинамікою потоку при кипінні рідини в трубах [2; 3; 4]. За напрямом руху холодоагенту в трубі, яка рівномірно обігривається, за рахунок збільшення ентальпії суміші  $i_c$  масовий паровміст  $x$  – відносна ентальпія підвищується за лінійним законом ( $x = (i_c - i') / (i'' - i')$ ). Об'єм рідкої фази в трубі зменшується, а парової – збільшується. У зв'язку із цим фактом змінюється гідродинамічна структура потоку за напрямком його руху. На рис. 1 наведено шість режимів двофазного потоку в горизонтальній трубі.

У роботі [4] без урахування зони висихання стінок труби виділяються режими: пухирцевий, снарядний, розшарований, хвильовий, хвильовий з перемичками, кільцевий, дисперсний.

Різними авторами складені карти режимів двофазного потоку [2; 3; 5]. Найбільш відомою є карта, що наведена на рис. 2. Буквою «С» на ній позначена зона висихання плівки рідини, що спочатку проявляється у верхній частині труби й поступово доходить до нижньої її частини. Буквою «Т» позначена зона туману. Перехід від одного режиму

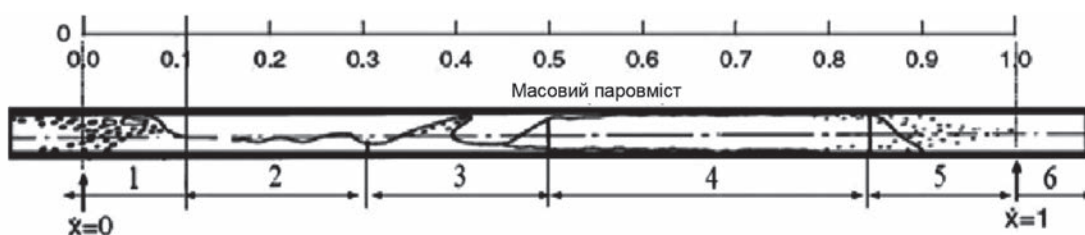


Рис. 1. Режими двофазного потоку: 1 – пухирцевий, 2 – шарувато-хвильовий, 3 – снарядний, 4 – кільцевий, 5 – дисперсний, 6 – зона сухої пари

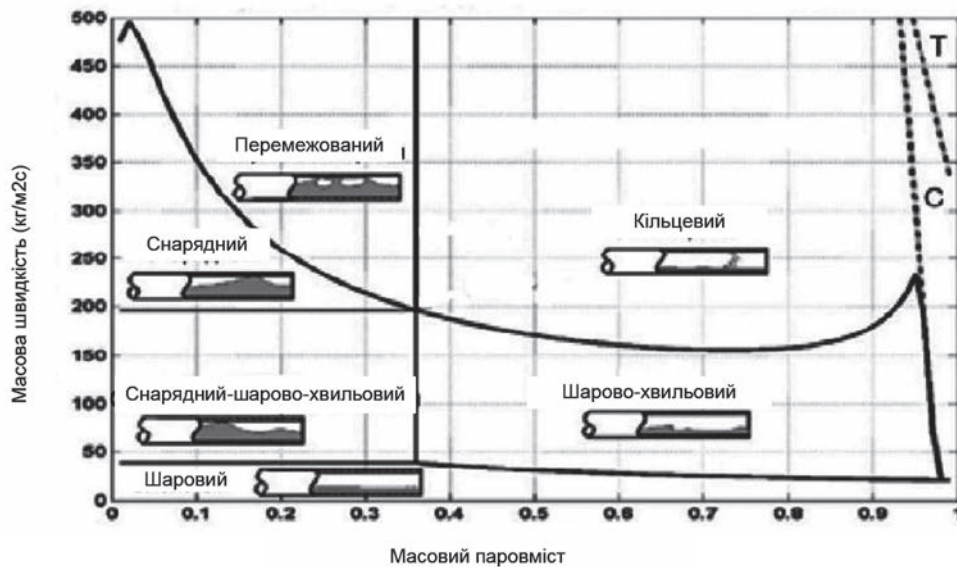


Рис. 2. Карта режимів двофазного потоку (Wojtan 2005)

потоку до іншого залежить від масової швидкості  $w_p$ , паровмісту  $x$  і виду холодоагенту.

Інші карти режимів двофазного потоку в горизонтальних трубах представлені в інших координатах і запропоновані в 1956 р. Бейкером (Baker); 1964 р. Колльером і Томе (Collier, Thome); 1976 р. Ван-дер-Ягтом та іншими. Кордони переходу від одного режиму потоку до іншого на всіх картах є нечіткими, оскільки навіть при візуальному спостереженні через прозору трубу їх важко зафіксувати. При зміні режимів (структури) двофазного потоку змінюються й закономірності, які описують інтенсивність тепловіддачі. Усі дослідники підтверджують, що найбільш високі КТВ отримуються в кільцевому режимі, коли шар рідини з убутої за напрямком руху товщиною розподіляється за окружністю труби, а пара з високою швидкістю переміщується по центральній частині, захоплюючи за собою рідину.

Для характеристики гідродинаміки двофазного потоку часто використовуються числа подібності: Рейнольдса  $Re$ , Фруда  $Fr$ , Ейлера  $Eu$  і Нуссельта (безрозмірний КТВ):

$$Re = \frac{w_0 d_m}{\nu} = w_p \cdot d_m / \mu \quad (1)$$

$$Fr = \frac{w_0^2}{d_m g} = \frac{(w_p)^2}{d_m \cdot g \cdot \xi^2} \quad (2)$$

$$Eu = \frac{P}{(\rho w_0)^2} = \frac{P}{\rho \cdot (w_p)^2} \quad (3)$$

$$Nu = \alpha \cdot d_m / \lambda \quad (4)$$

У формулах (1)–(4) позначено:  $w$  – швидкість рідини;  $\nu$  – динамічна та кінематична в'язкість суміші, рідкої або парової фази;  $d_m$  – внутрішній діаметр труби;  $g = 9,8 \text{ м/с}^2$ ;  $P$  – падіння тиску на ділянці труби;  $\xi$  – коефіцієнт опору;  $\alpha$  – температуропровідність;  $\lambda$  – коефіцієнт теплопровідності рідини.

Локальні (місцеві) КТВ на стороні холодоагенту  $\alpha_{an}$  залежать від режиму потоку. Експериментально вони визначаються шляхом розподілу щільності теплового потоку  $q$  на різницю між температурами внутрішньої сторони труби й у конкретному місці  $t_m$  та температурою насичення холодоагенту  $t_s$ , тобто  $\alpha_{an} = q / (t_m - t_s)$ . Основними труднощами є точний вимір температури  $t_m$ . Згідно з відомими моделями внутрішньотрубного кипіння рідини, у механіці тепловіддачі виділяють два складники: а) пухирцеве кипіння  $\alpha_n$  та б) конвективне кипіння  $\alpha_k$ .

Чисте пухирцеве (вільне) кипіння відбувається у великому обсязі нерухомої рідини. Воно характеризується процесом росту й відриву пухирцевої пари, на яку впливає щільність теплового потоку, характер поверхні, що нагрівається, і властивості рідини. При кипінні в трубах рух парорідинної суміші пригнічує утворення пухирців і знижує внесок складника  $\alpha_n$ . Конвективний складник обумовлений рухом киплячої рідини щодо стінок труб. У зв'язку зі зростанням паровмісту швидкість суміші за її рухом збільшується, що призводить до росту локальних КТВ, поки не починається висихання окремих ділянок труби.

При проектуванні та розрахунковому аналізі роботи суднових змієвикових випарників вини-

кає завдання вибору й удосконалення методики розрахунку коефіцієнта тепловіддачі на стороні холодоагенту. Такі випарники зазвичай складаються з ряду змійовиків, з метою ефективного використання поверхні приймаються заходи для рівномірної подачі холодоагенту в усі змійовики, що забезпечує на виході із зони кипіння однаковий перегрів пари. До розрахунку КТВ на стороні холодоагенту ближче всього підходять залежності, що узагальнюють емпіричні дані щодо кипіння рідини в горизонтальних трубах.

Докладні дослідження процесів кипіння води й інших рідин свідчать, що інтенсивність тепловіддачі неоднорівня за рухом потоку в трубах [6; 7]. Отже, зусилля дослідників були спрямовані на визначення локальних КТВ, які залежать від режимів плинну двофазного потоку. Водночас розроблялися теоретичні моделі процесів кипіння [3; 8]. Визначення локальних КТВ та коефіцієнтів теплопередачі (КТП) при кипінні хладонів у трубах наведені в роботах [9; 10]. Дослідження тепловіддачі при кипінні холодоагентів у мініканалах подано в працях [11–13]. Теплофізичні процеси при кипінні неазеотропних холодоагентів розглядаються в роботі [14].

Через складність процесів кипіння рідин у трубах теоретичні методи розрахунку КТВ та градієнта тиску ще не дають достовірних результатів [3; 8]. Прості формули визначення середнього КТВ й падіння тиску в трубі виявилися неточними. До того ж їх не можна поширити на нові холодоагенти. Існують узагальнені методики (кореляції) для розрахунку локальних КТВ. У них використовуються безрозмірні змінні, які враховують як властивості рідин, так й умови кипіння. Такий підхід, з одного боку, збільшує кількість даних, що узагальнюються, а з іншого боку, ускладнює узагальнення через необхідність обліку термодинамічних і теплофізичних (транспортних) властивостей кожної рідини. Перевагами його є можливість поши-

рення методики на розрахунок КТВ при кипінні різних рідин, включаючи ті процеси кипіння, що ще слабо вивчені. Для холодильної техніки це має вагомий значення у зв'язку з переходом на альтернативні екологічно чисті холодоагенти.

Вплив щільності теплового потоку на показники кипіння холодоагенту відображено на рис. 3 а, б. Зміна КТВ для чотирьох холодоагентів відповідає класичним уявленням про тепловіддачу при пухирцевому кипінні та руху парорідинної суміші в трубах [3]. Плавне підвищення коефіцієнта тепловіддачі в розглянутому діапазоні обумовлено лише інтенсифікацією пухирцевого кипіння, а режим плинну парорідинної суміші залишається ламінарним.

Різниця температур  $t_m - t_{02}$  зі зменшенням  $q$  прагне до нуля. Тому початкові ділянки кривих на рис. 3 б не становлять практичного інтересу. Для R22 та R404A різниця  $t_m - t_{02}$  досягає мінімуму при  $q \approx 2000 \text{ Вт/м}^2$ . Вона прагне до мінімуму для R410 та R290 при  $q > 3600 \text{ Вт/м}^2$ . Перегин кривої для R717 на рис. 3 б не спостерігається, а значення  $t_m - t_{02}$  в розглянутому діапазоні не перевищують  $2^\circ\text{C}$ .

Щільність теплового потоку  $q$  визначається умовами тепловіддачі на зовнішній поверхні труб. Збільшенню її сприяють оребрення труб і різні способи інтенсифікації зовнішньої тепловіддачі.

Збільшення відносної довжини зони кипіння  $\alpha = l_k / d_m$  сприяє зростанню КТВ (рис. 4 а) та падіння тиску  $\sim P_n$ . Тому криві різниці  $t_m - t_{02}$  на рис. 4 б мають плавний перегин. Для чотирьох холодоагентів найменша різниця спостерігається в діапазоні відносних довжин  $\alpha = 1500 - 2000$ . Слабко виражений мінімум різниці температур для R717 спостерігається при  $\alpha \approx 1000$ .

Середній коефіцієнт тепловіддачі  $\alpha_c$  для чотирьох холодоагентів слабо залежить від діаметра труб  $d_m$ , рис. 5 а. Лише для R717 він помітно знижується зі збільшенням діаметра  $d_m$ . Вплив ді-

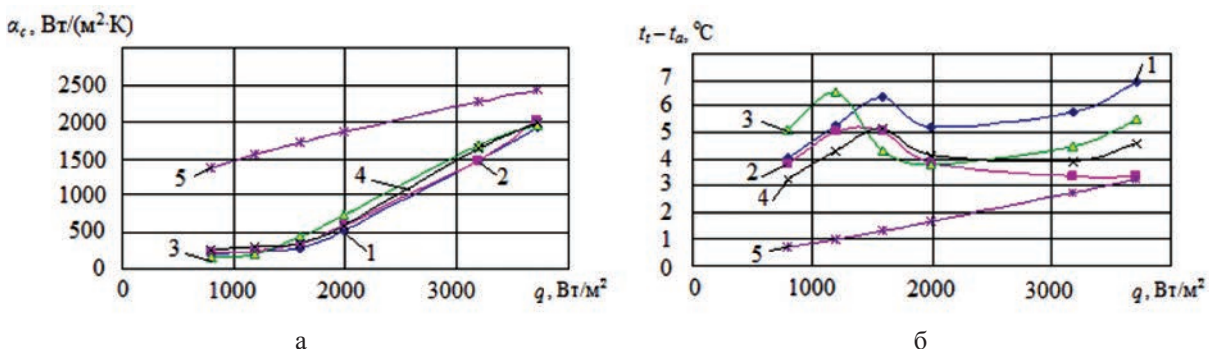


Рис. 3. Вплив щільності вхідного потоку на кипіння парорідинної суміші

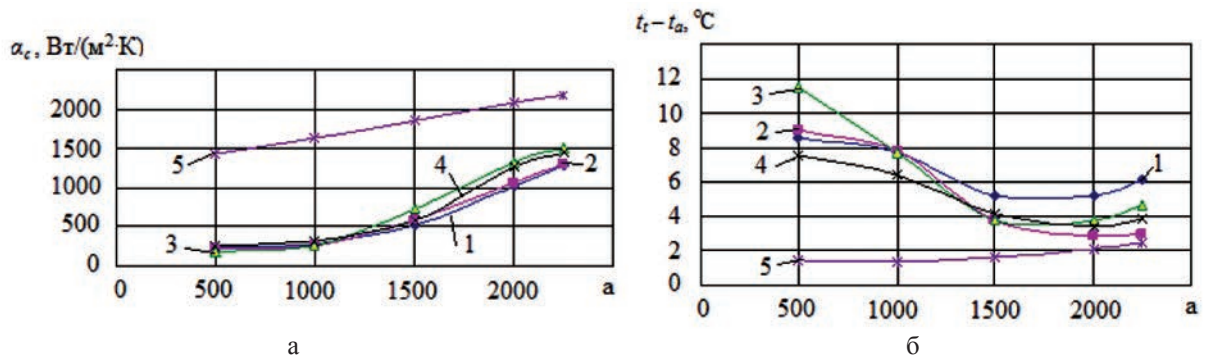


Рис. 4. Вплив відносної довжини труб на кипіння парорідинної суміші

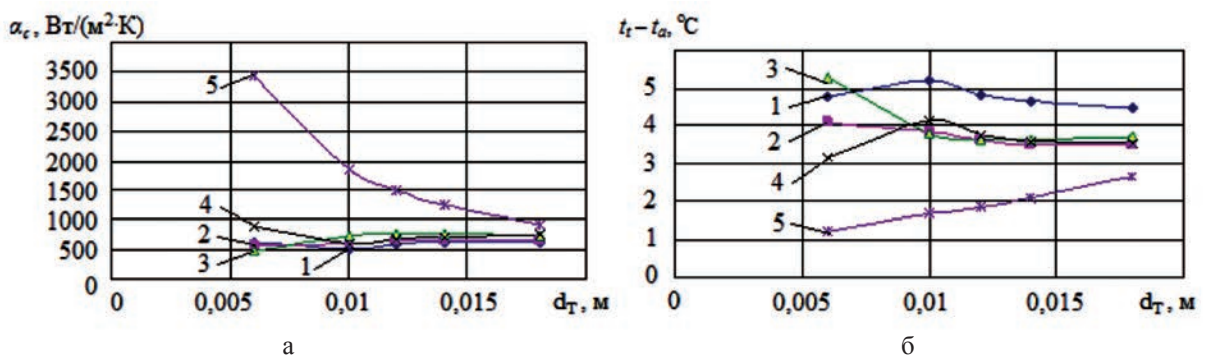


Рис. 5. Вплив внутрішнього діаметру труб на кипіння парорідинної суміші

метра  $d_m$  на різницю  $t_m - t_{02}$  виявляється неоднозначним, особливо при  $d_m < 0,01$  м, рис. 5 б. Лише для R717 збільшення діаметра супроводжується зростанням необоротних утрат.

Як показують наведені приклади, на необоротні втрати так чи інакше впливають усі змінні, включаючи вид холодоагенту.

**Висновки.** За результатами проведеного дослідження визначено шляхи вдосконалення процесів теплообміну в змійовиках ХМ суден. Щільність теплового потоку переважно залежить від умов тепловіддачі на зовнішній стороні труб (виду та швидкості охолоджуваного середовища, виду та ступеня оребрення, температурного напору). При заданому або обраному значенні збільшення швидкості супроводжується ростом коефіцієнта

тепловіддачі на стороні холодоагенту. На жаль, водночас збільшується падіння тиску киплячого потоку. Через це знижуються температура насичення й тиск усмоктування, що знижує ефективність роботи компресора. У кожному конкретному випадку можна підібрати оптимальне значення швидкості, при якому необоротні втрати будуть найменшими.

Обґрунтовано доцільність застосування чисельного методу визначення оптимальних сполучень конструктивних і режимних параметрів змійовикових випарників; виконано підбір оптимальних значень масової швидкості залежно від щільності теплового потоку та підбір оптимальної довжини зони кипіння семи холодоагентів у широкому діапазоні умов їх кипіння.

#### Список літератури:

1. Бараненко А.В. Холодильные машины: учебник. Санкт-Петербург : Политехника, 2006. 944 с.
2. Wojtan L. Investigation of flow boiling in horizontal tubes. Part I – A new diabatic two-phase flow pattern map. *International Journal Heat Mass Transfer*. 2005. Vol. 48. P. 2955–2969.
3. Кутепов А.М. Гидродинамика и теплообмен при парообразовании. Москва : Высшая школа, 1986. 448 с.
4. Гоголин А.А. Интенсификация теплообмена в испарителях холодильных машин / Легкая и пищевая промышленность. Москва, 1982. 224 с.
5. Taitel Y. A model for predicting flow regime transitions in horizontal and near horizontal gas-liquid flow. *AIChE Journal*. 1976. Vol. 22. P. 47–55.
6. Аладьев И.Т. Вопросы физики кипения. *Мир*. 1964. 145 с.
7. Клименко А.В. Теоретические основы теплотехники. Теплотехнический эксперимент : справочник. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 564 с.



8. Лабунцов Д.А. Механика двухфазных систем. Москва : Издательский дом МЭИ, 2007. 384 с.
9. Малышев А.А. Локальные теплогидродинамические характеристики двухфазных потоков хладагентов в горизонтальных трубах / ЛТИХП. Ленинград, 1980. 20 с.
10. Малышев А.А. Теплообмен и гидродинамика двухфазных потоков хладагентов : учебно-методическое пособие. Санкт-Петербург : Университет ИТМО. ИХиБТ, 2016. 116 с.
11. Ховалыг Д.М. Динамика двухфазных потоков при кипении хладагента R134a в миниканалах. *Журнал технической физики*. 2015. Том 85. Вып. 3. С. 34–41.
12. Ховалыг Д.М. Теплоотдача при кипении хладагентов в малых каналах. *Вестник Международной академии холода*. 2013. № 4. С. 3–11.
13. Дедов А.А. Теплообмен и гидродинамика одно- и двухфазных потоков при интенсивном воздействии массовых сил в условиях одностороннего нагрева. Москва : МЭИ (ТУ), 2010. 40 с.
14. Мезенцева Н.Н. Исследование теплофизических процессов в пароконденсационных тепловых насосах, работающих на неазеотропных хладагентах / Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения РАН. Новосибирск, 2016. 23 с.
15. Шуршев В.Ф. Моделирование процессов синтеза состава и теплоотдачи при кипении смесей холодильных агентов / АГТУ. Астрахань, 2006. 36 с.
16. Беляев А.В. Экспериментальное исследование гидродинамики и теплообмена в каналах малого диаметра при высоких приведенных давлениях. Москва : МЭИ, 2017. 152 с.

**Daki O.A., Yakusevych Yu.H., Tryshyn V.V., Liganenko V.V. INCREASING THE ENERGY EFFICIENCY OF MARINE REFRIGERATING MACHINES BY IMPROVING THE PROCESSES OF IN-PIPE BOILING OF REFRIGERANT IN THE EVAPORATOR**

*Refrigerators are used on ships for food storage, comfortable air conditioning. Design and operation of fishing vessels, gas carriers, passenger vessels is impossible without the use of refrigeration machines. Together, the refrigeration machines of modern ships for various purposes consume a significant amount of electricity generated on the ship, so their efficient operation is important. Selection of optimal combinations of design and operating parameters of the refrigerant increases the energy efficiency of marine refrigeration systems. The article substantiates the methods of increasing the energy efficiency of marine refrigeration engines by improving the processes of in-tube boiling of refrigerants in evaporators. The heat flux density mainly depends on the heat transfer conditions on the outside of the pipes (type and speed of the cooled medium, type and degree of finning, temperature pressure). At a given or selected value, the increase in velocity is accompanied by an increase in the heat transfer coefficient on the refrigerant side. Unfortunately, the pressure drop of the boiling stream increases at the same time. This reduces the saturation temperature and suction pressure, which reduces the efficiency of the compressor. In each case, you can choose the optimal value of the speed at which irreversible losses will be the smallest. The expediency of application of the numerical method of determination of optimal combinations of constructive and mode parameters of coil evaporators is substantiated; the selection of optimal values of mass velocity depending on the heat flux density and the selection of the optimal length of the boiling zone of seven refrigerants in a wide range of boiling conditions.*

**Key words:** energy efficiency, heat transfer coefficient, in-tube boiling, ship refrigeration machines, refrigerant.

UDC 627.01

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/36>

**Danylyan A.H.**

Danube Institute  
of National University “Odessa Maritime Academy”

**Tiron-Vorobiova N.B.**

Danube Institute  
of National University “Odessa Maritime Academy”

**Maslov I.Z.**

Danube Institute  
of National University “Odessa Maritime Academy”

**Kulahin E.O.**

Danube Institute  
of National University “Odessa Maritime Academy”

## IDENTIFICATION OF OPTIMIZATION APPROACHES TO THE DEEP HEAT RECOVERY PROCESS OF MARINE DIESEL ENGINES

*The idea of creating steam and gas plants, which use as combustion products of fuel combustion and water vapor, was first expressed by French scientist Sadie Carnot in 1824 in his work “Reflections on the driving force of fire and machines capable of developing this force”. Carnot proposed a scheme of a reciprocating steam-gas plant and substantiated the main condition for the creation of efficient steam-gas plants – the use of fuel combustion products as a working fluid in the field of high temperatures with simultaneous utilization of waste heat gases to obtain working steam. With the development of steam and gas turbines, it became possible to put this idea into practice. The study of modern heat recovery power plants of ships of the merchant marine of the World in this article is presented. Using modern scientific achievements in the areas of the possible use of low-temperature heat in hydro-steam turbines HST, Professor V.A. Zysin made specific proposals in relation to the merchant marine of the world.*

*Identified priority areas for more electricity from waste heat recovery are presented: the further steps with a view to improving the deeper heat recovery power plants vessel.*

*It is proposed for the first time, to use the heat of the inner loop of the ship’s main engine for improvement using nanotechnology HST. The study presents global analogs of savings. It is proved that the choice of the optimal solution must be approached comprehensively, considering all the components. The work presents the principle of action HST of V. Zysin, characteristics are given that optimally distinguish it from other analogs.*

*In addition, the study proposes a uniquely effective approach to the process of deep heat recovery of marine diesel engines, developed by scientists of the Danube Institute of National University “Odessa Maritime Academy”, which is versatile because it is suitable for use in different latitudes. A thermal column was developed and improved.*

**Key words:** *merchant marine fleet, utilization of waste heat gases, the main power plant, the auxiliary steam turbine generator, an auxiliary gas turbine exhaust gas, hydro-steam turbine, low-temperature heat, utilization boiler.*

**Introduction.** At the present stage, the problem of energy efficiency requires more and more attention. This is due to a significant increase in the price of energy and increased concern for the environment.

This issue is very relevant. So, the work of V. Kiris is devoted to considering trends in increasing the energy efficiency of transport. After all, it is transport that represents the region with the highest fuel and energy consumption, which means this issue requires special attention [1].

A. Solovyov, M. Chirkova, N. Popov study ways to increase the efficiency of ship power plants.

Emphasis is placed on the reasons for the insufficient use of secondary energy resources on ships, primarily the lack of automated control systems for integrated heat recovery systems, which leads to a decrease in its economic efficiency [2].

The study by A. Volyncev, A. Sobolenko reveals the potential use of a heat pump and a heat exchanger in a ship’s heating system. The principle of operation of a heat pump unit utilizing low-potential secondary heat resources of the main engine is characterized [3]. The article by V. Vedruchenko and V. Krainov proves

the feasibility of using contact heat exchangers instead of generally accepted surface heat exchangers for utilization of charge air heat [4].

A. Danylyan, V. Chymshyr, I. Vlasov, A. Naydyonov are convinced that traditional approaches to the utilization of heat recovery do not allow the use of this heat in the form of a steam-water mixture on the line: consumers are the condenser of the steam boiler. The authors analyze ways to improve the hydro-steam turbine in order to more deeply utilize the heat of the ship's power plants [5].

A method of utilizing the heat of exhaust gases from the main diesel engines of a ship of Project 630.2 Kazan City in a thermoelectric generator is presented in development by S. Vinogradov, K. Halykov, K.D. Nguyen [6]. The authors are sure that the use of thermoelectric generators that operate based on the energy of the heat of the exhaust gases of a diesel engine is an effective method of increasing the efficiency of heat use in ship power plants (SPP).

**The aim of the article** is to determine, based on analysis of specialized scientific literature, the most effective approaches to the process of deep heat recovery of marine diesel engines.

**Materials and methods.** Expenditures for the operation of power plants of marine vessels account for 70–80% of total costs [1]. Based on this, improving energy efficiency SPP is of great importance. It is advisable to recall that energy efficiency is understood to mean the rational use of energy or the use of less energy to ensure a specified level of product production during production processes. Utilization of the secondary heat resources of the ship's main engine is traditionally one of the main technologies for improving the integrated use of fuel for ship power plants.

Specialists according to the classification of heat recovery systems (HRS) distinguish them on the basis of such signs: the kind of source of secondary heat; kind of coolant; destination; type of recycling equipment; depths of heat recovery [2].

We agree with the opinion of V. Kiris that at the present stage, waste heat recovery systems are becoming increasingly complex. In the best systems, the efficiency of using waste heat reaches 60% due to the use of more efficient utilization boilers, heating of feed water, utilization of turbine generators of two pressures, etc. At present, there are several ways to utilize heat: utilization of exhaust gas energy, utilization of the heat of the coolant, utilization of the heat of the engine oil [1].

The analysis of the reasons for the insufficient use of secondary energy resources on ships is complex, and the main reasons can be called the following:

- designers, customers, and ship owners do not pay appropriate attention to this area, because they are not ready to evaluate all the advantages of HRS and integrated heat recovery systems (IHRS);

- the customer, when building the vessel, focuses on minimizing capital investments without calculating operating costs, including not considering the possible savings in the fuel used for heating and hot water supply;

- operators are skeptical of HRS, as the number of serviced systems is increasing, and undesirable phenomena associated with the quality of the feed water accompany steam utilization systems;

- lack of automated control systems IHRS, which leads to a decrease in economic efficiency IHRS and the difficulties of integrating into a management system SPP [2].

A sufficiently effective way to increase the level of use of energy received in the engine during fuel combustion is to utilize the heat of the exhaust gases, charge air, and freshwater engine cooling systems. V. Vedruchenko, V. Krainov note that the use of an evaporative method for cooling charge air allows the energy expended to compress air to be completely returned to the engine cycle. In addition, the use of contact air coolers in modern highly efficient diesel engines with increased pressurization by 10% increases their efficiency compared to cooling in traditional surface charge air coolers. In this way, the possibilities of utilizing the heat of each source are determined by the boost and power of the engines that make up the diesel power plant and the heat and electric energy needs of the diesel vehicle or other consumer [4].

A. Volyncev, A. Sobolenko determine the most preferable source of the utilization of the heat resources of the main marine engine for the operation of the heat pump installation is freshwater, cooling the skirts of the cylinders of the main engine, having a temperature at the exit of the diesel engine of 80–85°C [3]. In general, the introduction of heat pump heat and cold supply systems is a very effective energy conservation policy tool for fishing and navy vessels, which allows not only to save energy resources for consumers but also to reduce the load on the ship's centralized energy-saving system, as well as reduce emissions of traditional organic combustion products into the atmosphere fuel.

The following development is also of interest. Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (MHI) offers a super-waste heat recovery system for the main marine power plant (MMPP) as a solution to strengthen environmental restrictions and increase demand for improved fuel oil consumption. Its

essence is as follows. In a conventional combined system in which the exhaust gas from the main diesel engine is used in an exhaust gas economizer and in a steam turbine generation system, all exhaust gas from a diesel engine passes through a turbocharger. This super-waste heat recovery system consists of a conventional combined system and a power turbine (gas turbine), which uses a portion of the exhaust gas with an automatic overrunning clutch between the power turbine and the steam turbine [7].

**Results and discussion.** The working thermal scheme proposed by A. Danylyan, V. Chymshyr, I. Vlasov, and A. Naydyonov for the deep utilization of low-temperature heat by its own versatility is able to satisfy all the ship's operating modes in various latitudes of the World Ocean.

The main marine engine has exhaust gases after the gas turbine boost GTB with parameters of 320–340°C in the nominal power mode, transferring them to a combined steam boiler, which operates autonomously on diesel fuel, and as a waste boiler, it works from exhaust gases GTB main engine. The steam received in the steam boiler goes to the distributor of ship consumers. All ship consumers have varying degrees of thermal use of steam with parameters of 260–280°C. The largest heat consumers on board are steam heaters for heavy fuel storage tanks, whose viscosity at 50°C is 335 centistokes (cSt) [5].

This thermal scheme allows you to work in any latitude of the vessel. A system is provided for operation HST from the internal circuit of the engine, having previously closed the collector of the exhaust steam and starting the consumption of the coolant from the main engine in its nominal operating mode. The coolant in this mode is the water of the internal engine cooling circuit with parameters 85–95°C [3]. Due to the versatility of the scheme, you can use a marine combined auxiliary boiler with autonomous fuel combustion to maintain the desired temperature in the cooling circuit of the main engine for efficient operation HST [5]. Using a thermostatic valve, you can raise and lower the temperature of the internal cooling circuit of the main engine.

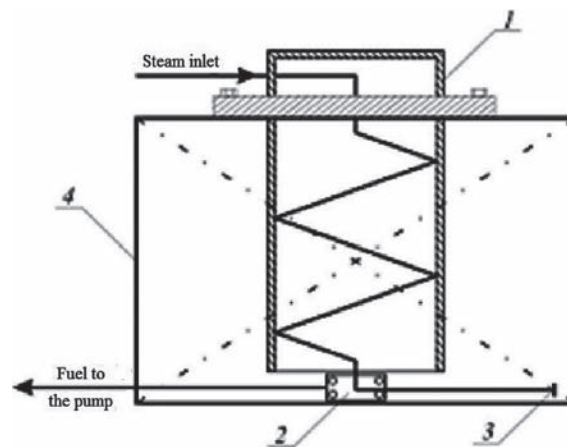
When working in mid-temperate climatic latitudes, the return of the steam-water mixture will be 130–115°C, which can be successfully used in HST. In the northern latitudes, in the context of increasing steam consumption and the need to maintain the heat balance of the entire thermal circuit in the proposed scheme, it will be sufficient to open the distributor valve and pass more heat through the remote-control valve to the heat exchanger. This will simultaneously increase the temperature of the

condenser. HST and a warm boiler box will increase the temperature regime of the auxiliary combined boiler and the entire thermal circuit [5]. This operating mode can be used with an autonomous fuel combustion system of the boiler.

In order to maximize the use of low-temperature heat, it is proposed to mount a thermal column with a coil with a high degree of heat removal into the fuel storage tank. It heats up to the desired temperature only the amount of fuel that will be used by the main engine and diesel generators. The remaining volume of fuel in the storage tank will be heated to a lower temperature.

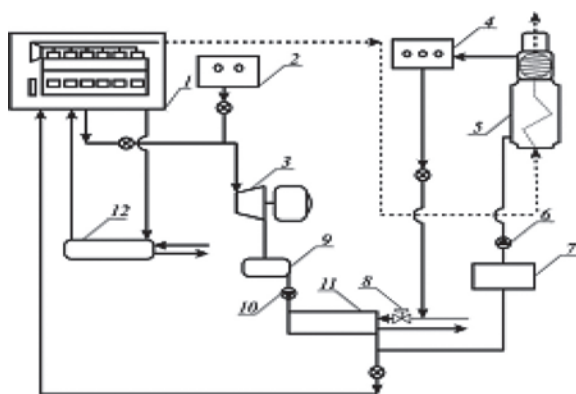
The use of traditional heating of heavy fuel storage tanks is carried out by coils along the entire bottom of the fuel tank, which is extremely impractical – this leads to large heat losses and a decrease in the return steam temperature.

The heat column must be sized considering the capacity of the fuel transfer pump to guarantee the supply of fuel to the separators. It will also be provided with automated control of the coolant supply to the column heater and the fuel tank coil. The heat supply will be controlled by an electronic control unit using remote thermostatic valves – capable of differentiating heat with great accuracy between the heat column and the bottom coils of the ship's fuel tanks [5].



**Fig. 1. Heat column of the heavy fuel storage tank:**  
 1 – column body; 2 – fuel receiving Steiner;  
 3 – coil for heating the bottom of the fuel storage tank;  
 4 – heavy fuel storage tank

Thus, the heat column is a unique development of the team of authors: A. Danylyan, V. Chymshyr, I. Vlasov, A. Naydyonov, which is really capable of qualitatively optimizing the heating of heavy fuel in its storage tanks. The result is a significant increase in the efficiency of the thermal scheme for utilizing low-temperature heat and real cost savings.



**Fig. 2. Ship thermal scheme for the deep utilization of low temperature heat: 1 – main engine; 2 – a collection of spent steam; 3 – GPT with a power generator; 4 – working steam to the consumer distributor; 5 – combined steam boiler; 6 – boiler feed pump; 7 – warm boiler box; 8 – remote thermostatic valve; 9 – GPT capacitor; 10 – condenser pump with an ejector; 11 – heat exchanger (cooler); 12 – cooler of the internal circuit of the main engine**

HST works on the principle of a Segner wheel, which is distinguished by the simplicity of the circuit and design. In work, HST two main physical phenomena are realized. The first is rotation HST due to the action of reactive forces (moments) of the jets of the resulting two-phase mixture. The second is the formation of a two-phase mixture in a stream of water not heated to saturation when the pressure of hot water in the stream drops to the pressure of saturated vapor. It is the phenomenon of vaporization of water in the stream that allows in installation with HST. It is useful to utilize the enthalpy stored in heated water by generating electricity using an electric generator located on the turbine shaft. When developing hydro-steam turbines, the action of inertial forces (centrifugal and Coriolis forces) should be considered, which, depending on the configuration of the radial channel, can have both positive and negative effects on the torque of the turbine. For the useful use of Coriolis and centrifugal forces, a turbine with a radial channel, described by the helix equation with a change in the direction of movement of the working fluid, is proposed.

The basis of this technical solution is the task of improving a jet turbine, in which a rectilinear radial section of the channel is made in the form of a cylinder, in which a closed screw channel is placed. A jet turbine contains a rotor with channels for supplying a working fluid to nozzles connected to a cavity located on the turbine shaft. The channel contains a rectilinear radial section made in the form of a cylinder, in which a helical channel is located, consisting of alternating lifting and lowering arc

channels. The conjugation points of the arc channels between themselves are on opposite sides of the cylinder while being offset relative to each other by the value of the nominal pitch. The last lowering arc channel is offset from the previous one by a step that differs from the nominal one and is connected to the diametrical channel.

The turbine works as follows: a working fluid (water, steam, gas), passing successively through alternating lifting and lowering channels creates a Coriolis force concentrated in the middle of each arc lowering channel, which occurs when there is a flow velocity and a peripheral speed of rotation of the turbine, the projection of which creates torque and in the middle of each lifting channel the braking torque of the turbine, which, basically, cancel each other, significantly reducing the negative impact of the aforementioned force on the torque of the turbine. In addition, in the places where alternating lifting and lowering channels are interconnected, which are at the maximum and minimum distances from the longitudinal axis of the turbine shaft, additional centrifugal forces arise, directed in opposite directions, the projections of which result in additional torque coinciding with the main torque of the turbine, created by the reactive force of the two-phase jet flowing out of the nozzle and the eccentric centrifugal force created by the flow of the working fluid in the center of the curved section. As a result, the total torque of the turbine and, consequently, its power increase. Calculation of the flow of the working fluid in a 3-dimensional spatial spiral channel presents great difficulties, therefore one has to resort to simplifying representations, one of which is a mathematical description of the expansion of a spiral channel with linear approximation. Each turn consists of two branches, the lifting and lowering, the angle of the helix is denoted by  $\alpha$ , descent angle –  $\beta$  (projections of the angles of the lifting and lowering branches to the  $x_0y$  plane, respectively, are depicted on the scan). The angle of descent of the lower branch of the last turn is denoted by  $\theta_1$ , the offset of this section is necessary to prevent the intersection of the diametric channel connecting the lower branch of the last turn of the screw channel and the additional curved channel with the previous turn. The scan shows characteristic points marking the beginning, completion, and middle of each turn and half-turn of the helical channel. Inertial forces (centrifugal  $F_{cf}$  and Coriolis  $F_{cor}$ ) and components of these forces  $F_{cf}$  and  $F_{cor}$  acting in or against the direction of motion of the turbine rotor and creating torque or braking moments are indicated at characteristic points [8, 9].

Heat exchangers, in which the heating medium is superheated steam, and the heated water, are described by the heat balance equation:

$$G_n \cdot (in_1 - in_2) \cdot \eta ma = G_b \cdot c_b \cdot (tb_2 - tb_1), \quad (1)$$

where:  $G_n$  is the steam flow rate, kg/s,  
 $in_1, in_2$  – vapor enthalpy at the inlet and outlet of the apparatus, J/kg,  
 $\eta ma$  – coefficient of performance (CP) of the heat exchanger,  
 $G_b$  is the consumption of heated water, kg/s,  
 $c_b$  – specific heat of water, J/kg deg,  
 $tb_1, tb_2$  – initial and final water temperature, °C.

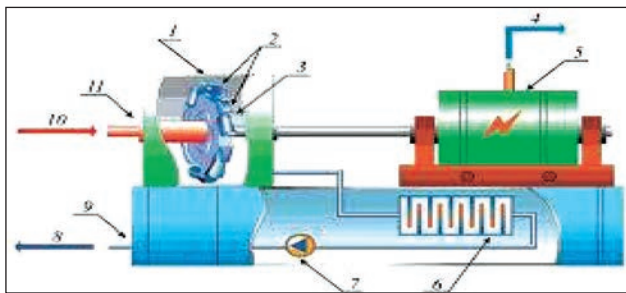
It is assumed that the heating medium at the outlet of the heat exchangers is a condensate with a temperature equal to the saturation temperature at the pressure of the heating steam in the apparatus. The system of regenerative heating of feed water includes deaerators, and the deaerators themselves are nodes for mixing water and steam flows. The heat balance equation for these devices can be written as:

$$G_n \cdot i_n \cdot \eta da + \Sigma G_j \cdot i_j = 0, \quad (2)$$

where:  $\eta da$  – CP of the deaerator considering heat loss to the environment,

$G_j, i_j$  are the flow rate and enthalpy of water and steam flows entering or leaving the deaerator along the  $j$ th branches, kg/s and J/kg, respectively (Dyakun and Kozar, 2013).

V. Zysin, in his book Combined Cycle Units and Cycles, notes that the realization of an optimal triangular cycle is possible only in an engine capable of “working on a dropping liquid boiling during expansion”. The flow of such fluid to the blades of a turbine wheel from a fixed nozzle is inefficient since the channel for the movement of a two-phase flow in such structures inevitably turns out to be curved,



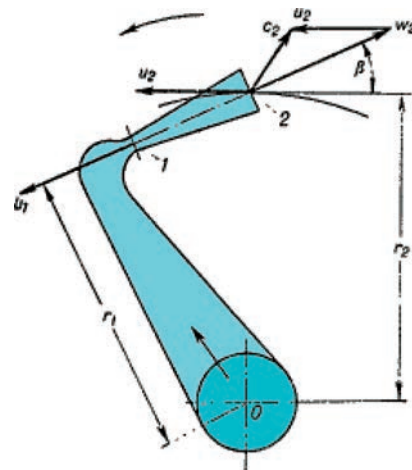
**Fig. 3. Model GPT V. A. Zysin to generate electricity from low temperature heat: 1 – hydro-steam turbine; 2 – Laval nozzle; 3 – volumetric boiling creates a steam-water jet that rotates the generator rotor; 4 – electricity; 5 – electric generator; 6 – boiler-condenser; 7 – condenser pump; 8 – to the network; 9 – spent steam is condensed and returned to the network; 10 – hot water; 11 – hot water is supplied through channels on the rotor to the casing with low pressure**

which causes irreversible losses and causes wear to streamlined surfaces.

An alternative was a jet turbine with rotating Laval nozzles, from which a boiling stream of superheated water flows. This flow creates a jet thrust that accelerates the nozzle and spins the turbine.

At the same time, V. Zysin draws attention to the need to observe the following conditions: the process of vaporization should be carried out only in the expanding part of the Laval nozzle; to a minimum nozzle cross-section, the pressure and shape of the flow channel must be such that there is neither cavitation nor vaporization at local pressure drops; behind the Laval nozzle, a two-phase supersonic flow should not meet moving parts subject to wear.

Thus, superheated water must enter the turbine rotor through the hollow shaft and move first along its axis, and then to the nozzles on the periphery. The thermodynamic process taking place in such an installation is a variation of the classical process for heat engines.



**Fig. 4. The decomposition of the forces of the coolant in the nozzle apparatus of a hydro-steam turbine**

In Fig. 4, the coolant entering the nozzle apparatus is decomposed into vectors of fluid flow and rotor disk, where  $C_2$  is the vector of the absolute flow velocity;  $U_2$  is the vector of the peripheral flow velocity;  $W_1$  is the vector of the relative flow rate;  $W_2$  is a vector of actual flow rate;  $U_1$  is the vector of the peripheral speed of the rotor disk;  $R_1$  is the distance from the inlet of the working fluid of the nozzle apparatus to its outlet;  $R_2$  is the length from the inlet of the working fluid to the convergent nozzle;  $\beta$  is the angle formed by the axis of the vector  $U_2$  and the vector  $W_2$ .

The working fluid flow, entering the rotor shaft channel, passes into the disk nozzles, where, passing the nozzle curvature with minimal resistance, it is directed to its tip [5]. The flow rate of the working

fluid significantly increases in the converging part of the Laval nozzle, which, already with the transition to the expanding part, makes it possible for the working fluid to turn into steam, creating all the conditions for obtaining the rotating moment of the rotor shaft. distance from the inlet of the working fluid of the nozzle apparatus to its outlet.

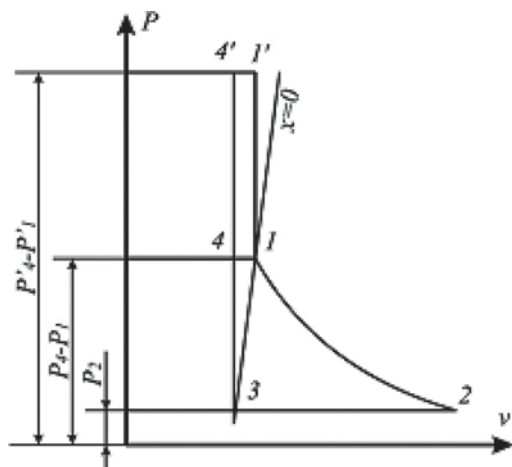


Fig. 5. GPT turbine thermodynamic cycle

Section 1'→1 corresponds to the narrowing part of the Laval nozzle (pressure drop during flow acceleration due to narrowing of the channel section in accordance with Bernoulli law), and section 1→2

– to its expanding part, where intense vaporization occurs, in section 2→3 condensation of the generated steam, section 3→4 – is an increase in water pressure and its overheating in front of the turbine rotor to a state close to the equilibrium between steam and liquid (while maintaining the liquid state of aggregation), section 4→4'.

Thus, all the useful work of the turbine is carried out due to the external energy spent on increasing the pressure and heating the water in section 3→4. In general, V. Zysin estimates “possible CP” at 40–50% and notes that in this case, it will be a “promising element of electricity production schemes”.

The main marine engine with an efficiency of 50% has exhaust gases after the pressurized gas turbine GTN with parameters 320–340°C in the nominal power mode, transferring them to a combined steam boiler, which operates autonomously on diesel fuel, and as a waste boiler operates from the exhaust gases of the GTN of the main engine. The resulting steam in the steam boiler goes to the ship's consumer distributor. All ship consumers have varying degrees of thermal utilization of steam with parameters 260–280°C. The

largest consumer of heat on a ship is the steam heaters of heavy fuel storage tanks, the viscosity of which at 50°C is 335 cSt. Therefore, in different latitudes of navigation, there will be different heat consumption for heating heavy fuel in storage tanks. Working in the middle temperate climatic latitudes, the return of the steam-water mixture will be 130–115°C, which can be used in the gas turbine engine. Imagine the standard power of the main marine engine, which is 13.200 kW. Taking into account the efficiency of the engine, which is 50% and the fact that the remaining 50% (about 6500 kW) is spent on heating fuel, oil, water, as well as heat radiation and exhaust, from the steam-water mixture returned after heating consumers, we will get about 20% from unused heat (1300 kW), which, if we take into account the efficiency of the gas turbine generator, 40% will mean that we will save about 500 kW of unused heat.

Effective efficiency of the hydro-steam turbine:

$$\eta_e = N_e / Q = \eta_i \eta_m = \eta_i \eta_{re}, \quad (3)$$

where:  $N_e$  is the effective power developed by the turbine on the coupling

connecting the turbo shaft bins with the shaft of the driven machine,

$Q$  is the consumed heat, J,

$\eta_i$  is the absolute internal efficiency,

$\eta_m$  is the mechanical efficiency,

$\eta_i$  is the thermal efficiency,

$\eta_{re}$  is the relative effective efficiency.

Effective efficiency of the main marine engine:

$$\eta_e = A \cdot L_e / Q_1, \quad (4)$$

where:  $L_e$  is the efficient work done per cycle,

$A$  is the effective work,

$Q_1$  is the amount of heat received from the heater,

J.

**Conclusions.** Thus, the problem of finding approaches to the process of deep heat recovery of marine diesel engines is very relevant in modern realities. The study presents global analogs of savings. It is proved that the choice of the optimal solution must be approached comprehensively, considering all the components. The work presents the principle of action HST of V. Zysin, characteristics are given that optimally distinguish it from other analogs. In addition, the study proposed a unique option developed by the team of Danube Institute of National University “Odessa Maritime Academy”, which is distinguished by its versatility, because Suitable for use in various latitudes. A thermal column was developed.

#### References:

1. Кіріс В.А. Тенденції енергоефективності на транспорті. *Морські електростанції*. 2014. № 34. С. 145–154.

2. Соловйов А.В., Чиркова М.М., Попов Н.Ф. Підвищення ефективності роботи морських електростанцій. *Вісник Астраханського державного технічного університету. Серія «Морська інженерія та технології»*. 2018. № 4. С. 101–106.
3. Волинцев А.В., Соболенко А.Н. Використання теплових ресурсів головного суднового двигуна за допомогою теплового насосного агрегату. *Вісник Державного університету морського та річкового флоту імені адмірала С.О. Макарова*. 2016. № 5 (39). С. 144–150.
4. Ведрученко В.Р., Крайнов В.В. Вибір типу охолоджувача повітря для утилізації втрат тепла на дизельних електростанціях. *Омський науковий вісник*. 2007. № 1 (52). С. 97–102.
5. Нові напрями глибокої рекуперації тепла морських дизельних двигунів / А.Г. Данилян, В.І. Чимшир, І.В. Власов, А.І. Найдъонов. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2016. № 3 (49). С. 91–103.
6. Виноградов С.В., Галиков К.Р., Нгуен К.Д. Застосування термоелектричних генераторів як засіб утилізації відпрацьованого тепла морських дизельних двигунів. *Вісник Астраханського державного технічного університету. Серія «Морська інженерія та технології»*. 2011. № 3. С. 78–83.
7. Розробка системи утилізації супервідходів та теплоти для морських дизельних двигунів / Ю. Ічікі, К. Ширайші, Т. Канабосі, Ю. Оно. *Технічний огляд Mitsubishi Heavy Industries*. 2011. № 48 (1). С. 17–21.
8. Булат А.Ф., Чемерис І.Ф., Пімоненко Д.Н. Теоретичні основи розробки гідро-парової турбіни з попереми́ним рухом робочої рідини для утилізації надлишкового низькосортного тепла. *Геотехнічна механіка : міжвідомчий збірник наукових праць*. 2012. Вип. 97. С. 294–299.
9. Дякун І.Л., Козар І.Ю. Енергоефективність схем когенерації шахтного енергетичного комплексу. *Геотехнічна механіка*. 2013. № 110. С. 70–79.

#### **Данилян А.Г., Тірон-Воробйова Н.Б., Маслов І.З., Кулагін Е.О. ІДЕНТИФІКАЦІЯ ОПТИМІЗАЦІЙНИХ ПІДХОДІВ ДО ПРОЦЕСУ ГЛИБОКОЇ РЕКУПЕРАЦІЇ ТЕПЛА СУДНОВИХ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ**

*Ідея створення парогазових установок, які використовують як робочі тіла продукти згорання палива й водяний пар, уперше висловлена французьким ученим Саді Карно ще в 1824 році в праці «Роздуми про рушійну силу вогню і про машини, здатні розвивати цю силу». С. Карно запропонував схему поршневої парогазової установки й обґрунтував основну умову створення ефективних парогазових установок – використання продуктів згорання палива як робочого тіла в галузі високих температур з одночасною утилізацією скиданої теплоти газів для отримання робочої пари. У міру розвитку парових і газових турбін виявилось можливим практичне здійснення цієї ідеї. У статті представлено дослідження сучасних теплоенергетичних електростанцій суден торгового флоту світу. Використовуючи сучасні наукові досягнення в галузях можливого використання низькотемпературного тепла в гідропарових турбінах (ГПТ), професор В. Зисін зробив конкретні пропозиції щодо торгового морського флоту світу.*

*Метою статті є представити визначені пріоритетні напрями отримання більшої кількості електроенергії за рахунок рекуперації відпрацьованого тепла: подальші кроки з метою вдосконалення більш глибокого рекупераційного теплового судна.*

*Уперше пропонується використовувати тепло внутрішньої петлі головного двигуна корабля для вдосконалення з використанням нанотехнологій ГПТ. У дослідженні представлено глобальні аналоги заощаджень. Доведено, що до вибору оптимального рішення варто підходити комплексно, урахувавши всі компоненти. Представлено принцип дії ГПТ В. Зисіна, наведено характеристики, які оптимально відрізняють його від інших аналогів.*

*Крім того, запропоновано унікальний ефективний підхід до процесу глибокої рекуперації тепла морських дизельних двигунів, розроблений науковцями Дунайського інституту Національного університету «Одеської морської академії», який відрізняється своєю універсальністю, оскільки підходить для використання в різних широтах. Розроблено й удосконалено теплову колону.*

**Ключові слова:** *торгівельний морський флот, утилізація відпрацьованих теплових газів, головна енергетична установка, допоміжний паротурбінний генератор, вихлопний газ допоміжної газової турбіни, гідропарова турбіна, низькотемпературне тепло, утилізаційний котел.*



**Кужелович В.І.**

Національна академія Національної гвардії України

**Мельніков С.М.**

Національна академія Національної гвардії України

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ВІДНОВЛЕННЯ АВТОБРОНЕТАНКОВОЇ ТЕХНІКИ УГРУПОВАНЬ ВІЙСЬК (СИЛ) ЗБРОЙНИХ СИЛ УКРАЇНИ

*У роботі обґрунтована актуальність визначення показника ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України. Для успішного рішення службово-бойових завдань необхідно максимально використовувати можливості системи відновлення автобронетанкової техніки й оцінювати ефективність її ремонту. Нині для оцінювання стану системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України застосовуються спеціальні показники, які являють собою числове вираження вимірників або їх відношення. Наявні методики прогнозування кількісної оцінки показника ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України мають потребу в подальшому вдосконаленні. Система відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України – це сукупність взаємопов'язаних засобів технічної розвідки, евакуації, ремонту техніки, виконавців і документації, взаємодія яких відбувається відповідно до завдань усіх передбачених видів ремонту автобронетанкової техніки [1].*

*У статті розглянута методика оцінювання ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України за ймовірністю задоволення потреби в ремонті, тривалості перебування в неробочому стані, а також живучості системи. Запропоновано як показник ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України, використовувати комплексний показник – узагальнений коефіцієнт ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ (сил) Збройних сил України.*

**Ключові слова:** система відновлення, автобронетанкова техніка, показники ефективності, коефіцієнт оперативної готовності, коефіцієнт готовності системи відновлення, коефіцієнт боєздатності, коефіцієнт живучості системи відновлення, коефіцієнт оперативної готовності засобів евакуації.

**Постановка проблеми.** Автобронетанкова техніка (далі – АБТ) є основним засобом, який забезпечує оперативну й тактичну рухомість угруповань військ (сил) Збройних сил України (далі – ЗСУ), можливість ведення бою та операції у високих темпах. Характер та умови ведення сучасних бойових дій значно підвищили актуальність проблеми підтримання необхідної кількості боєздатних зразків АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ. Гостро стоїть питання про скорочення строків ремонту АБТ, підвищення ефективності проведення евакуації бойових машин з поля бою в умовах дії вогню противника, а також проведення їхнього ремонту в польових умовах.

У ЗСУ існує система ремонту при якій поточний ремонт проводиться за необхідності, яку виявлено в процесі технічного обслуговування або в разі виходу АБТ із ладу в період експлуатації;

середній і капітальний ремонт планується згідно з установленими міжремонтними ресурсами, а фактична потреба в ремонті встановлюється залежно від технічного стану АБТ [1].

Отже проблема відновлення АБТ під час здійснення угрупованням військ (сил) ЗСУ маршів, підготовки й ведення бойових дій, оскільки в результаті виконання поставлених бойових завдань та інтенсивної експлуатації зростає кількість поломок, несправностей і відмов, а значна частина агрегатів може отримати бойові пошкодження від вогневого ураження, на сьогодні є актуальною, а оцінка ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ необхідною умовою ефективного управління технічним забезпеченням під час бойових дій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Проблема оцінки ефективності системи відновлення

АБТ присвячена велика кількість публікацій. Описані методи основних розрахунків при плануванні технічного забезпечення бойових дій, організації технічного забезпечення [2; 7; 10]. Типовий алгоритм дій заступника командира з озброєння під час планування технічного забезпечення бойових дій наведені в роботах [7; 9; 11].

З наукової літератури відомо, що ефективність – це найбільш загальна, визначальна властивість будь-якої цілеспрямованої діяльності, що розкривається через категорію мети й об'єктивно виражається ступенем її досягнення з урахуванням витрат ресурсів і часу [8].

Науковою основою досліджень оцінки рівня системи відновлення автобронетанкової техніки є: теорія ефективності застосування військових ремонтних органів, технічна експлуатація машин, теорія надійності виробів техніки, теорія ймовірностей і математична статистика [4–6]. Основні залежності, які використовуються при визначенні рівня ефективності системи відновлення АБТ, наведені в роботах [7–8]. Пропозиції з оцінки показників ефективності застосування та готовності сучасних засобів ремонту техніки наведені в роботах [5]. У роботах [10; 11] проведений аналіз умов використання моделей ефективності систем відновлення АБТ і шляхи підвищення ефективності використання техніки підрозділами ЗСУ [13; 14].

Показники ефективності повинні забезпечувати: повноту інформації, що міститься в них; однозначність кількісного вираження; чутливість до експлуатаційних факторів; простоту використання та визначення з мінімальними витратами засобів і часу; наочність та ясний фізичний зміст [5; 6; 14].

**Постановка завдання.** Накопичений досвід організації та здійснення експлуатації та відновлення АБТ у військах ЗСУ дозволив виявити такі основні проблемні питання:

- 1) моральне й фізичне старіння парку АБТ;
- 2) тенденція зниження показників справності парку АБТ;
- 3) підвищення рівня складності сучасних АБТ;
- 4) зниження виробничих можливостей ремонтно-відновлювальних органів;
- 5) скорочення обсягів і кількості відремонтованої АБТ;
- 6) вичерпання запасів стійкості системи експлуатації та ремонту для виконання поточних і планованих завдань;
- 7) зниження обсягів обмінних фондів вузлів та агрегатів;
- 8) зниження рівня навченості особового складу;

9) неузгодженість необхідних заходів щодо забезпечення експлуатації та відновлення АБТ із фактичними можливостями військ;

10) ресурсні обмеження на фінансування експлуатації та відновлення АБТ.

Система відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ являє собою фізичну систему, яка з плином часу може змінювати свій стан під впливом різних збурень. Головним з цих збурень є бойовий вплив противника на елементи системи. Тому, щоб система відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ зберегла свою працездатність, необхідно постійно здійснювати заходи, що зменшують вплив цих збурень. Такі заходи повинні здійснюватися завчасно в мирний час і в ході ведення бойових дій угрупованням військ (сил) ЗСУ.

Ефективність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ – здатність такої системи в умовах воєнного і мирного часу забезпечувати при мінімальних витратах боєздатність АБТ не нижче заданого рівня.

Натепер у зв'язку з оптимізацією ЗСУ удосконалюється організаційно-штатна структура військових частин, в тому числі й по відновленню АБТ. На такому етапі розвитку системи технічного забезпечення ЗСУ необхідно досліджувати і оцінювати ефективність створюваної системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

Запропонована методика оцінки ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ дозволить встановити, наскільки вона забезпечує вирішення головного завдання – своєчасне відновлення АБТ і підтримання їх в стані боєготовності. Під час вирішення цього завдання необхідно, перш за все, з'ясувати: чи повністю задовольняється потреба військ угруповання в ремонті АБТ; як довго через ремонт АБТ простоюють в неробочому стані; які розміри витрат на здійснення ремонту АБТ; чи здатна система відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ зберігати свою працездатність в різних умовах військової обстановки.

Мірою ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ є критерії, що дозволяють оцінити, як досліджувана система задовольняє пред'явленим до ній вимогам, тобто кількісно оцінити ступінь її ефективності. Критерії повинні: бути критичними до змінних параметрів системи, забезпечувати об'єктивну кількісну оцінку основних її характеристик, мати фізичне обґрунтування та бути досить простими для проведення математичних операцій.

Тому виникла проблема у необхідності розробки показника, що дозволить офіцерам техніч-

ної служби оцінити стан системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ й очікувану ефективність застосування її в умовах ведення бойових дій.

Для вирішення поставленого наукового завдання відповідно до його структури авторами запропонований узагальнений алгоритм оцінки ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

**Мета статті** – розробка методики визначення ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ Національної гвардії України.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Основним завданням системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ є своєчасне і повне відновлення несправної АБТ (як з технічних причин, так і від бойових пошкоджень). Система відновлення АБТ буде прямо залежати: від технічної та спеціальної підготовки особового складу; експлуатації АБТ; ведення технічної розвідки АБТ; евакуації АБТ; забезпечення бронетанковим майном (далі – БТМ); захисту, охорони і оборони органів технічного забезпечення (далі – ТхЗ), а також від управління ТхЗ. Боеготовність угруповань військ (сил) ЗСУ буде знаходитися в прямій залежності від того, наскільки своєчасно і повно будуть проводитися технічне обслуговування і ремонт АБТ.

За інших рівних можливостях боеготовність угруповань військ (сил) ЗСУ буде тим вище, чим вище буде рівень технічного стану АБТ. Імовірність задоволення потреби у відновленні АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ є найважливішою характеристикою якості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

При вирішенні практичних завдань, пов'язаних з оцінкою ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ, пропонується використання узагальненого критерію ефективності, що дозволяє за допомогою одного показника об'єктивно оцінити ефективність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ. Узагальнений показник повинен враховувати: ймовірність евакуації пошкоджених АБТ до місць ремонту, ймовірність задоволення потреби в ремонті АБТ, тривалість перебування зразка АБТ в неробочому стані, живучість системи ремонту АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

Узагальненим критерієм може служити узагальнений коефіцієнт ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ  $K_{\text{еф. відн.}}$ , визначається з виразу:

$$K_{\text{еф. відн.}} = K_{\text{ГС}} \cdot K_{\text{БЗ}} \cdot K_{\text{Ж}} \cdot K_{\text{ОГЗЕ}}, \quad (1)$$

де  $K_{\text{ГС}}$  – коефіцієнт готовності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ;

$K_{\text{БЗ}}$  – коефіцієнт боєздатності;

$K_{\text{Ж}}$  – коефіцієнт живучості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ;

$K_{\text{ОГЗЕ}}$  – коефіцієнт оперативної готовності засобів евакуації.

Для характеристики готовності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ може бути використаний коефіцієнт готовності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ  $K_{\text{ГС}}$ , який визначається як відношення додаткових витрат, необхідних для розгортання системи відновлення АБТ до необхідних розмірів, до вартості наявних основних стаціонарних ремонтних фондів і технічних засобів рухомих ремонтних органів, тобто:

$$K_{\text{ГС}} = 1 - \frac{C_{\text{ДВ}}}{C_{\text{ОФ}}}, \quad (2)$$

де  $C_{\text{ДВ}}$  – додаткові витрати, необхідні для розгортання системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ до необхідних розмірів в установлені строки;

$C_{\text{ОФ}}$  – вартість основних стаціонарних ремонтних фондів і технічних засобів рухомих ремонтних органів [3; 12].

Інтереси підтримання постійної бойової готовності вимагають, щоб  $K_{\text{ГС}}$  прагнув до одиниці. Це означає, що вже в мирний час повинна бути створена необхідна матеріально-технічна база, яка дозволяє тільки шляхом отмобілізування особового складу й збільшення тривалості робочого часу на існуючих ремонтних органах забезпечити повне задоволення потреби у відновленні АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

Під час організації ТхЗ надзвичайно важливо ще знати, як довго АБТ, яка відправляється в ремонт, буде перебувати в неробочому стані. Кількісно цей час заздалегідь встановлюється для кожного зразка АБТ залежно від її призначення та ролі під час рішення бойових завдань (інтервал часу з моменту вилучення зразка АБТ з експлуатації до моменту введення її в експлуатацію). Тривалість перебування АБТ у неробочому стані складається з часу: на підготовку АБТ для відправки в ремонт; транспортування (буксирування) АБТ в ремонт; приймання АБТ у ремонт; простоювання АБТ до запуску в ремонт; знаходження АБТ у ремонті (цикл ремонту); простоювання відремонтованої АБТ до відправки з ремонту; транспортування АБТ уз ремонту; простоювання АБТ у неробочому стані у військах до введення в експлуатацію.

Для кількісної оцінки ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ з боку тривалості ремонту АБТ може бути використаний коефіцієнт боєздатності  $K_{\text{БЗ}}$ , який дорівнює

відношенню часу, протягом якого АБТ повинна знаходитися в боєздатному стані, до загального часу досліджуваного періоду (наприклад, тривалість оборонної операції угруповань військ (сил) ЗСУ), тобто:

$$K_{БЗ} = \frac{t_{бс}}{T}, \quad (3)$$

де  $t_{бс}$  – час, протягом якого АБТ повинні знаходитися в боєздатному стані;

$T$  – тривалість досліджуваного періоду.

Живучість системи відновлення АБТ – ймовірність того, що в умовах бойового впливу противника по військах і тиловим об'єктам угруповань військ (сил) ЗСУ система відновлення АБТ зможе забезпечити задоволення потреби військ в ремонті АБТ у встановлені терміни.

Для кількісної оцінки зміни живучості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ введемо поняття коефіцієнта живучості системи відновлення АБТ:

$$K_{Ж} = \frac{W_1}{W_0}, \quad (4)$$

де  $W_1$  – виробнича потужність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) НГУ після впливу противника;

$W_0$  – виробнича потужність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) НГУ до впливу противника.

Чим швидше може бути відновлена до необхідних розмірів порушена противником працездатність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) НГУ, тим вище буде її живучість.

Як міра під час оцінки живучості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ може бути прийнята інтенсивність відновлення  $I_{відн.}$  порушеної працездатності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ в цілому або її окремих елементів.

Інтенсивність відновлення системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ визначається як просте відношення величини виробничої потужності, яка підлягає відновленню, до сумарного часу, який має бути витрачений для відновлення, тобто:

$$I_{відн.} = \frac{\beta \cdot 1 - K_{Ж} \cdot Q_0}{\sum t_{відн.}}, \quad (5)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт, що враховує розміри, до яких повинні бути відновлені виробничі потужності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ;

$Q_0$  – виробнича потужність системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ до впливу противника;

$\sum t_{відн.}$  – сумарний час, необхідний для відновлення виробничих потужностей системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ до заданих розмірів.

Чим вище інтенсивність відновлення, тим за інших рівних можливостях ефективніше система відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

Після проведеного перетворення коефіцієнт живучості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ буде мати вигляд:

$$K_{Ж} = 1 - \frac{I_{відн.} \cdot \sum t_{відн.}}{\beta \cdot Q_0}. \quad (6)$$

В умовах сучасної війни під впливом противника виробничі можливості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ будуть змінюватися в значних межах. Як правило, руйнування будуть носити осередковий характер. Тому, щоб система відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ могла у встановлені терміни забезпечити певний обсяг ремонтних робіт, необхідно постійно здійснювати заходи, які підвищують її живучість і забезпечують безперервність процесу відновлення АБТ, які вийшли з ладу, в необхідному обсязі.

Під коефіцієнтом оперативної готовності засобів евакуації розуміємо ймовірність того, що тягачі знаходяться в працездатному стані у будь-який момент часу, крім запланованих періодів, коли використання їх за призначенням не передбачається, і, починаючи з цього моменту, будуть працювати безвідмовно протягом заданого періоду [5].

$$K_{ОГ}(t) = \frac{T_0}{T_0 + T_B} e^{-\frac{t}{T_0}}, \quad (7)$$

де  $T_0$  – середній час безвідмовної роботи тягачів;

$T_B$  – випадковий час відновлення тягачів;

$t$  – час використання тягачів.

Приклад розрахунку: Визначемо узагальнений коефіцієнт ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ  $K_{еф.відн.}$ , якщо коефіцієнт готовності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ  $K_{ГС} = 1$ ; коефіцієнт боєздатності  $K_{БЗ} = 0,9$ ; коефіцієнт живучості системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ  $K_{Ж} = 0,98$ ; коефіцієнт оперативної готовності засобів евакуації  $K_{ОГЗЕ} = 0,95$ .

За допомогою формул (1–7), визначимо:

$$K_{еф.відн.} = K_{ГС} \cdot K_{БЗ} \cdot K_{Ж} \cdot K_{ОГЗЕ} = 1 \cdot 0,9 \cdot 0,98 \cdot 0,95 = 0,84.$$

Таким чином, запропонована методика оцінки ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ дозволяє всебічно й по найбільш значущим висунутим до неї вимогам визначити:

– готовність системи до виконання покладених на неї завдань за призначенням;

– повноту задоволення потреби в ремонті АБТ;  
– здатність системи зберігати й відновлювати втрачену працездатність в різних умовах військової обстановки:

**Висновки.** Розроблена методики визначення ефективності системи відновлення автобронетанкової техніки угруповань військ ЗСУ сприятиме офіцерам технічних служб в обґрунтуванні наслідків прийнятих рішень на підготовку сил і засобів технічного забезпечення до бойових дій, а також у зменшенні втрати часу на усунення відмов АБТ або часу на відновлення працездатності техніки в разі її пошкодження противником протягом бойових дій.

Необхідно вибрати такий варіант системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ, щоб, з

одного боку, вона була готова в обмежені терміни при мінімальних додаткових витратах розвернутися до розмірів, що забезпечують необхідну виробничу потужність у воєнний час, з іншого – щоб витрати на зміст системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ в мирний час були мінімальними, але достатніми для задоволення поточної потреби в ремонті АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ.

Отриманий показник ( $K_{\text{еф.відн.}}$ ) дозволяє оцінити рівень ефективності системи відновлення АБТ угруповань військ (сил) ЗСУ, а також дозволяє визначити вплив на систему окремих властивостей сучасного бою та намітити шляхи забезпечення високого рівня ефективності системи відновлення техніки.

#### Список літератури:

1. Керівництво з організації експлуатації та ремонту бронетанкового озброєння та техніки у ЗСУ на мирний час : Наказ Міністра оборони України № 665 від 25 грудня 2009 року. URL: <https://drive.google.com/file/d/1jI1efN33mOMWD9Hfjdo3GkdmeBeT3vyF/view>.
2. Дем'янчук Б.О., Верпівський С.М., Меленчук В.М. Основи автотехнічного забезпечення. Моделювання процесів. Одеса : Військова академія, 2015. 330 с.
3. Ткачук П.П., Калінін О.М., Русіло П.О. Рухомі засоби технічного обслуговування і ремонту військової автомобільної техніки. Львів : Академія сухопутних військ, 2012. 264 с.
4. Ткачук П.П., Русіло П.О., Костюк В.В. Армійські автомобілі. Ремонт військової автомобільної техніки. Львів : Академія сухопутних військ, 2013. 522 с.
5. Чабанний В.Я. Ремонт автомобілів. Кіровоград : Кіровоградська районна друкарня, 2007. 720 с.
6. Васілевський О.М., Поджаренко В.О. Нормування показників надійності технічних засобів : навчальний посібник. Вінниця : ВНТУ, 2010. 129 с.
7. Дем'янчук Б.О., Малишкін О.В. Основи технічного забезпечення. Обґрунтування рішень. Одеса : МО України, 2014. 208 с.
8. Чабаненко П.П. Закономірності та особливості оцінювання ефективності систем у бойових діях за ймовірнісними моделями. Київ : Наука і оборона. 2016. Вип. 4. С. 16–22.
9. Дем'янчук Б.О., Маханьков В.А., Обертас В.Ф. Автотехнічне забезпечення. Управління ресурсом і оновленням парку автомобілів. Одеса : Видавництво: Військова академія (м. Одеса), 2016. 250 с.
10. Технічне забезпечення військ (сил) в операції і бою. Частина 1 / В.О. Шуєнкін, О.І. Хазанович, І.С. Ішутін, М.Ф. Єжєв та ін. ; під заг. ред. М.І. Шапталенко. Київ : Національна Академія Оборони України, 2001. С. 9–10.
11. Казаков О.Г., Тишук О.В., Базілевський І.С., Єфімов К.М. Будова, експлуатація та військовий ремонт автомобільної техніки. Частина 1. Автоматизована бібліотечна система ВІТВ НТУ «ХПІ». Харків, 2020. URL: <http://library.vitv.kh.ua/items/show/16>.
12. Старцев В.В., Рогозін І.В., Литовченко Д.М. Перспективи створення сучасної рухомої автомобільної ремонтної майстерні вітчизняного виробництва. *Системи озброєння і військова техніка*. Харків : ХУПС, 2016. № 2 (46). С. 150–154.
13. Акінін О.Г., Щокін В.М. Танко-технічне забезпечення. Частина 1. Автоматизована бібліотечна система ВІТВ НТУ «ХПІ», Харків, 2020. URL: <http://library.vitv.kh.ua/items/show/14>.
14. Перспективи розвитку озброєння та військової техніки Сухопутних військ : Збірник тез доповідей Міжнародної науково-технічної конференції, м. Львів, 14–15 травня 2015 року. Львів : АСВ, 2017. 314 с.

#### **Kuzhelovich V.I., Melnikov S.M. METHODOLOGY FOR DETERMINING THE EFFECTIVENESS OF THE SYSTEM OF RESTORATION OF AUTO-ARMORED TECHNIQUE OF GROUPING OF TROOPS (FORCES) OF THE NATIONAL GUARDS OF UKRAINE**

*The paper substantiates the relevance of determining the indicator of the effectiveness of the recovery system of armored vehicles of the troops (forces) of the National Guard of Ukraine. For the successful solution of service and combat missions, it is necessary to make maximum use of the capabilities of the recovery*

*system for armored vehicles and evaluate the effectiveness of repairing armored vehicles. At present, special indicators are used to assess the state of the recovery system of armored vehicles of the groupings of troops (forces) of the National Guard of Ukraine, which are a numerical expression of the gauges or their relationship. Existing methods for forecasting a quantitative assessment of the effectiveness indicator of the system for restoring armored vehicles of the groupings of troops (forces) of the National Guard of Ukraine need further improvement. The system of restoration of groups of troops (forces) of the Armed Forces of Ukraine is a set of interconnected means of technical reconnaissance, evacuation, repair of equipment, performers and documentation, the interaction of which takes place in accordance with the tasks of all planned repairs [1]. This article discusses a methodology for assessing the effectiveness of a system for restoring armored vehicles of forces of the National Guard of Ukraine in terms of the likelihood of meeting the need for repairs, length of service, and the survivability of the system and is proposed as an indicator of the effectiveness of a system for restoring armored vehicles of forces of forces (forces)) Of the National Guard of Ukraine, use a comprehensive indicator – a generalized coefficient of the effectiveness of the recovery system ment of armored engineering troops (forces) of the National Guard of Ukraine.*

**Key words:** *recovery system, armored vehicles, performance indicators, operational readiness coefficient, recovery system availability coefficient, combat readiness coefficient, survivability coefficient of recovery system, operational readiness coefficient of evacuation facilities.*

УДК 629.463.65  
DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/38>

**Ловська А.О.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Фомін О.В.**

Державний університет інфраструктури та технологій

**Рибін А.В.**

Український державний університет залізничного транспорту

**Лебідь Г.О.**

Національний університет «Запорізька політехніка»

## ВИЗНАЧЕННЯ ДИНАМІЧНОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ НАПІВВАГОНА ІЗ ЗАМКНЕНОЮ ХРЕБТОВОЮ БАЛКОЮ, ЗАПОВНЕНОЮ НАПОВНЮВАЧЕМ

*Забезпечення безперебійної роботи транспортної галузі можливе за надійної та злагодженої експлуатації окремих її складових частин. Відомо, що однією з найважливіших серед таких складових частин є залізничний транспорт. Для підвищення ефективності експлуатації залізничного транспорту важливим є впровадження інноваційного рухомого складу.*

*З метою забезпечення міцності несучих конструкцій напіввагонів в експлуатації запропоновано їх удосконалення. Таке вдосконалення полягає у використанні замість типової конструкції хребтової балки як основного несучого елемента рами конструкції замкненої конфігурації, яка складається з двох профілів, що утворюють замкнений переріз. Таке рішення сприяє зменшенню маси рами майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією. Для зменшення динамічної навантаженості пропонується використання наповнювача в хребтовій балці. Як наповнювач може бути застосований матеріал, який має пружні, в'язкі або пружно-в'язкі властивості. Розміщення матеріалу передбачається за довжиною хребтової балки між задніми упорами автотягів.*

*Для визначення навантаженості несучої конструкції напіввагона з урахуванням заходів щодо вдосконалення здійснено математичне моделювання.*

*Установлено, що використання як наповнювача матеріалу з пружними властивостями сприяє зменшенню динамічної навантаженості напіввагона на 2,6% в порівнянні з конструкцією без наповнювача. Водночас жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка, повинна мати значення близько 100 кН/м.*

*З урахуванням використання як наповнювача матеріалу з в'язкими властивостями динамічна навантаженість напіввагона зменшується на 4% в порівнянні з конструкцією без наповнювача. Водночас коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка, повинен мати значення близько 118 кН·с/м.*

*Проведені дослідження сприятимуть створенню напрацювань щодо проєктування інноваційних конструкцій рухомого складу й підвищенню ефективності його функціонування.*

**Ключові слова:** транспортна механіка, напіввагон, несуча конструкція, динамічна навантаженість, моделювання динаміки, прискорення конструкції.

**Постановка проблеми.** Дотримання стратегічного плану розвитку залізничного транспорту й утримання його лідерських позицій у перевізному процесі зумовлюють необхідність впровадження в експлуатацію рухомого складу нового покоління з покращеними техніко-економічними, експлуатаційними та екологічними показниками.

Відомо, що однією з головних проблем залишається забезпечення міцності, в тому числі, втомної

міцності, несучих конструкцій вагонів в експлуатації. Періодична дія знакозмінних навантажень сприяє пошкодженню несучих конструкцій вагонів, необхідності проведення позапланових видів ремонту та додаткових витрат на їх експлуатацію.

Тому для підвищення ефективності експлуатації вагонів важливим є використання нових нетривіальних технічних рішень під час їх проєктування, які сприятимуть зменшенню динамічної

навантаженості в експлуатації, покращенню міцності, надійності та забезпеченню безпеки руху.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Особливості застосування теорії оптимального проектування несучої конструкції кузова глухонного напіввагона висвітлюються в роботі [1]. Результати проведених досліджень дозволили визначити оптимальну конфігурацію розвантажувальних бункерів напіввагона. Важливо сказати, що під час оптимізації несучої конструкції напіввагона не враховано заходів щодо зменшення динамічної навантаженості в експлуатації.

В роботі [2] проведено обґрунтування удосконалення конструкції вузла защемлення проміжної стійки й поперечної балки кузова напіввагона. Наведені результати розрахунку на міцність несучої конструкції напіввагону, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Важливо сказати, що така модернізація не сприяє зменшенню динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона та не вирішує повною мірою питання забезпечення його міцності в експлуатації.

Удосконалення методики розрахунку на міцність верхнього об'язування бокових стін кузова напіввагону наведено в публікації [3]. Запропоновано уточнені розрахункові схеми, які враховують розвантаження змерзлого вантажу з напіввагона на вагоноперекидачі. Наведені результати розрахунку кузова напіввагона. Однак в роботі не зазначено перспектив щодо удосконалення несучої конструкції напіввагона для забезпечення його міцності в експлуатації.

Вибір конструктивних рішень елементів вагонів з малою масою тари проводиться у [4]. Як методика використана порівняльна оцінка показників міцності, витривалості та стійкості несучої конструкції мінімальної маси, виготовленої з різних матеріалів.

Обґрунтування вибору нового профілю для хребтової балки вантажного вагона проводиться в [5]. У роботі наведений ряд конструктивних рішень рам вантажних вагонів різного типу. Наведені результати розрахунку на міцність несучих конструкцій вагонів з урахуванням запропонованих рішень.

Однак у роботах не запропоновано заходів щодо зменшення навантаженості несучих конструкцій вагонів за умови експлуатаційних режимів.

Особливості удосконалення несучих конструкцій вагонів для зменшення їх динамічної навантаженості висвітлюється у роботах [6; 7]. Запропоновані заходи щодо удосконалення підтверджені шляхом математичного моделювання динамічної навантаженості та міцності. Разом з цим запропо-

новані заходи щодо удосконалення спрямовані на зменшення динамічної навантаженості несучих конструкцій вагонів у вертикальній площині. Тобто визначення динамічної навантаженості вагонів у повздовжній площині в роботах не проводиться.

Аналіз літературних джерел [1–7] дозволяє зробити висновок, що досі питання покращення міцності несучих конструкцій вагонів шляхом удосконалення основних несучих елементів кузовів і використанням наповнювачів в їх складових не висвітлювалися. Це зумовлює необхідність здійснення відповідних досліджень та напрацювань у зазначеному напрямі.

**Постановка завдання.** Визначення динамічної навантаженості напіввагона з замкненою хребтовою балкою, заповненою наповнювачем шляхом математичного моделювання.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** З метою зменшення динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона за умов експлуатаційних режимів запропоновано удосконалення його рами, як основного несучого елемента кузова. Таке удосконалення полягає в використанні замість типової конструкції хребтової балки замкненої, яка складається з двох профілів, що утворюють замкнений переріз (рис. 1, а). Це сприяє зменшенню маси рами майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією. Водночас є можливим використання наповнювача в хребтовій балці (рис. 1, б). Як наповнювач може бути застосований матеріал, який має пружні або в'язкі властивості. Розміщення матеріалу передбачається за довжиною хребтової балки між задніми упорами автозчепів.

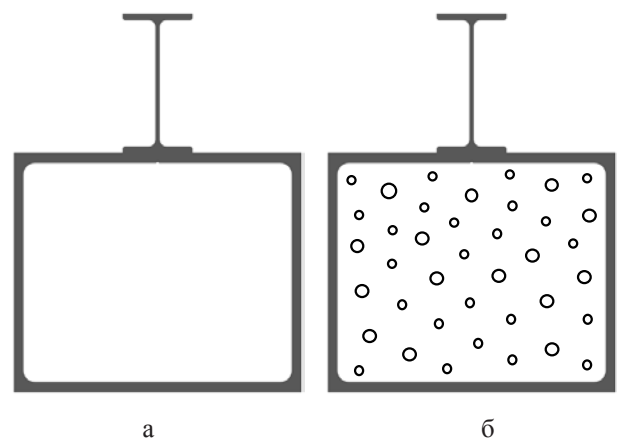


Рис. 1. Переріз замкненої конструкції хребтової балки напіввагона: а) без наповнювача; б) з наповнювачем

Для визначення навантаженості несучої конструкції напіввагона з урахуванням заходів щодо удосконалення здійснене математичне моделю-



вання. Розрахункова схема напіввагона наведена на рис. 2.

Для цього використано математичну модель, наведену в роботі [8], яка описує динамічне навантаження несучої конструкції вагона-платформи з контейнерами-цистернами. Тому модель було доопрацьовано шляхом урахування переміщень несучої конструкції напіввагону в повздовжній площині.

На першопочатковому етапі дослідження проведено математичне моделювання динамічної навантаженості несучої конструкції напіввагона з наповнювачем у хребтовій балці, який має пружні властивості:

$$M_{\text{оп}} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\varphi} = P_n - (2P_{\text{мп}} + c \cdot x), \quad (1)$$

$$I_B \cdot \ddot{\varphi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \varphi \cdot (M_B \cdot h) = \\ = l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (2)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2), \quad (3)$$

де

$$\Delta_1 = z - l \cdot \varphi; ;$$

$M_{\text{оп}}$  – маса бруто вагона;  $M_B$  – маса несучої конструкції вагона;  $I_B$  – момент інерції вагона;  $P_n$  – величина повздовжньої сили на задній упор автотягача;  $P_{\text{мп}}$  – сили тертя, які виникають між п'ятниками рами й підп'ятниками візків;  $c$  – жорсткість матеріалу, яким заповнені елементи несучої конструкції вагону;  $l$  – половина бази вагона;  $F_{\text{ТР}}$  – абсолютне значення сили сухого тертя в ресорному комплекті;  $k_1, k_2$  – жорсткість пружин ресорного підвішування візків вагона;  $x, \varphi, z$  – координати, що відповідають, відповідно, повздовжньому, кутовому навколо поперечної осі та вертикальному переміщенню вагона.

Крім того, під час доопрацювання моделі враховано силу тертя, яка виникає між п'ятниками й підп'ятниками й зумовлену дією повздовжньої сили на задній упор автотягача.

Чисельне значення повздовжньої сили на несучу конструкцію напіввагона прийнято рівним 3,5 МН [9; 10]. Як прототип обраний напіввагон моделі 12-757 на типових візках 18-100.

Розв'язок диференціальних рівнянь (1)–(3) здійснений за методом Рунге-Кутта в програмному комплексі MathCad у вигляді

$$F(t, y) = \begin{bmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_n - (2P_{\text{мп}} + c \cdot y_1) - (M_B \cdot h) \cdot y_4}{M_{\text{оп}}} \\ l \cdot F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2) + l (k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_B \cdot h) \cdot y_2 + \\ + g \cdot y_3 \cdot (M_B \cdot h) \\ \frac{I_B}{M_B} \\ \frac{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{\text{ТР}} (\text{sign} \Delta_1 - \text{sign} \Delta_2)}{M_B} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

Водночас  $y_1=q_1, y_3=q_3, y_5=q_5, y_2=y_2, y_4=y_3, y_6=y_5,$

Початкові умови прийняті рівними нулю [11–13]. Проведені розрахунки показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають  $37,8 \text{ м/с}^2$  (рис. 3). Така величина прискорення на 2,6% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. За такої умови жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинна мати значення близько 100 кН/м.

Також розрахунок здійснений з урахуванням використання наповнювача з в'язкими властивостями. Диференціальні рівняння руху напіввагона водночас мають вигляд:

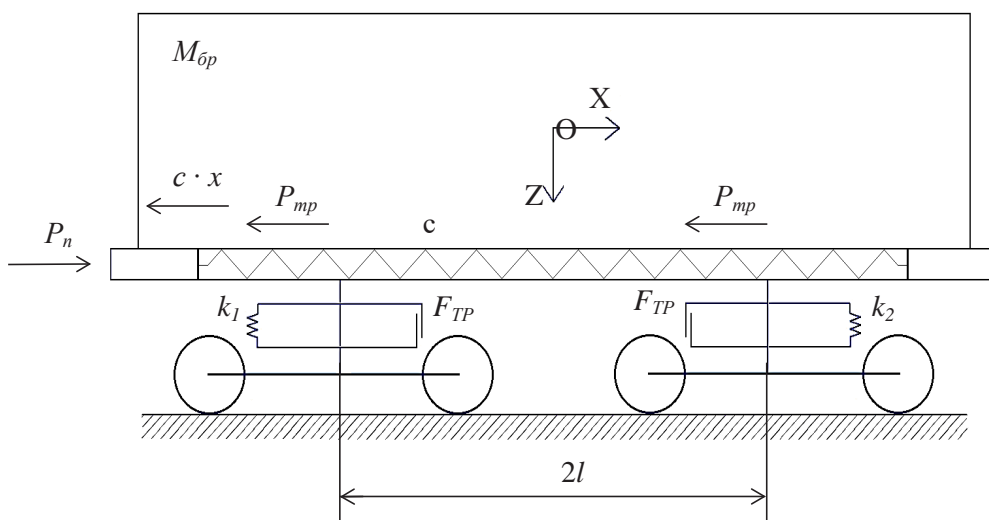


Рис. 2. Розрахункова схема напіввагона

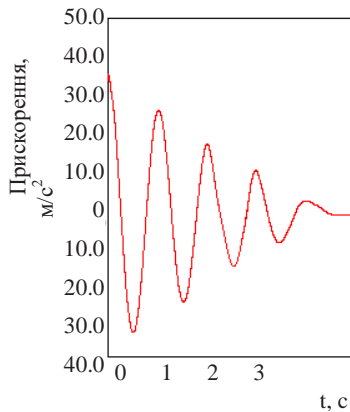


Рис. 3. Прискорення несучої конструкції напіввагона з урахуванням використання пружного наповнювача в хребтовій балці

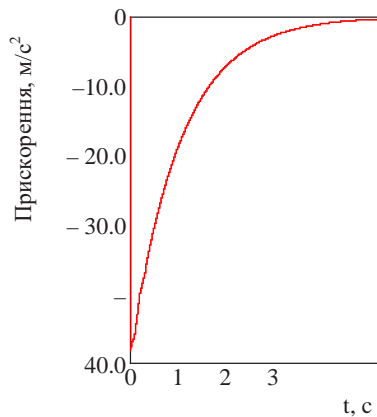


Рис. 4. Прискорення несучої конструкції напіввагона з урахуванням використання в'язкого наповнювача в хребтовій балці

$$M_{op} \cdot \ddot{x} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{\phi} = P_n - 2P_{mp} - \beta \cdot \dot{x}, \quad (5)$$

$$I_B \cdot \ddot{\phi} + (M_B \cdot h) \cdot \ddot{x} - g \cdot \phi \cdot (M_B \cdot h) = l \cdot F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2), \quad (6)$$

$$M_B \cdot \ddot{z} = k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2), \quad (7)$$

де  $\beta$  – коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка.

Розв'язок математичної моделі (5)–(7) у програмному комплексі MathCad здійснювався у вигляді:

$$F(t, y) = \begin{pmatrix} y_2 \\ y_4 \\ y_6 \\ \frac{P_n - 2P_{mp} - \beta \cdot y_2 - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_4}{M_{op}} \\ l \cdot F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2) + l(k_1 \cdot \Delta_1 - k_2 \cdot \Delta_2) - (M_B \cdot h) \cdot \dot{y}_2 + g \cdot y_3 \cdot (M_B \cdot h) \\ \frac{I_B}{k_1 \cdot \Delta_1 + k_2 \cdot \Delta_2 - F_{TP} (\text{sign}\dot{\Delta}_1 - \text{sign}\dot{\Delta}_2)} \\ \frac{I_B}{M_B} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

$$Z = \text{rkfixed}(Y0, tn, tk, n, F).$$

Водночас  $y_1=q_1, y_3=q_3, y_5=q_5, y_2=y_1, y_4=y_3, y_6=y_5$ ,

Результати проведених розрахунків показали, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 36,8 м/с<sup>2</sup> (рис. 4).

Така величина прискорення на 4% нижча за ту, що отримана для несучої конструкції без наповнювача. За такої умови коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинен мати значення близько 118 кН·с/м.

**Висновки.** Для зменшення динамічної навантаженості напіввагона в експлуатації запропоновано удосконалення його несучої конструкції та використання в ній наповнювачів з пружними або в'язкими властивостями. Водночас забезпечується зменшення матеріалоемності рами напіввагона майже на 4% в порівнянні з типовою конструкцією.

Визначено динамічну навантаженість напіввагона з урахуванням використання як наповнювача хребтової балки матеріалу з пружними властивостями. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 37,8 м/с<sup>2</sup>, що на 2,6% нижче за прискорення, що діє на несучу конструкцію без наповнювача. За такої умови жорсткість матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинна мати значення близько 100 кН/м.

Визначено динамічну навантаженість напіввагона з урахуванням використання як наповнювача хребтової балки матеріалу з в'язкими властивостями. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на несучу конструкцію напіввагона складають 36,8 м/с<sup>2</sup>, що на 4% нижче за прискорення, що діє на несучу конструкцію без наповнювача. Водночас коефіцієнт в'язкого опору матеріалу, яким заповнена хребтова балка повинен мати значення близько 118 кН·с/м.

Результати проведених досліджень сприятимуть створенню напрацювань щодо проектування інноваційних конструкцій рухомого складу й підвищенню ефективності його функціонування.

### Список літератури:

1. Чепурченко І.В., Носырев Д.Я., Коркіна С.В. Использование теории оптимального проектирования для усовершенствования конструкции кузова глухонного полувагона. *Вестник транспорта Поволжья*. 2018. № 3 (69). С. 28–32.
2. Візняк Р.І., Гудко А.В. Удосконалення конструкції вузла заділки проміжного стояка та балки кузова напіввагона з метою забезпечення міцності в експлуатації. *Збірник наукових праць УкрДАЗТ*. 2014, Вип. 147. С. 18–22.
3. Булычев М.А., Антипин Д.Я. Совершенствование методики расчета на прочность верхних обвязок боковых стен полувагонов. *Вестник Брянского государственного технического университета*. 2019. № 3 (76). С. 58–64.

4. Бороненко Ю.П., Филипова И.О. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары. *Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту*. 2017. № 3 (69). С. 121–129. DOI: 10.15802/stp2017/104546.
5. Соколов А.М., Савушкина Ю.В., Новоселов А.Ю., Коротков Д.С. Универсальный профиль для хребтовой балки вагонов. *Транспорт Российской Федерации*. 2019 № 1 (80). С. 50–55.
6. Fomin O., Lovska A., Medvediev I., Shatkovska H. Establishing patterns in the dynamic loading on the body of a semi-wagon with an elastic middle part of the girder beam. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. № 5/7 (107). P. 30–37.
7. Фомін О.В., Ловська А.О. Визначення вертикальних прискорень несучої конструкції вагона-платформи з в'язкими зв'язками у повздовжніх балках. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2021. Том 32 (71). № 1. Частина 2. С. 135–140.
8. Богомаз Г.И., Мехов Д.Д., Пилипенко О.П., Черномашенцева Ю.Г. Нагруженность контейнеров-цистерн, расположенных на железнодорожной платформе, при ударах в автосцепку. *Динаміка та керування рухом механічних систем* : збірник наукових праць. Київ : АНУ, Інститут технічної механіки, 1992. С. 87–95.
9. ДСТУ 7598: 2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). [Чинний від 2015-07-01]. Київ, 2015. 162 с.
10. ГОСТ 33211-2014. Вагоны грузовые. Требования к прочности и динамическим качествам. [Действующий от 2016-07-01]. Москва, 2016. 54 с.
11. Vatulina G., Falendysh A., Orel Y., Pavliuchenkov M. Structural Improvements in a Tank Wagon with Modern Software Packages. *Procedia Engineering*. 2017. Vol. 187. P. 301–307. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.04.379.
12. Fomin O., Lovska A. Improvements in passenger car body for higher stability of train ferry. *Engineering Science and Technology, an International Journal*. September 2020. Vol. 23. P. 1455–1465. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2020.08.010>.
13. Fomin O., Lovska A., Pištěk V., Kučera P. Dynamic load effect on the transportation safety of tank containers as part of combined trains on railway ferries. *VIBROENGINEERING PROCEDIA*. 2019. Vol. 29. P. 124–129.

#### **Lovska A.O., Fomin O.V., Rybin A.V., Lebid H.O. DETERMINATION OF DYNAMIC LOAD OF A WALKWAY WITH A CLOSED SPINE BEAM FILLED WITH FILLER**

*Ensuring the smooth operation of the transport industry is possible with reliable and coordinated operation of its individual components. It is known that one of the most important among such components is rail transport. To increase the efficiency of railway transport operation, it is important to introduce innovative rolling stock.*

*In order to ensure the strength of the load-bearing structures of gondola cars in operation, their improvement is proposed. This improvement is to use instead of the typical design of the spine beam, as the main supporting element of the frame, the design of a closed configuration, which consists of two profiles forming a closed section. This solution reduces the weight of the frame by almost 4% compared to a typical design. To reduce the dynamic load, it is proposed to use a filler in the spine beam. A material having elastic, viscous or elastic-viscous properties can be used as a filler. The location of this material is provided by the length of the spine beam between the rear stops of the hitches.*

*To determine the load on the load-bearing structure of the gondola, taking into account measures for improvement, mathematical modeling was performed.*

*It is established that the use of a material with elastic properties as a filler helps to reduce the dynamic load of the gondola by 2.6% compared to the design without a filler. The stiffness of the substance with which the spine beam is filled should be about 100 kN / m.*

*Due to the use of a material with viscous properties as a filler, the dynamic load of the gondola is reduced by 4% compared to the design without a filler. The coefficient of viscous resistance of the substance with which the spinal beam is filled should be about 118 kNs / m.*

*The conducted researches will promote creation of developments concerning designing of innovative designs of a rolling stock and increase of efficiency of its functioning.*

**Key words:** transport mechanics, gondola car, load-bearing structure, dynamic loading, dynamics modeling, structure acceleration.

**Мельник О.М.**

Одеський національний морський університет

**Бичковський Ю.В.**

Одеський національний морський університет

## УРАХУВАННЯ ФАКТОРА СТРЕСУ В СИСТЕМІ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ МОРЕПЛАВСТВА

*Моряки перебувають та працюють у специфічних умовах, які нерозривно пов'язані із суттєвими соціальними і фізичними обмеженнями, серед яких – тривалий відрив від звичного берегового життя, соціального середовища і оточення. Вказані особливості впливають на виникнення стану стресу різного походження, під яким розуміють захисну реакцію організму людини, також це поняття зумовлює стан людини, пов'язаний з небезпечними ситуаціями, конфліктами, проявами і наслідками екстремальних впливів середовища та є одним із головних факторів серед так званих «індивідуальних факторів людського елемента». Численні публікації з теми вказують на той факт, що «індивідуальні фактори людського елемента» – це другий за ступенем загрози фактор після втому, що присутній у більшості причин виникнення тяжких морських аварій. Дослідженню феномена цього фактора приділено досить уваги у публікаціях як вітчизняних, так і закордонних дослідників. Однак аналіз матеріалів досліджень і численних праць демонструє наявність проблеми недостатнього рівня обізнаності та розуміння цього явища серед членів екіпажів морських суден, що своєю чергою не знаходить належного сприймання безпосередньо на судах та не працює на систему забезпечення безпеки мореплавства загалом. Тому, узагальнюючи досвід управління роботою суден та їх комерційної експлуатації та враховуючи значний практичний досвід керування різними типами морських суден протягом певного часу, для вирішення багатьох ситуацій на борту судна, у яких фактор «стресу» був домінуючим, у цій публікації запропоновано авторський підхід, у якому представлено метод зниження сумарного навантаження від стресу на членів екіпажів морських суден. Використання запропонованого методу дозволить, з одного боку, зменшити загрозу виникнення аварій і аварійних випадків впродовж рейсу, а з іншого боку, оптимізувати процеси підготовки і тренування моряків у спеціалізованих морських навчальних закладах та тренажерних центрах підготовки моряків в Україні.*

**Ключові слова:** людський елемент, забезпечення безпеки судноплавства, фактор стресу.

**Постановка проблеми.** За результатами проведеного дослідження встановлено, що ступінь обізнаності серед українських моряків щодо сутності фактору стресу, його негативного впливу на працездатність та застосування засобів протидії цьому явищу перебуває на низькому рівні. Усі опитані респонденти продемонстрували розуміння цього терміна, до того ж велика кількість моряків багаторазово відчувала вплив стресу на свій організм, деякі навіть спромоглися надати власні навички щодо зменшення наявного рівня стресу, але цілісної картини не зміг надати жоден з респондентів. З метою визначення загальної картини формування стресу та його негативного впливу на людський організм, що викликає велику кількість професійних захворювань серед моряків, основна мета цього дослідження полягає у вивченні та формулюванні сутності та складових частин стресу, його прояву та негативного впливу, що потребує додаткового висвітлення і є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Бачення людського елемента представлено у нормативних документах [1]. Негативний вплив стресу на організм людини вивчено у [2]. Так, у роботах [3–8] автори вважають вплив від стресу однією з головних причин усіх інцидентів на морі, який присутній майже у 80% випадків. Велика кількість експертів з цього питання вважають вплив стресу на морі значно вищим, ніж серед працівників берегового сектору. Праці присвячені дослідженням впливу стресу на моряків та його зв'язку з багатьма відомими стресовими факторами, що пов'язані з тривалою ізоляцією моряків та специфікою їхньої діяльності у [9–13]. Підсумовуючи аналіз наукових праць, стає очевидним, що проблема стресу є вкрай важливою для сучасного судноплавства і цей факт знаходить своє відповідне відображення у науці.

**Постановка завдання.** Метою статті є розгляд фактора стресу у системі забезпечення безпеки мореплавства.

**Виклад основного матеріалу.** У порівняльному аналізі статистичних даних, отриманих від австралійських моряків та від сухопутних працівників (австралійське «Агентство морської безпеки» – AMSA), відзначено, що наявна низка ситуацій, що показують залежність між станом здоров'я та стресом, але мають відмінності між собою. Респондентів запросили оцінити, як часто вони відчували стрес і на якому рівні. Додатково, як часто та якою мірою вони займаються питаннями власного здоров'я і поведінки (наприклад, фізичні вправи, пияцтво та куріння). В опитуванні взяли участь 1806 респондентів, серед яких – рядовий склад екіпажів, капітани, помічники капітанів, механіки та лоцмани. Моряки здебільшого повідомили про вищий рівень стресу від джерел виробничої діяльності, ніж це було у інших групах. Більшість моряків повідомляли про випадки частого стресу саме у морі (80%). Були міжвідомчі відмінності в рівні стресу, понад 65% механіків, 60% осіб рядового складу екіпажу та понад 60% капітанів повідомляють про помірний та високий рівень стресу [4].

Стрес є фізіологічним реагуванням на тривалі ситуації, коли тиск обставин на людей перевищує доступні ресурси. Натрапивши на стрес, реакцію людини можна розділити на три послідовні етапи (рис. 2):

- етап тривоги;
- етап опору;
- етап виснаження.

**Етап тривоги** – це початкова фаза стресу, коли стимулятор (стресор) вперше зустрічається, наш організм ще не готовий з ним справлятися, тому його здатність справлятися зі стресом знижується. Дуже швидко людина збуджується і виробляє гормони, які допомагають впоратися зі стресом. Здатність справлятися починає значно зростати. Функції організму активізуються для боротьби зі стресом. Етап тривоги дозволяє нам справлятися тимчасово, поки організм може виробляти гормони для боротьби із стресом. Ці симптоми збудження включають: головний біль і холодний піт; втому (швидке настання) і втрату енергії; підвищення ритму серцебиття та задишку; болі в м'язах і нервові тики; гострий тунельний зір.

**Етап опору** – це друга фаза розвитку стресу. Початкові симптоми збудження зменшуються, коли організм справляється зі стресором; усе ж збудження не знижується до норми; підвищується здатність розуму вирішувати проблеми; витрачається адаптивна енергія, щоб тіло могло впоратися зі стресором; тунельний зір знижується, але все ще присутній.

**Етап виснаження.** Стадія виснаження – це заключна фаза стресу. Але вона не настає, якщо стрес або подразник знято. Однак, якщо стрес залишається, наведено деякі реакції, що спостерігаються на цій стадії: адаптивна енергія виснажується; настає функціональна непрацездатність, втрачається ситуативна обізнаність; розум зупиняє свої функції вирішення проблем, оскільки

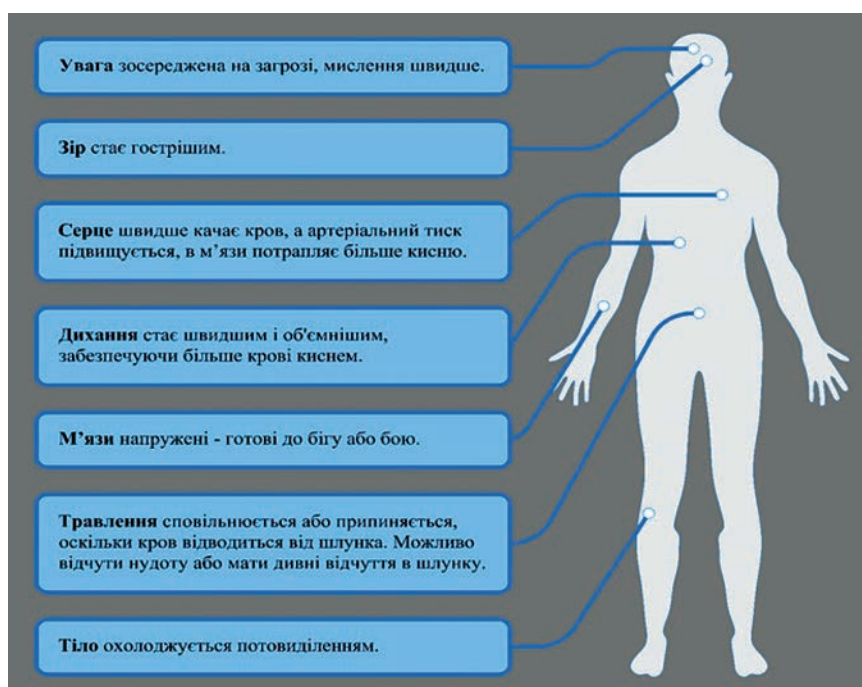


Рис. 1. Вплив стресу на людину [2]

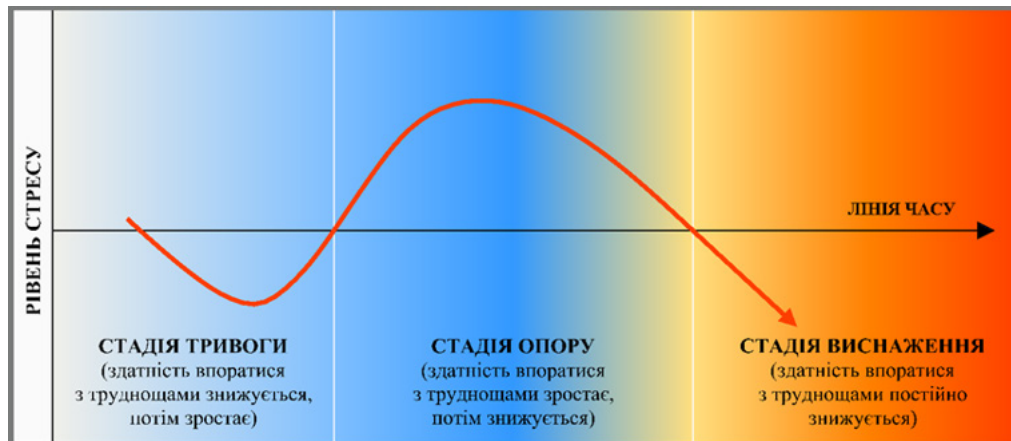


Рис. 2. Стадії розвитку стресу [10]

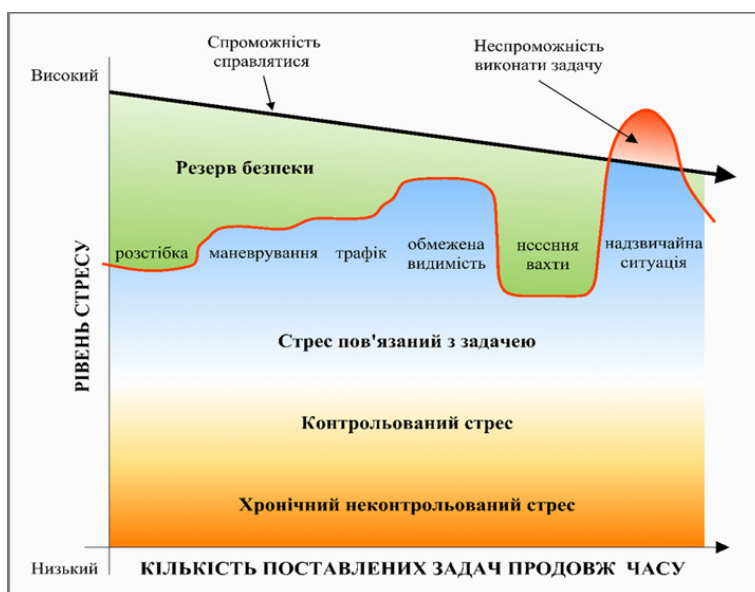


Рис. 3. Вплив різних складників стресу на здатність людини відповідно реагувати на стрес [10]

реалізація встановлює, що людина не може впоратися з величиною стресора; болісні ендорфіни наповнюють кровоносну систему; млявість настає в результаті втоми; має місце сильний психічний та фізичний розпад (нервові розлади, відключення світла, відрив від реальності, інфаркти, інсульт, виразки).

Працюючи над такою темою, ми визнали велику кількість підходів дослідників до визначення видів стресу. На наш погляд, для дотримання вимог безпеки мореплавства, найбільш правильно та доцільно використовувати таку методику, яка легко пояснює сутність виникнення стресу у моряків. Її сутність полягає в тому, що у нашому робочому середовищі є три категорії стресу:

- хронічний неконтрольований стрес;
- контрольований стрес;
- стрес, пов'язаний із завданням.

Сутність такої методики представлена на рис. 3.

Досить навіть швидкого погляду на такий рисунок для того, щоб зрозуміти, що стрес моряка є неоднорідним. Він складається з трьох складників. Якщо сумарний рівень стресу перевищує спроможність людини подолати стрес, ми відчуваємо сильний негативний стрес, який часто приводить до неспроможності моряка виконувати свої професійні обов'язки. Також моряки повинні розуміти той факт, що індивідуальна спроможність справлятися зі стресом дуже різна, крім того, ця спроможність постійно зменшується протягом часу виконання робочого навантаження. Отже, стрес і втома – це два пов'язані між собою поняття, підвищений стрес провокує підвищену втому і навпаки.

До складу поняття «хронічний неконтрольований стрес» входить постійний стрес, який ми не можемо контролювати під час виконання своїх службових обов'язків або маємо можливість впливати в обмежених масштабах, беручи до уваги можливості сучасного телекомунікаційного зв'язку. Він встановлює базовий рівень стресу. Усі інші види стресу поверх цього. До хронічних неконтрольованих стресів належать: ізоляція від домашнього середовища, особисті проблеми, сімейні проблеми, фінансові проблеми, глибоко вкорінені травми та переживання, фізичні недоліки.

«Контрольований стрес» можна контролювати за власною ініціативою. Цей стрес спричинений стимулом та ситуаціями, які не є життєво важливими для виконання безпосереднього оперативного завдання. Цей стрес є додатковим до основного хронічного неконтрольованого стресу,

який завжди присутній: фізичне нездужання; алкоголь/кофеїн/наркотики/дієта/відсутність сну; навколишнє середовище (гаряче/холодне, неприємна атмосфера, безлад); почуття незадоволення своїми обов'язками; рольовий конфлікт; втома і погане управління сном; шум і перешкоди; вимоги недавнього минулого; очікувані вимоги найближчого майбутнього; перенаселеність приміщень.

«Стрес, пов'язаний із завданням» – це тимчасовий стрес, пов'язаний з основними операціями з експлуатації судна (вимоги до віку, безпосередня безпека життя та судна). Незважаючи на те, що цей стрес також можна контролювати, рівень стресу, спричинений цими основними завданнями, зазвичай набагато більший, наприклад: судові операції (причальні, вантажні, лоцманські, якірні та інші); щільність руху; стан видимості; важкі погодні умови; зміни часу на морських годинниках; несподівані ситуації; надзвичайні ситуації та поломки тощо.

Підсумовуючи, варто додати, що необхідно поступово розробляти системну оцінку очікуваного стресового навантаження і прогнозувати періоди, коли здатність моряка чинити опір стресу буде недостатньою. А це вже означає небезпеку, тобто ризику. Наприклад, у разі прибуття нового члену екіпажу. Якщо з його боку протягом певного часу капітаном помічено постійну роздратованість, занепокоєння, то необхідно обережно підходити до розмови з моряком, з'ясувати причини такого стану. Якщо це пов'язано з берегом, то звернутися за допомогою до судовласника, агентства з працевлаштування моряка для вирішення його проблем; якщо це пов'язано зі здоров'ям – надати необхідну медичну допомогу, якщо це пов'язано з умовами проживання, харчування, характером виконуваної роботи чи робочим навантаженням – змінити ситуацію на краще. В результаті всіх вжитих заходів вирішення низки локальних, дрібних проблем дозволяє істотно зменшити площу, яку займали неконтрольований і контрольований стрес, тим самим залишаючи більше можливості для боротьби зі стресом, викликаним розв'язуванням завданням, та не дозволяючи загальному рівню стресу перевищувати спроможність людини справлятися зі стресовим навантаженням. Запропонована методика підрахунку власного рівня стресу є простою, доступною для розуміння, що є найважливішим – ефективною; ця ефективність перевірена авторами цієї публікації протягом багатьох років, зокрема під час роботи на посаді капітана судна.

Крім того, під час проведення дослідження в рамках експерименту щодо питань «стресу» було

опитано широку аудиторію з українських моряків різного віку, досвіду роботи на судах. Надані результати представлені на рис. 4.



Рис. 4. Розуміння видів стресу серед українських моряків [14]

Як свідчать отримані результати, лише чотири відсотки українських моряків розуміють наявні види стресу за такою методикою. Отримані дані сприймаються як дуже небезпечний сигнал, який свідчить про наявність високих ризиків для загальної безпеки судна. Це пов'язано з невмінням регулювати стресове навантаження в період роботи на судні, що свідчить про те, що наявні вимоги ІМО не виконуються в повному обсязі та не надаються в тренажерних центрах підготовки моряків України.

**Висновки.** Виконане дослідження дозволяє стверджувати, що прояви стресу та його негативний вплив на працівників галузі морського судноплавства – серед завдань, що є пріоритетними в рамках забезпечення безпеки мореплавства. Автори вважають за необхідне підвищення стандартів первинної підготовки моряків та якості її виконання щодо питань стресу в українських морських навчальних закладах та центрах тренажерної підготовки моряків. Також приведення цих стандартів у відповідність до наявних вимог ІМО. Найбільшу увагу слід приділяти відпрацюванню практичних навичок щодо підтримки особистої стресостійкості моряків як у період навчання в навчальних закладах, так і протягом здобування знань у тренажерних центрах підготовки моряків. Актуальним завданням, що потребує вирішення, також є впровадження методів і засобів щодо підвищення рівня розуміння стресу серед українських моряків, його впливу на безпеку судна та зокрема розробка рекомендацій щодо ефективного подолання стресу на борту морських суден, що в майбутньому буде мати позитивний вплив на загальний стан системи безпеки морських суден.

**Список літератури:**

1. International Maritime Organization. Human element vision, principles and goals for the organization. IMO Resolution A.947 (23) adopted on 27 November 2003.
2. Stress effects on the body. American Psychological Association. November 01, 2018. URL: <https://www.apa.org/topics/stress/body>.
3. Dik Gragory & Paul Shanahan. The Human Element. A guide to human behaviour in the shipping industry. 2010.
4. Quick J.C., Quick J.D., Nelson D.L., & Hurrell J.J. Preventative stress management in organizations. Washington, DC : American Psychological Association. 1997.
5. Dr. Martinez de Oses F. Xavier, Ventikos Nikolaos P. A critical assessment of human element regarding maritime safety: issues of planning, policy and practice. 2003.
6. Harvey Catherine, Stanton Neville & Zheng Pengjun. Safety at sea: human factors aboard ship. Transportation research group, faculty of engineering and environment, University of Southampton. 2013.
7. Oluseye O. & Ogunseye O. Human Factors as Determinants of Marine Accidents in Maritime Companies in Nigeria. *Business Journal of maritime research*. 2016.
8. Cooper C.L., Dewe P.J., & O'Driscoll M.P. Organisational stress: A review and critique of theory, research, and applications. London. 2001.
9. Alicia C. Carter-Trahan Lieutenant, United States Navy B.A., San Diego State University. An Examination of the Human Factors Attitudes and Knowledge of Surface Warfare Officers. 2002.
10. Конспект лекцій з курсу «Управління ресурсами містка» – Берегова охорона США, 1996, С. 33, 38.
11. International Maritime Organization. “Leadership and teamwork”. IMO model course 1.39. 2014.
12. International Maritime Organization. “Use of Leadership and managerial skills”. IMO model course 1.40. 2018.
13. International Maritime Organization. “Personal Safety and Social Responsibility”. IMO model course 1.21. 2016.
14. Власні авторські дослідження, виконані авторами публікації протягом 2017–2020 років серед екіпажів суден з українськими моряками.

**Melnyk O.M., Bychkovskiy Yu.V. STRESS FACTOR IN THE SYSTEM OF THE SHIPPING SAFETY**

*Seafarers work under specific conditions, which are inextricably linked with significant social and physical limitations, including a long isolation from the usual life on shore, social environment and surroundings. The above features influence the emergence of stress of different origin, which is considered a protective reaction of the organism, also this concept causes the human state associated with dangerous situations, conflicts, occurrences and consequences of extreme environmental influences and is one of the main factors among the so-called “individual factors of the human element”. Numerous publications on the subject point to the fact that “individual human element factors”, is the second most threatening factor, after fatigue, present in most cases of severe maritime accidents. The study of the phenomenon of this factor has been given considerable attention, both in the publications of domestic and foreign researchers. However, analysis of research materials and numerous works demonstrate problem of insufficient level of awareness and understanding of this phenomenon among crew members of sea-going ships, which, in turn, is not duly perceived directly at the ships and does not work for the system of shipping safety ensuring in whole. Therefore, summarizing experience of ship management and its commercial operation, on the one hand, and taking into account considerable practical experience of command of various types of sea-going ships for certain time, to solve numerous situations onboard the vessel, in which “stress” factor was dominating, this publication offers the author’s approach, in which the method of total stress load reduction for the sea-going ships’ crew members is presented. Application of the proposed method enables, at first directed to reduce the threat of accidents and emergency cases during the voyage, and secondly to optimize the seafarers’ training and education processes at the specialized maritime educational institutions and training centres for seafarers in Ukraine.*

**Key words:** human element, ship safety, stress factor.



**Урум Н.С.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Федунов В.М.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

**Бажак О.В.**

Дунайський інститут водного транспорту  
Державного університету інфраструктури та технологій

## МОДЕЛІ ПРОГНОЗУВАННЯ РУХУ ОБ'ЄКТІВ ПОШУКОВО-РЯТУВАЛЬНОЇ ОПЕРАЦІЇ НА МОРІ

*Під час проведення пошуково-рятувальних операцій на морі важливою проблемою, що потребує рішення, є прогнозування руху об'єктів під впливом течії, вітру, хитавиці. Нині існують математичні моделі руху, однак їх застосування є досить обмеженим. Невизначеність параметрів руху об'єкта пошуково-рятувальних дій призводить до зосередження зусиль пошукових сил у районах, де об'єкт відсутній, до зайвої витрати часу, що може вплинути на ефективність проведення операції загалом.*

*Основними характерними прогнозованими параметрами руху об'єктів на морі, які повинні вимірюватися під час виконання пошуково-рятувальних дій, визначено:*

*1) координати об'єкта географічні (широта, довгота) або пласкі прямокутні (по меридіані та паралелі);*

*2) координати об'єкта полярні щодо спостерігача (пеленг, дистанція);*

*3) елементи руху об'єкта (істинний курс, швидкість).*

*У статті проведено розроблення та узагальнення математичних моделей прогнозування руху об'єктів пошуково-рятувальної операції на морі з урахуванням впливу вітру, течії та хитавиці. Теоретичним дослідженням та комп'ютерним моделюванням методів пошуку та супроводження об'єктів пошуково-рятувальних операцій встановлені найбільш придатні роздільні за параметрами й комбіновані моделі прогнозування руху об'єкта пошуку з оцінкою дій дрейфу, течії, хитавиці.*

*Розроблено математичні моделі фільтрації, згладжування, прогнозування (екстраполяції) траєкторних параметрів за динамічними, кінематичними і статистичними моделями прогнозованих процесів з урахуванням сумарного зносу. Теоретичним дослідженням та комп'ютерним моделюванням методів пошуку та супроводження об'єктів пошуково-рятувальних операцій встановлені найбільш придатні роздільні за параметрами й комбіновані моделі прогнозування руху об'єкта пошуку з оцінкою дій дрейфу, течії, хитавиці.*

*Використання цих моделей доцільне для розроблення алгоритмічного й математичного забезпечення відповідних систем підтримки прийняття рішення.*

**Ключові слова:** *невизначеність, математична модель, пошуково-рятувальна операція, прогноз, система підтримки прийняття рішення.*

**Постановка проблеми.** Одним із найважливіших показників ефективності пошуково-рятувальної операції на морі та забезпечення безпеки мореплавства є своєчасний пошук об'єктів. На морі об'єкти переміщуються під дією власних рушіїв та під впливом постійної течії, вітру, хитавиці та інших факторів. Отже, пошук об'єктів на морі ускладнюється невизначеністю їх положення відносно пошуково-рятувальних сил. Основними характерними прогнозованими параметрами руху

об'єктів на морі, які повинні вимірюватися під час виконання пошуково-рятувальних дій, будуть:

1) координати об'єкта географічні (широта, довгота) або пласкі прямокутні (по меридіані та паралелі);

2) координати об'єкта полярні щодо спостерігача (пеленг, дистанція);

3) елементи руху об'єкта (істинний курс, швидкість).

**Постановка проблеми.** Таким чином, існує необхідність розроблення математичних моделей

фільтрації, згладжування, прогнозування (екстраполяції) траєкторних параметрів за динамічними, кінематичними й статистичними моделями прогнозованих процесів з урахуванням сумарного зносу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У статті використані дослідження вітчизняних [1, 7, 8] та закордонних дослідників [2, 4, 6], які розробляли структуру пошуково-рятувальних операцій на морі, моделі та методи їх проведення. Додатково слід відзначити фундаментальні та прикладні роботи з теорії пошуку об'єктів на морі [4, 11, 14], які використані для формування відповідних математичних моделей. Дослідження, проведені у статті, ґрунтуються на роботах [7, 9, 10, 14].

**Метою статті** є розроблення та узагальнення математичних моделей прогнозування руху об'єктів пошуково-рятувальної операції на морі з урахуванням впливу вітру, течії та хитавиці.

**Виклад основного матеріалу.** Аналіз низки досліджень [1, 5, 6] свідчить, що під час вирішення завдань пошуку та супроводження об'єктів на морі, як правило, використовуються кінематичні моделі прогнозування їх руху першого порядку, що враховують швидкість зміни параметра, який спостерігається, або другого порядку, що враховують швидкість і прискорення зміни цього параметра. На підставі цієї тези та принципів механіки кінематичні моделі будь-якого окремого прогнозованого параметра під час руху об'єкта можна представити у такому загальному вигляді:

$$\tilde{X}_i = \tilde{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i; \quad t_i = T_i - T_{i-1}; \quad (1)$$

$$\tilde{X}_i = \tilde{X}_{i-1} + \hat{V}_i t_i + 0,5 \cdot \hat{a}_i t_i^2; \quad (2)$$

де  $\hat{V}_i, \hat{a}_i$  – згладжені вимірювання або оцінки швидкості та прискорення виміру окремого траєкторного виміру;  $\tilde{X}_i, \tilde{X}_{i-1}$  – прогнозні та попередні виміряні або згладжені значення окремого траєкторного параметра;  $T_i, T_{i-1}, t_i$  – моменти часу та інтервал між вимірами параметру.

Компоненти швидкості та прискорення руху об'єкта на морі можна представити сумою складового власного руху і сумарних впливів зовнішнього середовища, похибок вимірів або оцінки:

$$\hat{V}_i = \hat{V}_{ui} + \hat{V}_{ci}; \quad \hat{a}_i = \hat{a}_{ui} + \hat{a}_{ci}; \quad (3)$$

де  $\hat{V}_{ui}, \hat{a}_{ui}$  – компоненти власної вимірної швидкості та прискорення об'єкта за допомогою лага й датчика кутової швидкості;  $\hat{V}_{ci}, \hat{a}_{ci}$  – компоненти швидкості і прискорення сумарного зносу об'єкта від впливу зовнішнього середовища та похибок.

Компоненти швидкості та прискорення сумарного зносу об'єкта під впливом зовнішнього серед-

овища та похибок можна представити такими складниками:

$$\hat{V}_{ci} = \hat{V}_{di} + \hat{V}_{ti} + \hat{V}_{pi}; \quad \hat{a}_{ci} = \hat{a}_{di} + \hat{a}_{ti} + \hat{a}_{pi}; \quad (4)$$

де  $\hat{V}_{di}, \hat{a}_{di}$  – швидкості та прискорення дрейфу об'єкта пошуково-рятувальної операції під дією вітру;  $\hat{V}_{ti}, \hat{a}_{ti}$  – швидкість та прискорення знесення об'єкта пошуково-рятувальної операції під дією течії;  $\hat{V}_{pi}, \hat{a}_{pi}$  – швидкість та прискорення об'єкта пошуково-рятувальної операції під дією похибок вимірювання.

Складники формули (4) можуть підсилювати або компенсувати один одного. Тому сумарний складник доцільно оцінювати за поточними вимірами.

Спираючись на результати досліджень [9, 10], на основі комбінації різних варіантів формул (1)–(4) залежно від можливостей виміру та визначення вхідних і вихідних даних можуть бути сформовані варіанти незалежних за окремими параметрами та ієрархічно комбінованих із різних параметрів моделі прогнозування руху об'єкта пошуково-рятувальної операції.

Пропонується використовувати математичні моделі прогнозування елементів руху судна першого порядку, типу (1). Ці моделі складаються з незалежних основних кінематичних параметрів: швидкості руху, курсу та географічних координат, що отримуються на основі безпосередніх вимірів та згладжування на судні або шляхом отримання із приладів судна як об'єкта спостереження за допомогою автоматичних ідентифікаційних систем (АІС):

$$\tilde{V}_i = \tilde{V}_{i-1} + \hat{a}_i t_i; \quad \tilde{K}_i = \tilde{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i; \quad (5)$$

$$\tilde{\varphi}_i = \tilde{\varphi}_{i-1} + \hat{V} \varphi_i t_i; \quad \tilde{\lambda}_i = \tilde{\lambda}_{i-1} + \hat{V}_{\lambda i} t_i; \quad (6)$$

де  $\tilde{V}_i, \tilde{K}_i$  – прогнозні значення швидкості та курсу об'єкта пошуково-рятувальної операції;  $\tilde{K}_{i-1}, \tilde{V}_{i-1}$  – попередні виміряні або згладжені значення курсу та швидкості руху об'єкта спостереження;  $\hat{a}_i, \hat{\omega}_i$  – попередні виміри або оцінки лінійного прискорення й кутової швидкості руху об'єкта пошуково-рятувальної операції;  $\tilde{\varphi}_i, \tilde{\lambda}_i$  – прогнозовані значення широти, довготи об'єкта на теперішній момент часу;  $\tilde{\varphi}_{i-1}, \tilde{\lambda}_{i-1}$  – попередні вимірювані (обсервовані) або згладжені значення широти та довготи об'єкта;  $\hat{V} \varphi_i, \hat{V}_{\lambda i}$  – оцінки швидкостей вимірювання координат (широти, довготи) траєкторії руху об'єкта.

Курс, швидкість, широта та довгота об'єкта пошуково-рятувальної операції можуть бути також отримані на основі непрямих вимірів зовнішнім спостерігачем та їх подальшими оцін-

ками. На основі траєкторних вимірів (обсервацій) руху об'єкта з'являється можливість отримання додаткової інформації у вигляді елементів вектора дійсної швидкості об'єкта пошуково-рятувальної операції (щодо ґрунту). Для реалізації цієї мети можна застосувати два підходи [10]. Перший ґрунтується на апроксимації виміряних (обсервованих) або згладжених значень збільшень широти та довготи під час руху об'єкта по локсодромії (при постійних курсах), другий – пов'язаний з використанням швидкостей зміни широти та довготи руху об'єкта за траєкторією з використанням формули:

$$\left\{ \begin{array}{l} tg\hat{\beta} = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta\varphi_{oi}\Delta\lambda_{oi}\cos\hat{\varphi}_i)}{\sum_{i=1}^n \Delta\varphi_{oi}^2}; \\ \hat{V}_g = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta\varphi_{oi}^2 + (\Delta\lambda_{oi}\cos\hat{\varphi}_i)^2)}}{\sum_{i=1}^n t_i^2}; \end{array} \right. \quad (7)$$

$$tg\hat{\beta} = \hat{V}_{\lambda i}\cos\hat{\varphi}_i/\hat{V}_{\varphi i}; \hat{V}_{g i} = \sqrt{\hat{V}_{\varphi i}^2 + (\hat{V}_{\lambda i}\cos\hat{\varphi}_i)^2}; \quad (8)$$

де  $\hat{\beta}$ ,  $\hat{V}_g$  – оцінки дійсної швидкості та шляхового кута руху об'єкта пошуково-рятувальної операції відносно ґрунту на прямолінійній ділянці;  $\Delta\varphi_{oi}$ ,  $\Delta\lambda_{oi}$  – виміряні (обсервовані) або згладжені значення приросту широти та довготи під час руху об'єкта за локсодромією.

За наявності на судні датчика кутової швидкості її вимір та прогнозування також пропонується здійснювати на основі типової моделі першого порядку (1), (5), (6), тобто:

$$\tilde{\omega}_i = \tilde{\omega}_{i-1} + \hat{a}_{\omega i}t_i; \quad (9)$$

де  $\tilde{\omega}_i$  – прогнозні значення швидкості об'єкта пошуково-рятувальної операції;  $\tilde{\omega}_{i-1}$  – попередні виміри або згладжені оцінки кутової швидкості об'єкта пошуково-рятувальної операції;  $\hat{a}_{\omega i}$  – згладжені оцінки кутового прискорення.

У разі спільного використання формул (5) та (9) отримаємо комбіновану модель курсу об'єкта пошуково-рятувальної операції, в якій кутова швидкість знаходиться на нижньому рівні ієрархії.

Після підстановки прогнозованої кутової швидкості об'єкта (9) у формулу (5) отримаємо модель супроводження та прогнозування курсу об'єкта другого порядку, типу (2), тобто:

$$\tilde{K}_i = \tilde{K}_{i-1} + \hat{\omega}_i t_i + 0,5 \cdot \hat{a}_{\omega i} t_i^2; \quad (10)$$

Більш повну модель комплексного використання всіх параметрів рядів траєкторних вимірів для прогнозування руху об'єкта пошуково-рятувальної операції пропонується сформулювати за допомогою традиційних методів аналітичного

числення шляху судна [1, 14]. При цьому прогнозовані дані перерахованих варіантів моделей курсу та швидкості об'єкта (5)–(8) використовуються елементами нижнього рівня ієрархії в комбінованій моделі прогнозування координат руху об'єкта з урахуванням елементів сумарного зносу й залишкових похибок (3), (4) [14]:

$$\left. \begin{array}{l} \tilde{\varphi}_i = \tilde{\varphi}_{i-1} + (\hat{V}_i \cos \tilde{K}_i + \hat{V}_i \cos \tilde{K}_{ci}) t_i \\ \tilde{\lambda}_i = \tilde{\lambda}_{i-1} + (\hat{V}_i \sin \tilde{K}_i + \hat{V}_{ci} \sin \tilde{K}_{ci}) t_i \sec \hat{\varphi}_i \end{array} \right\} \quad (11)$$

де  $\tilde{K}_{ci}$ ,  $\hat{V}_{ci}$  – оцінки значень курсу та швидкості сумарного зносу об'єкта пошуково-рятувальної операції.

Таким чином, модель координат траєкторії руху об'єкта (11) буде відповідати моделі другого порядку (2), що включає прогнозовані значення курсу і швидкості з нижнього рівня ієрархії (5)–(10).

Побудуємо моделі оцінки елементів зносу об'єкта пошуково-рятувальної операції.

Аналіз низки досліджень [6, 8, 9, 14] свідчить, що швидкість дрейфу об'єкта залежить від швидкості та курсового кута вітру, швидкості об'єкта, його форми та розмірів. Часто використовується формула, відома як формула Н.Н. Матусевича [9]:

$$\hat{V}_{di} = k_{\alpha} \cdot W; \quad (12)$$

де  $\hat{V}_{di}$  – швидкість вітрового дрейфу, вуз;  $k_{\alpha}$  – коефіцієнт дрейфу;  $W$  – швидкість уявного вітру, м/с.

Коефіцієнт дрейфу визначається для кожного конкретного типу судна або плавзасобу.

У морехідних таблицях МТ-2000 швидкість вітрового дрейфу представлена в іншому вигляді:

$$\hat{V}_{di} = 1,94k_{\alpha} \cdot U; \quad (13)$$

де  $U$  – швидкість істинного вітру.

У керівництві [13] для розрахунку району, в якому може знаходитися об'єкт пошуково-рятувальних дій, необхідно визначити швидкість та напрямок дрейфу, який складається з двох компонентів: дрейфу у підвітряний бік та сумарної водної течії. Дані про величину цих дрейфів наведені у вигляді таблиці та графіків, вхідними аргументами в яких є швидкість вітру у вузлах та тип плавзасобу.

У різних океанологічних дослідженнях швидкість вітрового плину на поверхні моря, як правило, представляється емпіричною формулою залежно від швидкості вітру та широти місця:

$$\hat{V}_{di} = \frac{k_{TB}}{\sqrt{\sin\varphi}} U, \quad (14)$$

де  $k_{TB}$  – коефіцієнт вітрової течії.

Коефіцієнт вітрової течії визначається зі спостережень, його величина варіюється від 0,04 при

швидкості вітру 2 м/с до 0,012, при швидкості вітру 20 м/с. Найчастіше безпосередньо у вираз (11) підставляється значення коефіцієнта вітрової течії 0,0127. Вітрова течія у відкритому морі відхиляється від напрямку вітру в північній півкулі на 45° праворуч, у південній – на 45° ліворуч під впливом сили обертання Землі. Причому це відхилення не залежить ні від швидкості вітру та течії, ні від широти місця.

Разом із впливом вітру у відкритому морі на об'єкт пошуково-рятувальних дій впливає хитавиця, створюючи додатково хвильову течію. Формула для розрахунку швидкості хвильової течії (см/с) має вигляд:

$$V = \left( (0,5h)^2 \sqrt{\frac{2\pi g}{\lambda}} \right), \quad (15)$$

де  $h$  та  $\lambda$  – висота та довжина хвилі відповідно;  $g$  – прискорення сили тяжіння.

Проведений аналіз свідчить, що виникає необхідність уточнення методик розрахунку складових частин швидкостей переміщення об'єкта в морі під дією зовнішніх впливів. Нині для досягнення цих цілей можуть використовуватися поточні виміри елементів обстановки, на основі яких сучасні інформаційні технології дозволяють значно спростити та уточнити розрахунки порівняно із графіками і номограмами. Це дозволить скоротити час пошуку та підвищити імовірність виявлення об'єкта пошуково-рятувальних дій.

Під час спільної дії на об'єкт вітру, хитавиці, течії практично неможливо оцінювати роздільно елементи зносу та дрейфу і, відповідно, застосовувати діючі методики розрахунків у припущенні дії лише одного із зовнішніх факторів. Тому доцільно оцінювати сумарні елементи зносу об'єкта пошуково-рятувальної операції у формулі (11) за поточними рядами траєкторних вимірів. Перший підхід для отримання оцінок здійснюється через збільшення зчислених координат по попередніх згладжених вимірах курсу та швидкості руху об'єкта й збільшення безпосередньо виміряних координат у такому вигляді:

$$tg\hat{K}_c = \frac{\sum_{i=1}^n [(\Delta\lambda_{oi}\cos\hat{\phi}_i - \hat{V}_i t_i \sin\hat{K}_i) \times (\Delta\phi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos\hat{K}_i)]}{\sum_{i=1}^n (\Delta\phi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos\hat{K}_i)^2}, \quad (16)$$

$$\hat{V}_c = \frac{\sum_{i=1}^n \sqrt{(\Delta\lambda_{oi}\cos\hat{\phi}_i - \hat{V}_i t_i \sin\hat{K}_i)^2 + (\Delta\phi_{oi} - \hat{V}_i t_i \cos\hat{K}_i)^2}}{\sum_{i=1}^n t_i^2}, \quad (17)$$

де  $\hat{K}_c$ ,  $\hat{V}_c$  – оцінки значень курсу і швидкості сумарного зносу об'єкта під час руху по локсодромії (при постійних курсах).

При обчисленнях за формулами (16), (17) одночасно відбувається фільтрація випадкових похибок рядів траєкторних вимірів на основі згладжування проміжних обчислень та кінцевих результатів.

Інший підхід оцінки елементів сумарного зносу запропонований у роботі [10], він ґрунтується на рівності других доданків у формулах (6), (11) та можливості визначення елементів вектора сумарного зносу через оцінки швидкості щодо ґрунту за обсерваціями, згладженими вимірами або прогноз курсу і швидкості об'єкта пошуково-рятувальної операції (5), (10):

$$\left. \begin{aligned} \hat{V}_{\phi_i} - \hat{V}_i \cos\hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \cos\hat{K}_{ci}; \\ \hat{V}_{\lambda_i} \cos\hat{\phi}_i - \hat{V}_i \sin\hat{K}_i &= \hat{V}_{ci} \sin\hat{K}_{ci}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Ділення другого виразу (18) на перший дає оцінку курсу, а піднесення до квадрату обох виразів (18) та їх додавання з урахуванням формули (8) – оцінку швидкості поточних значень сумарного зносу об'єкта:

$$\begin{aligned} tg\hat{K}_c &= (\hat{V}_{\lambda_i} \cos\hat{\phi}_i - \hat{V}_i \sin\hat{K}_i) / (\hat{V}_{\phi_i} - \hat{V}_i \cos\hat{K}_i); \\ \hat{V}_{ci} &= \sqrt{\hat{V}_{\phi_i}^2 + \hat{V}_i^2 - 2\hat{V}_i (\hat{V}_{\phi_i} \hat{V}_i \cos\hat{K}_i + \hat{V}_{\lambda_i} \cos\hat{\phi}_i \sin\hat{K}_i)}. \end{aligned} \quad (19)$$

Оцінку значень вектора зносу за формулами (16), (17), (19), (20) на основі попереднього аналізу, навіть при повній наявності гіпотези постійної дії зовнішніх факторів (течії, вітру, хитавиці), необхідно робити у вигляді ковзного вікна на інтервалах, на яких елементи руху об'єкта пошуково-рятувальних дій підтримуються постійними. Це пов'язано з тим, що дрейф об'єкта від впливу вітру, який входить складовою частиною в сумарний знос об'єкта, буде різним за зміни курсу та швидкості руху об'єкта.

**Висновки та перспективи.** Отже, у статті проведено розроблення та узагальнення математичних моделей прогнозування руху об'єктів пошуково-рятувальної операції на морі з урахуванням впливу вітру, течії та хитавиці. Теоретичним дослідженням та комп'ютерним моделюванням методів пошуку та супроводження об'єктів пошуково-рятувальної операції встановлені найбільш придатні роздільні за параметрами й комбіновані моделі прогнозування руху об'єкта пошуку з оцінкою дій дрейфу, течії, хитавиці. Використання цих моделей доцільне для розроблення алгоритмічного й математичного забезпечення відповідних систем підтримки прийняття рішення.

## Список літератури:

1. Артюшенко В.М. Кинематические и вероятностные характеристики процесса поиска и обнаружения движущегося объекта. *Журнал радиоэлектроники*. 2017. №3. С. 1–25.
2. Баранов Ю.К. Навигация. СПб. Лань. 1997. С. 449.
3. Боран-Кешишьян А.Л. Разработка геоинформационной системы определения координат объектов поиска и спасания при неконтролируемом дрейфе с заданной радиальной погрешностью местоположения. *Эксплуатация морского транспорта*. 2015. № 3. С. 20–24.
4. Безруков Ю.Ф. Океанология. Ч.П. Динамические явления и процессы в океане. Симферополь: Таврический национальный университет им. В.И. Вернадского. 2006. 123 с.
5. Васьков А.С. Оценка сноса судна по траекторным измерениям. *Эксплуатация морского транспорта*. 2015. №2 (75). С. 34–38.
6. Васьков А.С. Прогнозирование и контроль движения судна. *Морские интеллектуальные технологии*. 2019. № 1 (43). Т.2. С. 92–97.
7. Годованюк С.П. Формирование облика единой системы поиска и спасания. *Науковий вісник ХДМА: науковий журнал*. – Херсон: Херсонська державна морська академія. 2016. № 2 (15). С.10–19.
8. Годованюк С.П. Концептуальная модель формирования облика управляемой единой системой поиска и спасания на море. *Вісник інженерної академії України*. 2017. С. 84–88.
9. Грищенко А.А. Сравнение методов расчета дрейфа свободноплавающего объекта на базе натурального эксперимента. *Науковедение*. 2015. №3, т. 7. С.10–18.
10. Грищенко А.А. Некоторые аспекты создания модели движения объекта на море. *Журнал научных публикаций аспирантов и докторантов*. 2013. № 10 (88). С. 285–288.
11. Ким Д.П. Методы преследования и поиска подвижных объектов. Наука, 1989. 336 с.
12. Махин В.П. Влияние волнения на движение судна в условиях ветра. *Эксплуатация морского транспорта*. 2010. №2 (60). С. 29–31.
13. Международный кодекс по спасательным средствам (Кодекс ЛСА). СПб. ЗАО ЦНИИМФ. 2004. 156 с.
14. Мироненко А.А. Методология формализации навигационной обстановки, планирования маршрута и программных траекторий движения судна. Новороссийск: ГМУ им.адм. Ф.Ф. Ушакова. 2016. 48 с.

**Urum N.S., Fedunov V.M., Bajak O.V. MODELS OF FORECASTING THE MOVEMENT OF SEARCH AND RESCUE OPERATIONS AT SEA**

*During conducting search and rescue operations at sea an important problem that needs to be solved is to predict the movement of objects under the influence of currents, wind, and sway. There are currently mathematical models of motion, but their applications are quite limited. Uncertainty of the parameters of the object of search and rescue operations leads to the concentration of search forces in areas where the object is absent, an unnecessary waste of time, which can affect the effectiveness of the operation as a whole. The main characteristic predicted parameters of the movement of objects at sea, which must be measured when performing search and rescue operations, are: 1) geographical coordinates of the object (latitude, longitude) or flat rectangular (meridian and parallel); 2) the coordinates of the object are polar relative to the observer (bearing, distance); 3) elements of object motion (true course, speed). The purpose of the article is to develop and generalize mathematical models for forecasting the movement of objects of search and rescue operations at sea, taking into account the effects of wind, current and sway. The article develops and generalizes mathematical models for forecasting the movement of objects of search and rescue operations at sea, taking into account the effects of wind, current and sway. Theoretical research and computer modeling of methods of search and support of objects of search and rescue operations established the most suitable separate on parameters and combined models of forecasting of movement of object of search with an estimation of actions of a drift, a current, a sway. Mathematical models of filtering, smoothing, forecasting (extrapolation) of trajectory parameters according to dynamic, kinematic and statistical models of predicted processes taking into account the total wear are developed. The use of these models is appropriate for the development of algorithmic and mathematical support for appropriate decision support systems.*

**Key words:** *uncertainty, mathematical model, search and rescue operation, forecast, decision support system.*

**Шевченко Ю.В.**

Національний авіаційний університет

**Акмалдінова В.Є.**

Національний авіаційний університет

**Волковська Г.Г.**

Національний авіаційний університет

## ОЦІНКА ВПЛИВУ ЦИФРОВИХ МОБІЛЬНИХ ДОДАТКІВ НА ТРАНСПОРТНУ ГАЛУЗЬ

*У статті розглянуто вплив цифрових додатків на розвиток транспорту; проаналізовано компоненти цифрових додатків; досліджено загрози впровадження цифрових додатків у транспортній галузі; обґрунтовано необхідність розширення частки цифрових додатків. Об'єкт дослідження – цифрові додатки в транспортній галузі. Мета роботи – визначення впливу цифрових додатків на зростання економіки країни. Методи дослідження – абстрагування, аналіз і синтез, індукція та дедукція, системний підхід. Розширення частки цифрових додатків та прискорення зростання ВВП за рахунок цифровізації входить до кола пріоритетних проблем глобального масштабу й активно вивчається не тільки провідними вченими-економістами в Україні та світі, а також і урядами економічно розвинених країн, поважними міжнародними організаціями, транснаціональними корпораціями. Цифрові технології, послуги та системи зможуть забезпечити зростання і створення нових робочих місць в усіх галузях економіки, починаючи з найменш традиційних підприємств і закінчуючи новітніми високотехнологічними виробництвами, що з'являються сьогодні. Відомо, що інвестиції є основним фактором економічного зростання. Вони мультиплікативно призводять до зростання ВВП. Без достатнього обсягу іноземних інвестицій прогрес у розвитку цифрових технологій буде не дуже відчутний. Основні причини низького рівня іноземних інвестицій, за даними компанії «Dragon Capital», такі: корупція, недовіра до судової системи, нестабільність національної валюти та фінансової системи. Складна геополітична ситуація і, як наслідок, ослаблена економіка вимагає масштабних рішень – діджиталізація може стати причиною економічного стрибка. Поступовий перехід на електронний облік і електронне управління, долучення до міжнародного онлайн-бізнесу – це не вибір, а необхідність.*

**Ключові слова:** цифрові технології, цифрова економіка, цифрова інфраструктура, інновації, економічне зростання.

**Постановка проблеми.** Сучасний стан характеризується перехідною мобільністю. Поєднаний розвиток різних нових технологій (наприклад, інтелектуальних датчиків, блокчейн, штучного інтелекту) стимулює нововведення в цифрових мобільних додатках. Зростаючий тиск щодо досягнення соціальних цілей у транспортному секторі (наприклад, декарбонізація, покращення безпеки руху, зменшення завантаженості) стане ще одним фактором, що сприятиме розвитку інтелектуальної мобільності. Однак існує ще багато проблем для реалізації програм цифрових мобільних додатків таким чином, щоб максимізувати вигоди й одночасно мінімізувати будь-які негативні наслідки. Відсутність гармонізації у національному законодавстві та відсутність соціального сприйняття – лише два приклади таких

питань може перешкодити їх широкомасштабному розгортанню. Це дослідження надає огляд найрелевантніших програм цифрових мобільних додатків та їх основних нових технологій для всіх видів транспорту (наприклад, автомобільного, залізничного, судноплавного та авіаційного) на період до 2030 року. Оцінюється їх вплив на транспортну систему та суспільство.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Наскільки нам відомо, вплив цифрових програм цифрових мобільних додатків на доступність транспортної системи не вивчали в літературі до теперішнього часу. Більше уваги приділялося вивченню цифрової економіки взагалі. Питання досліджень впливу цифрової економіки висвітили в наукових працях такі дослідники, як: Б. Ван Арк, Р. Інклар, М. Тіммер, Д. Сіфчлаг, А. Крімес, Р. Клео,

Ф. Стівінс, Т. Нібель, В. Айзексон, С. Бранд, Дж. Вейлз, Е. Вільямс, Б. Гейтс, Б. Елбрехт, Д. Енгельбарт, Дж. Ліклайдер, Дж. Фон Нейман, Е. Петерс, С. Хантінгтон, С. Халлер. Проблеми розвитку цифрової економіки та трансформаційні процеси розглядали вітчизняні та зарубіжні вчені, зокрема В. Апалькова, С. Веретюк, П. Друкер, С. Коляденко [1], І. Карчева, Б. Кінг, Р. Ліпсі, Л. Лямін, І. Малик, О. Никифорок [2–3], В. Пілінський, Ю. Пивоваров, К. Скінер, Е. Тоффлер, В. Фіщук, К. Шваб, Ю. Шевченко [13–14] та інші. Т. Нібель проаналізував феномен зіткнення інформації і технології, вплив нових комунікаційних засобів на процеси економічного зростання. С. Коляденко досліджує основні етапи становлення цифрової економіки. В роботі І. Малик розглянуті проблеми переходу від індустріального до інформаційного суспільства, тенденції розвитку цифрової економіки в Україні. Сучасним напрямом досліджень може стати аналіз впливу цифрової економіки на покращення макроекономічних показників країни [4].

**Постановка завдання.** Метою статті є розглянути вплив цифрових додатків на розвиток транспорту; проаналізувати компоненти цифрових додатків; дослідити загрози впровадження цифрових додатків у транспортній галузі; обґрунтувати необхідність розширення частки цифрових додатків.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Рівень зрілості різних новітніх технологій дуже різняться. Деякі вже широко застосовуються (наприклад, розумні датчики, технології підключення), хоча подальший розвиток очікується в наступне десятиліття. Інші технології (наприклад, штучний інтелект) знаходяться в потенційному прориві, але програми лише починають їх використовувати, виявляючи, що вже можливо і що ще потрібно розвивати.

Згадані вище нові технології є ключовими рушіями розвитку інтелектуальної мобільності додатків. Найбільш перспективні програми:

– Кооперативні інтелектуальні транспортні системи (C-ITS) – це інтелектуальні програми транспортних систем (наприклад, транспортні засоби, обладнання інфраструктури, центри управління дорожнім рухом), що дозволяють спілкуватися та ділитися інформацією з метою підвищення безпеки дорожнього руху, ефективності руху, стійкості тощо.

– Підключена кооперативна автоматизована мобільність (CCAM) включає різні рівні допомоги та автоматизованого водіння. Вона варіюється від допоміжних функцій для водія, таких

як автоматизований круїз-контроль, до повністю автоматизованих транспортних засобів.

– Мобільність як послуга (MaaS) – це інтеграція різних видів транспортних послуг в одну послугу мобільності, доступну за запитом. Вона пропонує користувачам транспорту доступ до планування, бронювання та пропонує заплатити за цілу низку транспортних послуг, до яких програма може легко отримати доступ.

– Самоорганізована логістика (SoL) відноситься до децентралізованої координації логістичних ланцюгів, тобто окремі агенти ланцюга (наприклад, компанії, транспортні засоби, контейнери) роблять рішення автономними на основі місцевої розвідки та місцевих даних.

Вплив на транспорт і суспільство. Очікується, що програми цифрових мобільних додатків дадуть значні переваги, зокрема, користувачам транспорту шляхом підвищення ефективності транспорту (наприклад, більшої гнучкості) та покращення досвіду подорожей (наприклад, вищого рівня відчуття комфорту). Крім того, програми цифрових мобільних додатків також можуть мати потенціал, який суттєво сприятиме досягненню суспільних цілей, таких як менший рівень викидів CO<sub>2</sub>, поліпшення дорожнього руху безпеки та сприятиме зменшенню заторів. Наскільки цей потенціал буде реалізований, залежить від його конструкції та управління державними органами (з такими діями, як законодавство, фінансування, пілотування та державна приватна співпраця).

Повний вплив розумної мобільності буде реалізований лише у довгостроковій перспективі. По-перше, тому, що більшості додатків потрібна критична маса, щоби стати повною мірою ефективною. По-друге, цифрові мобільні додатки стануть більш ефективними у наступні десятиліття завдяки технологічним удосконаленням.

Нарешті, докази щодо впливу цифрових мобільних додатків доступні лише в невеликих масштабах, дослідженнях сценаріїв та дослідженнях заявлених переваг. Отже, невизначеність у цих висновках є високою.

Вплив на транспортну інфраструктуру. Розгортання програм цифрових мобільних додатків вимагає добре розвиненої цифрової інфраструктури. Розвиток, доступність, безпека та управління цифровою інфраструктурою повинні бути ключовими пріоритетами в політиці інтелектуальної мобільності. Оскільки тривалість життя та потреби користувачів цифрової інфраструктури широко різняться з інфраструктури та не узгоджується з розвитком інфраструктури, потрібні

специфічні (але інтегровані) стратегії для різних рівнів транспортної інфраструктури. Це вимагає тісну співпрацю як між різними зацікавленими сторонами, так і між різними рівнями інфраструктури, які керовані різними сторонами із спільними обов'язками.

Виклики впровадженню інтелектуальної мобільності. Щоб полегшити та пришвидшити розгортання програм цифрових мобільних додатків, потрібно вирішити багато проблем. Хоча кожна окрема програма має свої проблеми, деякі загальні проблеми можна ідентифікувати. Вони є як технічними, так і економічними та соціальними, і всі є однаково важливими. Покращення прийняття користувачами та громадськістю, розроблення життєздатних бізнес-кейсів, гарантування даних конфіденційними, забезпечення гармонізованої та безпечної інфраструктури обміну даними та забезпечення сумісності між країнами / регіонами та режимами є одними з основних викликів для впровадження цифрової програми мобільності.

Проаналізуємо вплив програм цифрових мобільних додатків на 3 основні напрями: транспортний попит, соціальні наслідки, економічні наслідки.

1. Транспортний попит. Вплив більшості цифрових додатків на попит на автомобільний транспорт, як очікується, буде низьким/незначним (5). Тільки програми значно знижують середню швидкість (і, отже, збільшують загальну тривалість подорожі), як сигналізація про обмеження швидкості руху в транспортному засобі, може вплинути на транспортні потреби певною мірою. Однак деякі цифрові мобільні додатки можуть впливати на загальну кількість пробігу автомобіля.

Наприклад, інтелектуальні програми маршрутизації та програми, що надають інформацію про паркування, можуть спричинити меншу загальну кількість пробігу автомобіля. З іншого боку, додатки інтелектуальної маршрутизації також можуть забезпечити найшвидші маршрути, які займають більше пробігу. Отже, вплив на загальну кількість пробігу транспортного засобу невідомий.

Для позашляхових режимів також, як правило, не передбачається використання цифрових мобільних додатків (та управління дорожнім рухом), що суттєво впливають на загальний транспортний попит. Однак зменшення пробігу автомобіля може бути досягнуто і для цих режимів. Наприклад, у межах державно-приватного партнерства SESAR очікується, що інноваційні служби управління повітряним рухом можуть зменшити авіаційну відстань на маршруті на до 2,5% [6].

Власник транспортного засобу. Можливе встановлення в машині технологій, що зробить транспортні засоби готовими до впровадження конкретних цифрових мобільних додатків, що збільшить виробничі витрати на транспортний засіб, а отже, і закупівельні ціни. Це підвищення закупівельних цін може стримувати придбання (і право власності) на транспортні засоби. Однак для більшості цифрових мобільних додатків це витрати на транспортний засіб, ймовірно, відносно низькі (TRL, 2017), і тому ми очікуємо, що цей вплив дуже малий/незначний.

Модальний зсув. Для різних видів транспорту стверджується, що застосування додатків C-ITS може покращити привабливість цих режимів через підвищену ефективність руху (тобто зменшення часу в дорозі).

Наприклад, Ricardo & TRT [7,8] підрахували, що розгортання набору програм C-ITS в дорозі може призвести до незначного зрушення (менше 1%) від поїздів та авіап перевезень до автомобілів та автобусів. З іншого боку, розгортання європейської системи управління дорожнім рухом на залізничному транспорті ERTMS, як стверджується, сприяє модальному переходу від авіаційного та автомобільного транспорту до залізничного транспорту [9]. Наскільки нам відомо, не було проведено жодного аналізу, включаючи додатки CITS для всіх видів транспорту, а отже, і загальний зсув модальних видів. Вплив на всю транспортну систему є невизначеним (і може суттєво відрізнитися між різними ситуаціями).

Ефективність транспорту. Однією з головних переваг C-ITS є підвищення ефективності транспорту, якого можна досягти [10], особливо з точки зору кращого використання вже існуючих потужностей інфраструктури. При транспортуванні це приводить до зменшення завантаженості. У залізничному транспорті такі рішення, як інноваційні системи підтримки прийняття рішень у реальному часі для прогнозування та адаптивних операційних процесів.

Очікується, що контроль руху поїздів та система управління дорожнім рухом ERTMS значно може збільшити пропускну здатність залізниці, зменшивши прогрес між поїздами [10]. Стверджується (але не підтверджено), що застосування ERTMS може забезпечити до 30% більше потужностей на існуючи в даний час інфраструктуру [11]. В авіації також збільшена сумісність повітря-земля та повітря-повітря використання технологій C-ITS може сприяти оптимізації використання повітряного простору та наземних ресурсів [10].

Досвід подорожей. Використання програм C-ITS у автомобільному транспорті може мати



позитивний вплив на досвід подорожей. Підвищене почуття комфорту, безпеки та зменшення стресу та невизначеності були виявлені у [5] як драйвери цих позитивних впливів. Наприклад, рекомендації щодо оптимальної швидкості зеленого світла та попередження про затори були згадані як програми, що призводять до підвищення рівня комфорту, тоді як додатки, такі як попередження про перешкоди та попередження про поломку автомобіля, сприяють зростанню почуття безпеки. [5] спеціально зазначає, що може бути кращою і в режимі реального часу забезпечити значну додану вартість для мандрівників та перевізників, оскільки це дає їм можливість робити кращі рішення, наприклад, при виборі маршруту.

Більш надійні та коротші терміни поїздки можуть також допомогти залізничному транспорту та авіації, що надають додатки, такі як адаптивний оперативний контроль руху поїздів на залізничному транспорті та системи управління авіаційним транспортом в авіації [5], що сприяє кращій подорожі.

2. Соціальні наслідки. Безпека руху. Вплив застосувань C-ITS на безпеку дорожнього руху оцінювався в різних дослідженнях та проектах [7]. Результати цих досліджень показують, що їх існує декілька додатків C-ITS, які можуть суттєво сприяти запобіганню зіткненням транспортних засобів. Відповідно до [9], програми, для яких технологія є досить зрілою а співвідношення користі та витрат є позитивними, слід застосовувати у короткому терміні. У цьому відношенні програми, що мають найбільший потенціал підвищення безпеки, мають бути пріоритетними. Наприклад, платформа C-ITS рекомендує використовувати програми, які показані в таблиці 1.

Вплив цих індивідуальних заявок на зменшення кількості смертельних випадків коливається від 1,3% до 6,9%, тоді як для числа травм цей діапазон коефіцієнтів зниження становить 1,1–7,0%.

[7] також вивчали вплив транспортної безпеки на кілька сценаріїв розгортання широкого набору програми C-ITS, включаючи програми, згадані в таблиці 1. Сукупні чисті переваги зменшення трафіку аварії в країнах ЄС 27 та у Великобританії на період 2020–2035 рр. оцінюються у 98 млрд євро. У найменш амбіційних сценаріях загальна чиста вигода все ще дорівнювала 15 млрд євро, що відповідає зменшенню на 3700 смертельних випадків та майже 250 000 травм у цей період.

У позадорожніх режимах також для покращення трафіку використовуються C-ITS та додатки для управління безпекою дорожнього руху. Наприклад, у залізничному транспорті безпека є одним із ключових пріоритетів у розвитку автоматизованої системи захисту поїздів (ATP), вдосконалене планування траєкторії руху та інноваційні системи сигналізації (включаючи ERTMS) [10]. В авіації додаток SURF-ITA – це попередження про дорожній рух для пілотів в аеропорту операцій, що підвищує безпеку, забезпечуючи сповіщення льотного екіпажу у разі ризику зіткнення на землі, використання кооперативних систем, що приймають сигнали від навколишнього руху [12].

Затори. Розгортання додатків C-ITS може зробити значний внесок у зменшення міських заторів. Рікардо та ін. [7] підраховали, що широкомасштабне впровадження цифрових мобільних додатків на автомобільному транспорті може призвести до соціальної вигоди (тобто економії часу подорожі) у розмірі 218 млрд. євро в період 2020–2035 рр. У ЄС27 та Великобританії у грошовому вираженні ця потенційна перевага цифрових мобільних додатків значно більша, ніж покращена безпека руху та зменшення впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище.

Для ілюстративних цілей вплив вибору окремих цифрових мобільних додатків на (міські) рівні заторів показані в таблиці 2.

Таблиця 1

## Додатки C-ITS, орієнтовані на безпеку дорожнього руху та їх вплив

№	Програма C-ITS	Середнє скорочення в кількості смертельних випадків	Середнє скорочення в кількості травм
1	Обмеження швидкості руху в транспортному засобі	6,9	3,9
2	Аварійне електронне гальмівне світло	2,7	2,5
3	Попередження про дорожні роботи	1,3	1,1
4	Метеорологічні умови	3,4	3,4
5	Повідомлення про небезпечне розташування	4,1	3,1
6	Безпека перехрестя	3,8	7,0
7	Захист вразливих учасників дорожнього руху	1,8	1,9

Джерело: [7], на основі огляду широкого кола досліджень

Скорочення часу подорожі в небезпечному місці. Зокрема, інформація про дорожній рух та інтелектуальна маршрутизація має велике значення при потенціалі зменшення заторів. Оптимізація маршрутів на основі потоків руху, світлофорів та обмежень швидкості і пропозиції щодо зміни маршруту на основі інформації про дорожній рух в реальному часі, може призвести до 8% скорочення часу на поїздки в міській місцевості.

Доступність. Беручи до уваги той факт, що більшість цифрових мобільних додатків орієнтовані на ефективність транспорту, проблеми безпеки чи навколишнього середовища, очікується, що вплив на доступність не буде значним.

3. Економічні наслідки. Вплив на промисловість. Вивчається вплив розгортання цифрових мобільних додатків на європейську економіку та промисловість [7]. Для трьох сценаріїв політики, що відрізняються за рівнем та швидкістю, на якій вони діють стимулюючи використання програм C-ITS, вони оцінили вплив на ВВП та зайнятість. Обидва наслідки були позитивними, але незначними. Наприклад, у найбільш амбіційному політичному сценарії, припускаючи обов'язкове розгортання зв'язку V2V, ВВП ЄС 27 та Великобританія збільшаться на 0,02% у 2030 році і 0,03% у 2035 р. За цим сценарієм у 2030 р. в ЄС 27 та Великобританії буде реалізовано 93 000 додаткових робочих місць, які будуть сприяти збільшенню на 0,014% загальної європейської зайнятості. Слід зазначити, що це всі економічні наслідки на рівні ЄС. На рівні окремих галузей або регіонів наслідки можуть бути більше значними (і потенційно також негативними).

Фінансові наслідки для кінцевих споживачів. Фінансовий вплив на кінцевих споживачів є незначним, особливо через діючі бізнес-моделі і заявки на цифрові мобільні додатки все ще незначені [7]. Основна невизначеність у цьому плані полягає в тому, хто буде платити попередні

інвестиції в транспортну інфраструктуру. Якщо ці інвестиції фінансуються державою, витрати на послуги цифрових мобільних додатків для кінцевих користувачів можуть бути незначними. Однак, якщо ці інвестиції є для фінансування приватними, то ці витрати, ймовірно, будуть передані кінцевим споживачам відносно високими цінами на користування послугами цифрових мобільних додатків.

**Висновки.** Основними цілями цифрових мобільних додатків є підвищення безпеки руху та / або ефективності транспорту (включаючи зменшення заторів) та / або екологічні показники. За цими показниками цифрові мобільні додатки добре оцінюються, як це також зазначено в таблиці 3.

Для більшості показників існує значна впевненість у напрямі та рівні впливу. Однак що стосується впливу застосувань цифрових мобільних додатків на володіння транспортними засобами, перемикання видів транспорту, доступність та фінансові наслідки для кінцевого споживача, наявні докази не є остаточними. Особливо невизначеність щодо фінансових наслідків для кінцевого споживача є важливою, оскільки це безпосередньо пов'язано з труднощами розроблення життєздатного бізнес-аргументу для цифрових мобільних додатків, що є однією з основних проблем для розгортання цих додатків на великому масштабі ринку.

Очікується, що вплив цифрових мобільних додатків з часом збільшиться. Насамперед тому, що ефективніші додатки вийдуть на ринок. Але ще й тому, що очікується, що кількість заявок збільшиться із збільшенням кількості транспортних засобів (та інфраструктури), обладнаних для виготовлення використання цих додатків (оскільки для повного використання переваг цифрових мобільних додатків необхідна критична маса додатків, як уже згадувалося раніше).

Таблиця 2

**Програми цифрових мобільних додатків, орієнтовані на переважання та їх вплив**

№	Додаток C-ITS	Вплив на затори (з погляду середньої швидкості або часу подорожі)
1	Повідомлення про небезпечне місце знаходження	Зменшення часу на проїзд міськими дорогами на 2%
2	Запит пріоритету сигналу дорожнього руху від призначення транспортних засобів	на 9,2% скорочення часу проїзду автобусів у міських районах
3	Інформація про дорожній рух та інтелектуальна маршрутизація	Зниження на 8% часу на поїздки в міських районах
4	Інформація про паркування та управління	Зменшення часу подорожей у міських районах на 0,6%

Джерело: [7], на основі огляду широкого кола досліджень

## Підсумок впливів цифрових мобільних додатків

№	Показник	Вплив показника
1		<b>Вплив на транспортний сектор</b>
1.1	Транспортний попит	Вплив на транспортний попит, як очікується, буде низьким.
1.2	Власність транспортних засобів	Вплив на власність транспортних засобів є непевним, але, мабуть, невеликим.
1.3	Ефективність транспорту	Цифрові мобільні додатки покращують транспортну ефективність, особливо з точки зору кращого використання існуючої потужності інфраструктури.
1.4	Модальний зсув	Оскільки цифрові мобільні додатки можуть покращити привабливість усіх видів транспорту, загалом вплив на модальний розкол невідомий (також тому, що він не вивчався до сіх пір).
1.5	Досвід подорожей	Цифрові мобільні додатки покращать досвід подорожей, наприклад надаючи більше комфорту, покращення почуття безпеки, більш надійний час у дорозі тощо.
2		<b>Соціальні наслідки</b>
2.1	Безпека дорожнього руху	Цифрові мобільні додатки можуть суттєво сприяти підвищенню рівня безпеки дорожнього руху.
2.2	Затори	Цифрові мобільні додатки можуть суттєво сприяти зниженню рівня заторів.
2.3	Доступність	Вплив цифрових мобільних додатків на доступність невизначений, але, ймовірно, не суттєвий.
3		<b>Економічні наслідки</b>
3.1	Вплив на промисловість	Впровадження цифрових мобільних додатків може мати незначний позитивний вплив на європейську промисловість (ВВП, зайнятість). Ці наслідки можуть сильно варіюватися між галузями та регіонах.
3.2	Фінансові наслідки для кінцевих користувачів	Фінансовий вплив цифрових мобільних додатків для кінцевих споживачів залежить від бізнес-моделей, які будуть застосовані і досі залишаються дуже невизначеними.

Нарешті, наслідки застосування цифрових мобільних додатків можуть мати місце як у міських, так і у сільських районах, залежно від розглядання конкретного типу заявки. Такі додатки, як GLOSA та інформація про паркування, при-

значені в основному для міських районів, тоді як обмеження швидкості руху в транспортних засобах, як очікується, будуть мати більші наслідки у сільській місцевості (на міжміських дорогах та автомагістралях).

## Список літератури:

1. Коляденко С.В. Цифрова економіка: передумови та етапи становлення в Україні і у світі / С.В. Коляденко // Економіка. Фінанси. Менеджмент. – 2016. – № 6. – С. 106–107.
2. Никифорук О.І., Стасюк О.М., Чмирьова Л.Ю., Федяй Н.О. Цифровізація в транспортному секторі: тенденції та індикатори розвитку Частина 1 // Статистика України. 2019. № 3. С. 70–81. Doi:10.31767/su.3(86)2019.03.08.
3. Nykyforuk, O.I., et al. "Digitization in the Transport Sector: Development Trends and Indicators. Part 2." Statistics of Ukraine 87.4 (2019): 48–64.
4. Клименко І.С. Вплив цифрової економіки на економічний розвиток світу / І.С. Клименко, О.В. Федорук // Економіка та управління на транспорті. – К.: НТУ, 2018. – Вип. 7.
5. TNO report: Final Development of a European Defence Technological and Industrial Base. Main report / [F. Bekkers, M. Butter, E. Anders Eriksson та ін.]. – Delft: TNO, 2009. – 151 с.
6. Sustainability, airspace optimisation and urban air mobility – focus of latest very large-scale demonstrations. URL: <https://www.sesarju.eu/news/sustainability-airspace-optimisation-and-urban-air-mobility-focus-latest-very-large-scale>
7. HILL N, CLARKE D, BLAIR L, MENADUE H Ricardo Energy & Environment. Circular Economy Perspectives for the Management of Batteries used in Electric Vehicles URL: [https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790\\_jrc\\_circular\\_econ\\_for\\_ev\\_batteries\\_ricardo2019\\_final\\_report\\_pubsy\\_online.pdf](https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC117790/jrc117790_jrc_circular_econ_for_ev_batteries_ricardo2019_final_report_pubsy_online.pdf)

8. C-ITS Platform. Final report. URL: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/themes/its/doc/c-its-platform-final-report-january-2016.pdf>
9. Islam, Dewan Md Zahurul, and Thomas H. Zunder. "Experiences of rail intermodal freight transport for low-density high value (LDHV) goods in Europe." *European Transport Research Review* 10.2 (2018): 1–14.
10. National energy efficiency targets – Absolute level of energy consumption in 2020 (Mtoe) as notified from Member States in 2016, in the NEEAP 2016 or in a separate notification to the European Commission in 2016 and 2017 URL: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/energy-efficiency-directive>
11. UNIFE – THE EUROPEAN RAIL INDUSTRY. Annual Report. URL: <https://www.unife.org/component/attachments/attachments.html?id=321&task=download>
12. The invitation for new SAFE Trust Fund applications is now open until 9 February 2018. <https://www.pempal.org/ru/node/33>
13. Revin, V., & Shevcheko, Y. (2019). The opportunities and challenges of implementation of blockchain in aviation industry. *Молодий вчений*, (4 (2)), 206-209, с. 206–209.
14. Шевченко Ю.В. Проблеми впровадження інформаційних технологій на підприємства різних форм бізнесу. - *Молодий вчений*, 2016, № 5, с. 190–194.

**Shevchenko Yu.V., Akmalidina V.Ye., Volkovska H.H. ASSESSMENT**

**OF THE IMPACT OF DIGITAL MOBILE APPLICATIONS ON THE TRANSPORT INDUSTRY**

*The article considers the impact of digital applications on the development of digital additions are analyzed; the threats of introduction of digital applications in the transport industry are investigated; the need to expand the share of digital applications is substantiated. The object of research is digital applications in the transport industry. The purpose of the work is to determine the impact of digital applications on the economic growth of the country's economy. Research methods – abstraction, analysis and synthesis, induction and deduction, system approach. Expanding the share of digital applications and accelerating GDP growth through digitalization is one of the priority issues of global scale and is actively studied not only by leading economists in Ukraine and the world, but also by governments of economically developed countries, reputable international organizations and multinational corporations. Digital technologies, services and systems will be able to grow and create new jobs in all sectors of the economy, from the smallest traditional enterprises to the latest high-tech industries that are emerging today. It is known that investment is a major factor in economic growth. They multiply lead to GDP growth. Without sufficient foreign investment, progress in the development of digital technologies will not be very tangible. The main reasons for the low level of foreign investment, according to Dragon Capital, are: corruption, distrust of the judiciary, instability of the national currency and financial system. The difficult geopolitical situation and, as a result, the weakened economy require large-scale solutions – digitization can cause an economic leap. The gradual transition to e-accounting and e-government, joining the international online business is not a choice but a necessity.*

**Key words:** digital technologies, digital economy, digital infrastructure, innovations, economic growth of transport, economic growth.

## БУДІВНИЦТВО

УДК 624.012.45

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/42>**Азізов Т.Н.**

Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

**Срібняк Н.М.**

Сумський національний аграрний університет

**Циганенко Л.А.**

Сумський національний аграрний університет

### ВИЗНАЧЕННЯ КРУТИЛЬНОЇ ЖОРСТКОСТІ ЗАЛІЗОБЕТОННОГО ЕЛЕМЕНТА В НОРМАЛЬНІЙ ТРІЩИНІ

У статті показано, що зміна крутильної жорсткості залізобетонних елементів у результаті утворення нормальних тріщин не враховується в жодному нормативному документі. Крім того, у наукових дослідженнях, присвячених жорсткості при крученні залізобетонних елементів, розглядаються тільки просторові тріщини. Наведено методику визначення зусиль у поздовжній арматурі й стиснутій зоні бетону за дії крутного моменту з урахуванням дії нагельних сил як у горизонтальному, так і вертикальному напрямках. Для визначення зусиль у бетоні й арматурі залізобетонного елемента з нормальною тріщиною розглянуто плоский поворот перерізу відносно центру кручення. Показано, що крутильна жорсткість залізобетонного елемента з нормальною тріщиною складається з декількох складників. Це жорсткість чистого кручення стиснутої зони бетону й арматурних стержнів, жорсткість у результаті зсуву стиснутої зони бетону й арматурних стержнів у горизонтальному та вертикальному напрямках. Зсув відбувається в результаті повороту всього перерізу відносно центру кручення. При визначенні жорсткості від зсуву арматури в результаті повороту перерізу щодо центру жорсткостей урахується згин арматури, а також змінання бетону під арматурним стержнем. Показано, що при малій висоті стиснутої зони бетону нагельні сили в арматурі, визначені за запропонованою методикою, практично повністю збігаються із силами, визначеними в програмі Ліра з використанням об'ємних скінчених елементів. При збільшенні висоти стиснутої зони бетону похибка зростає. Однак, так як крутильна жорсткість елемента зменшується практично лінійно зі збільшенням висоти нормальної тріщини, запропоновано визначати її з малою висотою стиснутої зони за запропонованою методикою. Далі запропоновано визначити жорсткість елемента без тріщин. Усі проміжні значення для різних висот тріщини запропоновано визначати виходячи з лінійного закону між максимальною і мінімальною жорсткостями.

**Ключові слова:** кручення, нормальна тріщина, нагельна сила, крутильна жорсткість, залізобетонний елемент, арматура.

**Постановка проблеми.** Відомо, що перерозподіл зусиль у статично невизначених системах, що деформуються просторово (перекрыття, мостові споруди тощо), зусилля між окремими елементами перерозподіляються [1; 4]. Цей перерозподіл залежить від співвідношення крутильних і згинальних жорсткостей окремих елементів системи [1; 3; 7]. У залізобетонних системах на згинальну і крутильну жорсткості істотно впливають різні тріщини [6; 8]. Зміну згинальних жорсткостей у результаті утворення нормальних тріщин можна

враховувати різними способами, у тому числі точними [5; 6; 8; 12].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Що ж стосується зміни крутильних жорсткостей, то вітчизняні норми [8] не містять рекомендацій щодо їх визначення. У європейських та американських нормах [18; 21], а також у наукових публікаціях [9–11; 19; 20] містяться рекомендації, що стосуються міцності й деформативності залізобетонних елементів з просторовими тріщинами. Однак при експлуатації великого класу

конструкцій (плити перекриття, мостові балки тощо) з'являються тільки нормальні й похилі тріщини, які суттєво змінюють не тільки згинальну, а й крутильну жорсткості [2; 17]. Питання дослідження крутильних жорсткостей за наявності в залізобетонних елементах тільки нормальних тріщин практично не розглянуто в літературі. Цьому питанню присвячені роботи автора статті [2; 16; 17]. У цих роботах показано, що одним із основних завдань із визначення крутильної жорсткості залізобетонного елемента є задача визначення нагельної сили в поздовжній арматурі в місці наявності нормальної тріщини. Після визначення нагельної сили задача обчислення крутильної жорсткості елемента з нормальною тріщиною вирішується просто.

У роботі [13] запропоновано спосіб визначення крутильної жорсткості елемента з нормальними тріщинами. Однак у цій роботі не врахована робота стиснутої зони бетону на зсув, що є істотною похибкою. У роботі [15] усунуто цей недолік і запропоновано спосіб визначення нагельної сили безпосередньо з розгляду деформацій в тріщині. У цій праці як приклад розглянуто елемент з однією поздовжньою арматурою. На практиці частіше зустрічаються випадки, коли залізобетонний елемент армується декількома стержнями поздовжньої арматури.

**Постановка завдання.** У зв'язку з вищесказаним метою статті є розвиток методу, запропонованого в роботі [15], для визначення нагельної сили в поздовжній арматурі з урахуванням зсуву не тільки бетону, а й арматури у двох напрямках.

**Виклад основного матеріалу.** Нехай є залізобетонний елемент із нормальною тріщиною, армований двома стрижнями арматури. Для визначення нагельних сил у поздовжній арматурі розглянемо деформований стан безпосередньо в нормальній тріщині (рис. 1). На рис. 1 заштрихована частина означає зону бетону без тріщин. Так як нормальні тріщини утворюються в результаті дії згинальних моментів, ця зона є стиснутою зоною бетону. Тому в подальшому ми будемо оперувати цим визначенням.

Для розрахунку застосуємо підхід, описаний у роботі [15], для чого розглянемо плоский поворот усього перерізу відносно центру кручення  $O$ . При цьому, як і в праці [15], розглянемо елемент з однією товщиною (розмір у напрямку осі  $Y$  на рис. 1 дорівнює одиниці). Тому й кут повороту перерізу  $\Theta$  буде відносним кутом закручування.

З причини симетрії перерізу в напрямку осі

$X$  центр жорсткостей  $O$  знаходиться в середині ширини перерізу. У напрямку осі  $Z$  положення центру жорсткостей  $O$  (центру кручення) визначиться за відомою формулою [2] для визначення центра ваги перерізу з урахуванням приведення модуля зсуву арматури до модуля зсуву бетону.

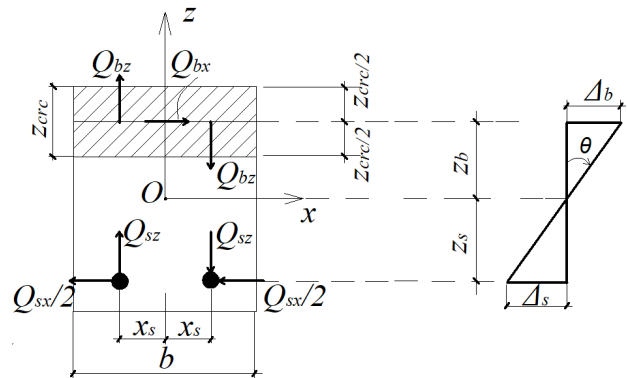


Рис. 1. Схема зусиль (а) і повороту (б) в перерізі з тріщиною

На рис. 1, б через  $\Delta_b$  позначено переміщення в бетонній частині перерізу на рівні центра ваги цієї частини; через  $\Delta_s$  – переміщення на рівні центра ваги арматури. Якщо задано значення відносного кута повороту  $\Theta$ , то (див. рис. 1)  $\Delta_b = \Theta \cdot Z_b$ ;  $\Delta_s = \Theta \cdot Z_s$ .

При повороті перерізу відносно центру жорсткостей зовнішній крутний момент  $M$  сприймається за рахунок опору чистому крученню  $M_{s,b}$  та опору зсуву при повороті всього перерізу  $M_\omega$ . Причому цей момент складається з моменту сил  $Q_{sx}$  та  $Q_{bx}$  відносно точки  $O$  й діючих у горизонтальному напрямку, а також моменту сил  $Q_{bz}$  та  $Q_{sz}$  відносно тієї ж точки. На рис. 1 через  $Q_{bz}$  позначені рівнодіючі вертикальних сил зсуву ліворуч і праворуч від осі  $Z$ .

Момент, що сприймається за рахунок чистого кручення, визначається за відомою формулою опору матеріалів [14]:

$$M_{s,b} = \theta(GJ_b + 2 \cdot GJ_s), \quad (1)$$

де  $GJ_b$  – крутильна жорсткість бетонного прямокутника зі сторонами  $Z_{crc}$  та  $b$  відносно його центра ваги;  $GJ_s$  – крутильна жорсткість одного арматурного стержня відносно його центра ваги.

Крутний момент від сил  $Q_{bx}$  та  $Q_{sx}$  дорівнює:  $M_{Q_{bx}} = (Q_{bx} = Q_{sx}) \cdot (Z_s + Z_b)$ . Очевидно, що з умови рівноваги на ось  $X$  виконується рівність  $Q_{bx} = Q_{sx}$ .

Для визначення крутного моменту від зсуву у вертикальному напрямку розіб'ємо стиснуту зону елемента по ширині на деяке число  $2 \cdot n + 1$  прямокутних елементів (рис. 2).

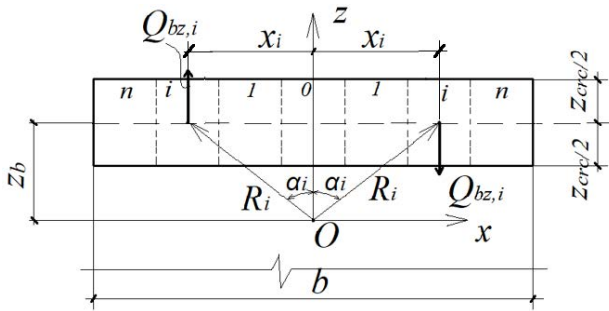


Рис. 2. Схема поділу стиснутої зони бетону по ширині елемента

Центр ваги і-того елемента знаходиться на відстані  $R_i$  від центру ваги  $O$  всього перерізу. Його положення визначається радіус-вектором  $R_i$  з куту нахилу до вертикальної осі  $\alpha_i$  (див. рис. 2).

При повороті прямокутника шириною  $b$  і висотою  $Z_{crc}$  у складі всього перерізу елемента з трищиною на деякий кут  $\Theta$ , вертикальні сили зсуву  $Q_{bz,i}$  в кожному і-тому елементі будуть залежати від радіус-вектора  $R_i$  й кута повороту  $\alpha_i$  [15].

На рис. 3 наведена схема до визначення повного переміщення  $\Delta$  центру ваги і-того елемента при повороті всього перерізу відносно центра кручення на кут  $\Theta$ , а також складників  $\Delta_x$  і  $\Delta_z$  цього переміщення.

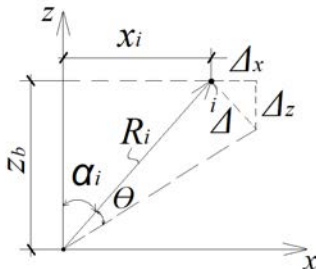


Рис. 3. Схема до визначення переміщень і-того елемента від повороту відносно центра кручення на кут  $\Theta$

Повне переміщення  $\Delta$  елемента при повороті на кут  $\Theta$  дорівнює (див. рис. 3):

$$\Delta = \theta \cdot R_i \quad (2)$$

Горизонтальна  $\Delta_x$  і вертикальна  $\Delta_z$  складника з урахуванням виразу (2) та рис. 3 визначаються за формулами:

$$\Delta_x = \theta \cdot R_i \cos \alpha_i, \quad (3)$$

$$\Delta_z = \theta \cdot R_i \sin \alpha_i \quad (4)$$

Кут  $\alpha_i$  визначається за рис. 2 та 3 з геометричних міркувань.

Розподіл по ширині перетину виконано за такою схемою (див. рис. 2). Центр ваги нульового елемента знаходиться на осі  $Z$ . Елементи

$i=1 \dots n$  знаходяться симетрично справа і зліва. Це пов'язано з фактом, що сили  $Q_{z,i}$  діють симетрично, але в протилежних напрямках.

З рис. 3 можна бачити, що чим далі від осі  $Z$  знаходиться і-й елемент (чим більше відстань  $X_i$ ), тим більше вертикальний складник  $\Delta_z$  повного переміщення  $\Delta$  від повороту перерізу на кут  $\Theta$  і, відповідно, тим більше вертикальний складник  $Q_{z,i}$  зсуву стиснутої зони бетону.

Водночас зсув  $\Delta_x$  в горизонтальному напрямку і  $\Delta_z$  у вертикальному напрямку визначаються за формулами опору матеріалів [14]:

$$\Delta_x = Q_{bx,i} / (G_b A_{b,i}); \quad \Delta_z = Q_{bz,i} / (G_b A_{b,i}), \quad (5)$$

де  $A_{b,i}$  – площа малого і-го прямокутника (див. рис. 2).

Підставляючи (5) у (3) та (4), отримаємо вирази для сил  $Q_{bx,i}$  та  $Q_{bz,i}$ :

$$Q_{bx,i} = \theta \cdot G_b R_i A_{b,i} \cos \alpha_i, \quad (6)$$

$$Q_{bz,i} = \theta \cdot G_b R_i A_{b,i} \sin \alpha_i. \quad (7)$$

Величина  $R_i$  визначається з рисунка 3:

$$R_i = Z_b / \cos \alpha_i. \quad (8)$$

Момент  $M_\omega^x$  від зсуву бетонної частини в горизонтальному напрямку в результаті повороту всього перерізу відносно центра кручення  $O$  визначиться за формулою (див. рис. 1):

$$M_\omega^x = \sum_{i=0}^{2n} Q_{bx,i} Z_b. \quad (9)$$

Підставляючи (8) у (6), а потім, підставляючи (6) для  $Q_{bx,i}$  в (9) і урахувавши, що  $\sum_{i=0}^{2n} A_{b,i} = A_{crc}$  (де  $A_{crc} = Z_{crc} \cdot b$  – площа стиснутої зони), отримаємо:

$$M_\omega^x = \theta \cdot G_b A_{crc} Z_b^2 \quad (10)$$

Розглянемо тепер момент  $M_\omega^z$ , який сприймається за рахунок зсуву стиснутої зони бетону у вертикальному напрямку. Цей момент дорівнює (див. рис. 2):

$$M_\omega^z = 2 \cdot \sum_{i=1}^n Q_{bz,i} X_i \quad (11)$$

Множник 2 у формулі (11) означає, що сили  $Q_{bz,i}$  створюють момент як зліва від осі  $Z$ , так і праворуч (див. рис. 2). Крім того, нульовий елемент (що знаходиться по центру на осі  $Z$ ) не бере участі в сприйнятті моменту від зсуву у вертикальному напрямку. Тому підсумовування ведеться від одиниці до  $n$ .

Підставивши (8) у вираз (7) для  $Q_{bz,i}$ , отримаємо:

$$Q_{bz,i} = \theta \cdot G_b Z_b A_{b,i} \operatorname{tg} \alpha_i \quad (12)$$

З рис. 3 легко бачити:

$$Z_b = X_i / \operatorname{tg} \alpha_i \quad (13)$$

Підставляючи у (12) вираз для  $Z_b$  за (13), а потім цей вираз для  $Q_{bz,i}$  в (11) і скорочуючи на  $\operatorname{tg} \alpha_i$ , отримаємо:

$$M_\omega^z = 2 \cdot \theta \cdot G_b \cdot \sum_{i=1}^n A_{b,i} X_i^2 \quad (14)$$

Для визначення моменту від сил  $Q_{sx}$  і  $Q_{sz}$  в арматурних стержнях при повороті перерізу відносно центру кручення  $O$  на кут  $\Theta$  будемо керуватися тими ж міркуваннями, що й при виведенні формул для моменту від зсуву стисненого бетону при повороті перерізу. У результаті момент, що сприймається арматурними стрижнями в результаті їх зсуву і згину, буде дорівнювати:

$$M_{\omega,s} = 2 \cdot G_{s,ekv} k_{nag} A_s (Z_s^2 + X_s^2) \quad (15)$$

При цьому у виразі (15) модуль зсуву арматури прийнятий рівним еквівалентному модулю  $G_{s,ekv}$ . Еквівалентний модуль зсуву повинен бути прийнятий (причому  $G_{s,ekv} < G_s$ ) таким чином, щоб сумарне переміщення від зсуву такого еквівалентного стрижня дорівнювало переміщенню від зсуву і згину реального стрижня на одиничній довжині. Тому величину  $G_{s,ekv}$  неважко визначити за відомими формулами опору матеріалів.

Коефіцієнт  $K_{nag}$  враховує змінання бетону під арматурним стрижнем, його величина визначається відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [2].

Повний момент, що сприймається перерізом у тріщині, буде дорівнювати сумі моментів за (1), (10), (14) і (15):

$$M = \theta \left( GJ_b + 2 \cdot GJ_s + G_b A_{crc} Z_b^2 + 2 \cdot G_b \cdot \sum_{i=1}^n A_{b,i} X_i^2 + 2 \cdot G_{s,ekv} k_{nag} A_s (Z_s^2 + X_s^2) \right) \quad (16)$$

Відмінність виразу (16) від формули (15), яка наведена в праці [15], полягає в наявності доданка, що враховує момент від зсуву арматури у вертикальному напрямку у зв'язку з наявністю двох стержнів поздовжньої арматури. Модуль зсуву арматури  $G_s$  при визначенні жорсткості її чистого кручення (другий доданок у формулі 16) приймається рівним реальному модулю зсуву.

Перший і другий складник виразу (16) є жорсткостями чистого кручення відповідної стиснутої зони бетону й арматурних стрижнів. Третій і четвертий складники – жорсткості в результаті зсуву стиснутої зони бетону, відповідно, у горизонтальному й вертикальному напрямках. П'ятий доданок означає жорсткість у результаті зсуву арматурних стержнів у горизонтальному й вертикальному напрямках.

Знаючи частку крутного моменту, що припадає на арматурні стержні, неважко визначити значення нагельних сил в арматурі  $Q_{sx}$  та  $Q_{sz}$ .

$$Q_{s,x} = 2 \cdot G_{s,ekv} k_{nag} A_s Z_s; \quad Q_{s,z} = 2 \cdot G_{s,ekv} k_{nag} A_s X_s \quad (17)$$

Задача з кількома стрижнями поздовжньої арматури вирішується із застосуванням такого ж підходу.

Порівняння розрахунків за запропонованою методикою з розрахунками в програмному комплексі Ліра-Сапр із застосуванням об'ємних скінчених елементів показує гарний збіг. При малих величинах  $Z_{crc}$  (малій висоті стиснутої зони бетону) збіг теоретичних даних із даними чисельного розрахунку практично повний, що говорить про достовірність запропонованої методики. При збільшенні висоти стиснутої зони бетону похибка зростає, однак застосування запропонованої методики може бути цілком виправдано з таких причин. Розрахунки в програмі Ліра із застосуванням об'ємних скінчених елементів показують, що крутильна жорсткість залізобетонного елемента з нормальною тріщиною зменшується практично лінійно зі збільшенням висоти нормальної тріщини. Тому можна визначити крутильну жорсткість елемента з малою висотою стиснутої зони  $Z_{crc}$  за виразом (16), а потім визначити жорсткість елемента без тріщини. Усі проміжні значення для різних висот тріщини легко визначаються з лінійного закону.

Після визначення нагельних сил величину взаємного зсуву берегів нормальної тріщини, а також жорсткості перерізу в нормальній тріщині не важко визначити за формулами, які наведені в праці [2; 16; 17].

Запропонований підхід неважко поширити й на елементи непрямокутного перерізу. При цьому варто також розглянути плоский поворот відносно центру кручення з повною аналогією всіх міркувань, наведених у статті.

**Висновки.** У статті наведено методику визначення зусиль у поздовжній арматурі і стиснутій зоні бетону з урахуванням їх дії як у горизонтальному, так і вертикальному напрямках. Для визначення зусиль у бетоні й арматурі елемента з нормальною тріщиною розглянуто плоский поворот перерізу відносно центру кручення. Зовнішній крутний момент сприймається за рахунок чистого кручення, а також за рахунок зсуву в поздовжній арматурі й бетоні у двох напрямках. Наведено формулу для визначення кожного складника загальної крутильної жорсткості.

При малій висоті стиснутої зони бетону нагельні сили в арматурі, визначені за запропонованою методикою, практично повністю збігаються із силами, визначеними в програмі Ліра з використанням об'ємних скінчених елементів. Усі проміжні значення крутильної жорсткості для різних висот тріщини запропоновано визначати, виходячи з лінійного закону між максимальною та мінімальною жорсткостями.

У перспективі передбачається поширення методики на врахування нелінійних властивостей бетону і арматури.



## Список літератури:

1. Азизов Т.Н. Теория пространственной работы перекрытий. Киев : Науковий світ, 2001. 276 с.
2. Азизов Т.Н., Кочкарев Д.В. Определение нагельной силы в продольной арматуре при кручении железобетонных элементов с нормальными трещинами. *Sciences of Europe*. 2020. Vol. 1. № 58 (2020). P. 36–40.
3. Айвазов Р.Л., Лапицкий И.В. Сборное перекрытие, опёртое по контуру и работающее с поперечным распором. *Бетон и железобетон*. 1991. № 11. С. 7–9.
4. Байков В.Н. Расчёт сборного панельного перекрытия на местную продольную линейно-сосредоточенную нагрузку. Проектирование железобетонных конструкций. Москва : Стройиздат, 1966. 380 с.
5. Бамбура А.М. Аналітичне описання діаграми механічного стану арматури для залізобетонних конструкцій. *Будівельні конструкції : міжвідомчий науково-технічний збірник*. Київ : НДІБК, 2003. Вип. 59. С. 131–136.
6. Бамбура А.М., Барашиков А.Я., Гурківський О.Б. Основні положення розрахунку бетонних та залізобетонних конструкцій по національному нормативному документу (ДБН), що розробляється. *Будівельні конструкції*. Київ : НДІБК, 2005. Вип. 62 : у 2 т. Том 1. С. 131–136.
7. Дроздов П.Ф. Конструирование и расчёт несущих систем многоэтажных зданий и их элементов. Москва : Стройиздат, 1977. 223 с.
8. ДСТУ Б В.2.6-156: 2010. Конструкції будинків і споруд Бетонні та залізобетонні конструкції з важкого бетону. Правила проектування. Київ : Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2010. 166 с.
9. Елагин Э.Г. Расчет перемещений железобетонных стержней прямоугольного сечения на стадиях работы с трещинами при совместном кратковременном действии моментов и продольной силы. *Строительная механика и расчет сооружений*. 1991. № 4. С. 26–31.
10. Карпенко Н.И. Теория деформирования железобетона с трещинами. Москва : Стройиздат, 1976. 208 с.
11. Коуэн Г.Дж. Кручение в обычном и предварительно напряженном железобетоне / пер. с англ. Москва : Изд-во литературы по строительству, 1972. 104 с.
12. Кочкарьов Д.В. Нелінійний опір залізобетонних елементів і конструкцій силовим впливам : монографія. Рівне : О. Зень, 2015. 384 с.
13. Красин Н.А. Расчеты крутильной жесткости железобетонных конструкций мостов с учетом влияния трещин : автореф. дисс. ... канд. техн. наук. Ташкент, 1994. 16 с.
14. Феодосьев В.И. Соппротивление материалов. Москва, 1999. 592 с.
15. Azizov T.N. Accounting The Shift of The Compressed Area of Concrete in Two Directions in The Torsion of a Reinforced Concrete Element With Normal Crcks. *Sciences of Europe*. 2021. Vol. 1. № 73. P. 42–46.
16. Azizov T.N. Determination of Displacement of a Reinforced Concrete Element in a Normal Crack. *Sciences of Europe*. 2021. Vol. 1. № 62. P. 34–38.
17. Azizov T., Jurkowska N., Kochkarev D. Basis of calculation on torsion for reinforced concrete structures with normal cracks (2019) Proceedings of the fib Symposium 2019: Concrete – Innovations in Materials, Design and Structures. P. 1718–1725.
18. American Concrete Institute (ACI) “Building Code Requirements for Reinforced Concrete,” ACI 318-89 and “Commentary.” ACI 318R-89. Detroit, 1989. 353 p.
19. Collins M.P., Mitchell D. Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams. *Journal of the Prestressed Concrete Institute*. 1980. Vol. 25. № 4. P. 32–100.
20. Cowan H.J. Torsion of a rectangular elastic isotropic beam reinforced with rectangular helices of another material. *Applied Scientific Research, Section A*. 1952. Volume 3. Issue 5. P. 344–348.
21. EN 1992: Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1: General rules and rules for buildings. Brussels, 2002. 230 p.

**Azizov T.N., Sribniak N.M., Tsyhanenko L.A. DETERMINATION OF THE TORSIONAL STIFFNESS OF A REINFORCED CONCRETE ELEMENTS IN A NORMAL CRACK**

*It is shown that, as a result of the formation of normal cracks in reinforced concrete elements, the change in the torsional stiffness of these elements is not taken into account in any regulatory document. In addition, in scientific research dedicated to the torsional stiffness of reinforced concrete elements, only spatial cracks are considered. The article presents a method for determining the forces in longitudinal reinforcement and the depth to the neutral axis of concrete under the action of a torque. This takes into account the action of the shifting forces in both the horizontal and vertical directions. It is considered a flat rotation of the section relative to the center of torsion to determine the forces in concrete and reinforcement of a reinforced concrete element with*

*a normal crack. It is shown that the torsional stiffness of a reinforced concrete element with a normal crack consists of several components. This is the stiffness of the pure torsion of the compressed zone of concrete and reinforcing bars, the stiffness due to displacement of the compressed zone of concrete and reinforcing bars in the horizontal and vertical directions. The shift occurs as a result of the turn of the entire section relative to the torsion center. In determining the stiffness of a section due to reinforcing bar shear as a result of the section turn relative to the center of stiffness, the bending of the rebar, as well as the crumpling of concrete under the reinforcing bar, are taken into account. It is shown that at a low depth to the neutral axis, the shear forces in the reinforcing bar, determined by the proposed method, almost completely coincide with the forces determined by the Lira software package using volumetric finite elements. The error increases with an increase in the depth to the neutral axis of concrete. However, since the torsional stiffness of an element decreases almost linearly with an increase in the height of a normal crack, in the article it is proposed to determine the torsional stiffness with a low depth to the neutral axis according to the proposed method. Further, it is proposed to determine the stiffness of the element without cracks. It has been proposed that all intermediate values for different crack heights should be defined by the linear relation between maximum and minimum stiffness.*

**Key words:** *torsion, normal crack, shear force, torsional stiffness, reinforced concrete element, reinforcement.*

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/43>**Нікулін О.Ф.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Добряк Д.О.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Крикун О.М.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Кравченко Н.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Савченко О.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Луценко Ю.В.**

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

## ЩОДО ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІКАРБОНАТУ АБО ІНШОГО ПОЛІМЕРНОГО МАТЕРІАЛУ ЯК ЛЕГКОСКИДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ У ВИБУХОНЕБЕЗПЕЧНИХ ВИРОБНИЧИХ ПРИМІЩЕННЯХ

У цій статті проведено аналіз джерел інформації з питань противибухового захисту приміщень та будинків у разі внутрішнього дефлаграційного вибуху газо-, паро-, пилоповітряної суміші за допомогою легкоскидних конструкцій. Зазначено, що скління є найпоширенішим видом легкоскидних конструкцій, але не завжди площі скління в огорожувальних конструкціях досить для зниження надлишкового тиску до допустимого значення. Розглянуто джерела інформації щодо використання полікарбонату у промисловому будівництві, зокрема в частині визначення можливості використання полікарбонату як легкоскидної конструкції усередині виробничих приміщень промислових об'єктів. Альтернативою звичайному склу в огорожувальних конструкціях і у ліхтарях можуть бути легкі і міцні, вогнестійкі полімерні матеріали. Розглянуто фізико-механічні характеристики полікарбонату та інших полімерів, а також різноманітні способи механічного впливу, що призводять до руйнування полімерного матеріалу. Виділено три типові випадки механічного впливу, такі як ударні впливи, тривалі дії у разі постійного навантаження, періодичні впливи. Зазначено, що аварійні вибухи можуть мати детонаційний і дефлаграційний характер. Описано основні характеристики та відмінності вибухів. Визначено основні принципи вибухобезпеки об'єктів та способи їх досягнення. Наведено характерні особливості скла, які слід враховувати у разі його використання як легкоскидних конструкцій. Використання склопакетів та армованого скла як легкоскидних конструкцій не допустиме. За результатами аналізу фізико-механічних характеристик вибраних матеріалів зроблено висновки щодо можливого їх використання як легкоскидних конструкцій. Наведено переваги фізико-механічних характеристик полікарбонату порівняно з іншими полімерами, такі як значна міцність на розтягнення, на стиснення, на вигин та значну ударну міцність і в'язкість. Зважаючи на значну міцність полікарбонату, використання його як легкоскидної конструкції може бути вирішене за допомогою руйнування елементів кріплення. Звернено увагу на те, що для визначення можливості використання полікарбонату як легкоскидних конструкцій потрібне проведення експериментальних досліджень.

**Ключові слова:** легкоскидні конструкції (ЛСК), параметри легкоскидних конструкцій, допустимий надлишковий тиск, детонаційний і дефлаграційний вибухи, полікарбонат.

**Постановка проблеми.** Використання скління будинків як легкоскидних конструкцій (далі – ЛСК) натеper є одним з найбільш ефективних і поширених конструктивних рішень, але не завжди площі скління в огорожувальних конструкціях

досить для зниження надлишкового тиску до допустимого значення [1–8]. Альтернативою звичайному склу в огорожувальних конструкціях і у ліхтарях можуть бути легкі і міцні, вогнестійкі полімерні матеріали, насамперед полікарбонат.

**Формування цілі статті.** Метою цієї статті був аналіз джерел інформації з питань протипожевого захисту виробничих будинків і споруд у разі внутрішнього дефлаграційного вибуху газо-, паро-, пилоповітряної суміші за допомогою легкоскидних конструкцій з полікарбонату або інших вогнестійких полімерів для зниження надлишкового тиску вибуху до допустимого значення.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Розглянуто джерела інформації [1–16] щодо використання полікарбонату у промисловому будівництві, зокрема в частині визначення можливості використання полікарбонату як легкоскидної конструкції (ЛСК) всередині виробничих приміщень промислових об'єктів.

**Виклад основного матеріалу.** Розглянемо фізико-механічні характеристики полікарбонату та інших полімерів [9].

Листовий монолітний (суцільний) полікарбонат (ПК) є найміцнішим з усіх прозорих матеріалів, що існують на світовому ринку і виробляються у промислових масштабах. Унікальність експлуатаційних характеристик забезпечує затребуваність листового ПК у таких галузях, як автомобілебудування, будівництво, військова техніка, виробництво спортивного спорядження, засоби безпеки та антивандальні конструкції, рекламна індустрія.

Позаяк усі листові ПК виготовляються практично з однакових за характеристиками марок сировинного грануляту (у всіх компаній-виробників ПК існують спеціальні екструзійні марки для виробництва монолітних і стільникових листів), основні властивості матеріалів різних виробників мало відрізняються один від одного. У таблиці 1 наведені фізико-механічні та експлуатаційні характеристики деяких з них [9].

Аналіз даних таблиці 1 дозволяє зробити висновок, що листовий ПК має високу стійкість до ударів. У графі значень ударної в'язкості зразка без надрізу зазначено: «без руйнувань» – це означає, що зразок листового ПК неможливо зруйнувати лабораторними методами. Якщо співвіднести дані показника ударної в'язкості зразка ПК з відповідними показниками для інших листових матеріалів, наприклад, для оргскла 14–17 (без надрізу) і 4–5 (з надрізом), для полістиролу 5–6 (без надрізу) і 1–2 (з надрізом), то можна приблизно оцінити величину цієї фізичної характеристики в 900–1100 кДж/м<sup>2</sup> (без надрізу). Ця величина ілюструє екстремальну ударну міцність матеріалу [9].

Ще одна особливість листового ПК – висока стійкість до низьких і високих температур. Діапазон температур певного використання досить

широкий – від -50°C до +150°C. Тому полікарбонат беззастережно може застосовуватися в будь-яких найскладніших кліматичних умовах.

Крім того, ПК має досить високі параметри вогнестійкості: група горючості – Г1, група займистості – В2, група димоутворювальної здатності – Д2.

Різноманітні способи механічного впливу, що призводять до руйнування полімерного матеріалу, можна віднести до трьох типових випадків: [10–13] ударні впливи, тривалі дії у разі постійного навантаження, періодичні впливи.

Ударна дія означає деформування тіла з великою швидкістю. Якщо ця швидкість перевищує швидкість звуку, то зразок руйнується в місці прикладання навантаження, якщо не перевищує, то зразок руйнується по всьому об'єму за механізмом крихкого руйнування. Пластична деформація до руйнування зразка не встигає розвинутися скільки-небудь значною мірою.

«Пластичність» і «крихкість» – це лише умовні терміни, а те, яким чином руйнування відбувається насправді, залежить від конкретних обставин. Пластичність можна кількісно охарактеризувати відносним подовженням або відносним зменшенням поперечного перерізу. Далі пластичність залежить від температури, швидкості деформації, а також від виду напруженого стану.

Будь-який процес руйнування відбувається в два етапи: спочатку утворюється тріщина, потім вона поширюється. Характер руйнування дуже сильною мірою залежить від механізму поширення тріщини. Для пластичних матеріалів характерно те, що попереду зростаючої тріщини і навколо неї розвивається ділянка пластичних деформацій. При цьому процес поширення тріщини відбувається відносно повільно. Такі тріщини часто характеризують терміном «стабільні». У цьому разі матеріал чинить опір подальшому розвитку тріщини, якщо тільки напруга не збільшується. Крім того, візуально спостерігаються великомасштабні деформації на поверхні руйнування у вигляді смуг крутіння і розтягування. У разі ж крихкого руйнування, навпаки, тріщина поширюється дуже швидко без яких-небудь помітних пластичних деформацій. Тріщину в цьому разі характеризують як нестійку, а розвиток тріщини після того, як вона виникла, відбувається спонтанно без збільшення докладеної напруги.

Руйнування термопластичних полімерів, до яких відносять полікарбонат, можливо як по пластичному, так і по крихкому механізму, причому для багатьох полімерів може спостерігатися

Технічні характеристики листового монолітного полікарбонату [9]

Характеристика	Метод	Од. вим.	Значення для різних виробників		
			Barlo PC, PC UVP	Paltuf, Palsan	Axxis Sunlife
Щільність	ISO 1183	г/см <sup>3</sup>	1,2	1,18	1,2
Модуль пружності у разі згину	ISO 178	МПа	н/д	2600	н/д
Межа міцності у разі вигину	ISO 178	МПа	> 95	> 90	> 95
Модуль пружності у разі розриву	ISO 527	МПа	2200	2000	2200
Межа міцності у разі розриву	ISO 527	МПа	60	65	60
Подовження у разі розриву	ISO 527	%	80	90	100
Ударна в'язкість по Шарпі зразка з надрізом	ISO 179	кДж/м <sup>2</sup>	> 40	н/д	> 30
Ударна в'язкість по Шарпі зразка без надрізу	ISO 179	кДж/м <sup>2</sup>	без разр.	без разр.	без разр.
Ударна в'язкість по Ізоду зразка з надрізом	ASTM D 256	Дж/м	н/д	800	600–800
Теплостійкість по методу Vicat	ISO 306	°С	145	150	145
Температура прогину (А)	ISO R 75	°С	135	130	135–140
Температура розкладання		°С	> 280	н/д	> 280
Мін. температура використання		°С	-60	-75	-100
Макс. температура використання		°С	+130	+120	+130
Макс. температура тривалого теплового навантаження		°С	+115	+100	+115

Примітка: н/д – немає даних

перехід від пластичного до крихкого руйнування. Крихкому руйнуванню сприяють такі чинники, як зниження температури і збільшення швидкості деформації, а також наявність гострих надрізів, збільшення товщини зразка і будь-яка модифікація хімічної структури полімеру, яка призводить до збільшення температури склоутворення.

Ще одним ефектом, що часто спостерігається до моменту руйнування термопластичних полімерів, є крейзінг. Він виникає в ділянках з локалізованим розвитком пластичних деформацій, які призводять до утворення безлічі мікропор, що з'єднуються між собою. Між мікропорами утворюються фібрилярні містки, а макромолекулярні ланцюги переорієнтуються.

Якщо діючі напруги досить великі, то містки розтягуються і руйнуються, що призводить до зростання і злиття мікропор. Як наслідок цього, починає утворюватися тріщина.

Опір полімерів ударним навантаженням характеризується так званою ударною в'язкістю, величина якої, що виражається в Дж/м<sup>2</sup>, чисельно дорівнює роботі руйнування, віднесеної до одиниці площі поперечного перерізу зразка.

Ударна міцність є технічною характеристикою полімерного матеріалу. Під ударною міцністю розуміють здатність матеріалу опиратися докладним з великою швидкістю навантаженням. Ця характеристика полімерних матеріалів затверджена стандартами. У цьому разі полімерний матеріал випробовується на поперечний удар,

ударне розтягнення, ударне стиснення або на багаторазовий удар. Швидкість навантаження не більше 1 м/с. Найбільше застосування знайшов поперечний удар, який реалізується на маятниковому копрі [10–11].

Є велика група випробувань, що дозволяють оцінити механічні властивості матеріалів у разі ударного впливу зі швидкістю 2–4 м/с. Зразок, розташований на опорах, руйнується під дією вільно падаючого маятника, що обертається навколо горизонтальної осі. Позаяк вимір зусиль і деформацій при цих швидкостях ускладнює випробування, зазвичай визначають роботу, витрачену на руйнування (по різниці енергій маятника до і після удару за зразком). Енергія удару витрачається на зародження тріщини і на її розвиток.

Це випробування проводять у разі ударного вигину зразка, що вільно лежить на двох опорах, ударом молота по його середині (за Шарпі). При цьому визначають ударну в'язкість за формулою:

$$a = A/F, \quad (1)$$

де  $A$  – робота, витрачена на руйнування зразка;  $F$  – площа поперечного перерізу зразка у місці надрізу.

Ударна в'язкість визначається як характеристиками міцності, так і деформаційними властивостями матеріалу, оскільки робота руйнування являє собою інтеграл напружень за деформаціями  $l$ :

$$a = c \cdot \sigma_p \cdot l_p \quad (2)$$

де  $l_p$  – гранична деформація під час удару;

$\sigma_p$  – ударна міцність;  
 $c$  – коефіцієнт, значення якого змінюється від 0,5 до 1. Звідси ясно, що неправильно ототожнювати ударну в'язкість з ударною міцністю.

Під час крихкого руйнування (малі значення  $l_p$ ) ударна в'язкість мала; у разі переходу від крихкого руйнування до пластичного ударна в'язкість різко збільшується.

Вплив на ударну в'язкість температури, складу і структури матеріалу також залежить від того, як ці фактори впливають на  $\sigma_p$  і  $l_p$ . У разі підвищення температури  $\sigma_p$  зменшується, а  $l_p$  зростає, і їх добуток може змінюватися по-різному. Великі значення ударної в'язкості, як видно з формули (2), означають, що матеріал і досить міцний, і еластичний, а малі значення, що матеріал або неміцний, або дуже крихкий.

У США, Англії та інших країнах використовують випробування на ударний вигин консольно закріпленого зразка з надрізом по Ізоду (рис. 1).

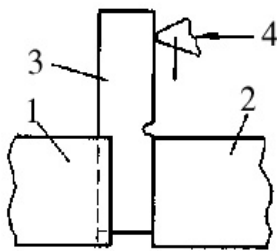


Рис. 1. Схема кріплення зразка під час випробування на ударний вигин по Ізоду: 1 – нерухома опора; 2 – рухома опора; 3 – зразок; 4 – ребро ударного молота маятника

У разі високої пластичності (наприклад, у разі деяких термопластів) визначити ударну в'язкість

важко: зразки під час удару не руйнуються, а лише прогинаються. У таких випадках ударну в'язкість  $a_n$  визначають на зразку з надрізом, зробленим приблизно на 1/3 його товщини. Співвідношення  $k=a_n/a$  називається коефіцієнтом ослаблення.

Руйнування пластичних матеріалів можна здійснити і без надрізу шляхом багаторазового ударного вигину, визначаючи залежність  $a$  від числа ударів; при цьому матеріал характеризується значенням  $a_m$ , що відповідає певному числу ударів (зазвичай близько  $10^5$ – $10^6$ ). Співвідношення  $a_m/a$  характеризує опір втомі під час удару; у разі  $5 \cdot 10^5$  ударах його значення може змінюватися від 0,001 до 0,3. Склад матеріалу менше впливає на  $a_m$ , ніж на  $a$ . У таблиці 2 наведені значення ударної в'язкості деяких пластмас. Досить широко проводять спеціальні випробування на удар по Дінстату (для малих зразків); на ударне розтягнення зразків, що не руйнуються у разі згинання; на ударне проривання плівки падаючою кулею. Випробування на удар по Дінстату полягає у визначенні роботи руйнування під час удару молотом по пластині розміром 10x15 мм (товщина 1,5–4,5 мм) уздовж лінії її закріплення у затискачі.

У таблиці 3 наведено для порівняння характеристики стільникового, монолітного полікарбонату і скла [15].

Беручи до уваги властивості полікарбонату, а саме міцність, ударну в'язкість і ударну міцність, легкість порівняно із звичайним склом, зрозуміла його затребуваність у будівництві, включаючи будівництво промислових об'єктів з вибухонебезпечними технологічними процесами.

У посібнику [1] наведено вказівки для обстеження і проєктування будівельних конструкцій

Таблиця 2

Значення ударної в'язкості полікарбонату та деяких пластмас [11]

Матеріал	$a$ , кДж/м <sup>2</sup>	$a_n$ , кДж/м <sup>2</sup>	$a_m$ , кДж/м <sup>2</sup>
Полікарбонат на основі бісфенола А	150	40	–
Полігексаметіленсе бацінамід	40% зразків не руйнується	3	–
Поліамід П-АК7	100% зразків не руйнується	3	–
Поліетилен низької щільності	100% зразків не руйнується	16	2
Поліпропілен	80	–	–
Політрифторхлоретілен	80% зразків не руйнується	8	–
Політетрафторетілен	100% зразків не руйнується	23	–
Поліметілметакрилат	15	–	4
Вініпласт	170	15	–
Амінопласти	5–11	1–2	–
Волокніт на основі бавовняної целюлози	10	9	–
Фенопласт К-18-56	4	3	1
Фенопласт іцірований каучуком (ФКП-1)	11	4	1
Склопластик АГ-4С	100	–	4

Примітки:  $a$ ,  $a_n$ ,  $a_m$  – відповідно зразки без надрізу, з надрізом і після навантаження  $5 \cdot 10^5$  ударами

приміщень, будівель і споруд, які можуть піддаватися впливу аварійних вибухів газо-, паро-, пилоповітряних горючих сумішей (ГС) або вибухових речовин (ВР).

Аварійні вибухи можуть мати детонаційний і дефлаграційний характер. Детонаційні вибухи в атмосфері характеризуються спільним рухом ударної хвилі і хімічної зони горіння з надзвучовою швидкістю або швидкістю близькою до швидкості звуку. У момент підходу ударної хвилі до перешкоди тиск стрибком підвищується від атмосферного  $P_0$  до значення  $P_0 + \Delta P_\phi$  у фронті хвилі, а потім поступово зменшується.

Позначення  $\Delta P_\phi$  використовується у посібнику [1] для детонаційних вибухів, для дефлаграційних вибухів було прийнято  $P_\phi$ .

Модель детонаційного вибуху реалізується під час вибухів зброї масового ураження звичайних вибухових речовин, наприклад тротилу, і здебільшого під час підриву сумішей вуглеводневих газів з повітрям та киснем.

Дефлаграційне горіння в атмосфері із дозвучовою швидкістю поширення полум'я характеризується тим, що фронт полум'я є «поршнем», що створює під час руху попереду себе хвилю стиснення. Дефлаграційні вибухи створюють хвилю стиску, що переходила на далеких відстанях у слабку ударну хвилю.

Дефлаграційне вибухове горіння у напівзамкнутому об'ємі (внутрішній вибух) характеризується однаковим тиском у кожній точці об'єму в

певний момент часу. При цьому відношення лінійних розмірів будівлі або приміщення не повинно перевищувати 10.

У посібнику [1] два розділи присвячено зовнішнім (детонаційним вибухам) і внутрішнім вибухам (дефлаграційним вибухам). У розділі 2, присвяченому зовнішнім вибухам, приділяється увага підвищенню несучої здатності і міцності будівельних конструкцій. Щодо використання полікарбонату або іншого полімерного матеріалу у вікнах, то цитуємо п. 2.2.8 вказаного документа: «В качестве заполнения окон следует применять обычное оконное или неполированное витринное стекло, а также ударопрочное бесколочное стекло, поликарбонатный пластик и т.п. материалы. С целью повышения несущей способности обычное оконное или витринное стекло может быть оклеено с внутренней стороны полихлорвиниловой плёнкой».

У розділі 3 [1] йдеться про забезпечення вибухозахисту будівель під час внутрішніх аварійних вибухів, що може здійснюватися за двома напрямками:

- зниженням надлишкового тиску, що виникає під час внутрішнього аварійного вибуху;
- підвищенням міцності і стійкості конструкції до дії аварійних (вибухових) навантажень.

Необхідною умовою розробки оптимальних рішень із забезпечення вибухостійкості будівель під час внутрішніх аварійних вибухів є поєднання обох зазначених вище напрямів.

Таблиця 3

### Характеристики стільникового, монолітного полікарбонату і скла [15]

Параметри	Стільниковий ПК (4 мм)	Монолітний ПК (4 мм)	Скло (4 мм)
Щільність, кг/м <sup>3</sup>	200	1200	2200–2900
Вага, кг/м <sup>2</sup>	0,8	4,8	9,4
Межа міцності на вигин, МПа	100	90–110	15–20
Межа міцності на розтягнення, МПа	60	60	30–60
Межа міцності на стискання, МПа	70	80–100	700–1000
Ударна стійкість, Дж	2,1	800	0,05
Мінімальний радіус вигину R <sub>min</sub> , м	0,7	0,6	–
Коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м <sup>2</sup> °С)	3,8–4,1	5,3	5,8
Коефіцієнт лінійного термічного розширення К, 10 <sup>-5</sup>	6,5	6,5	0,9
Коефіцієнт лінійного розширення, мм/(м <sup>2</sup> °С)	0,065	0,065	0,0009
Звукоізоляція, дБ	до 20	27	30
Ступінь прозорості, %	85	91	89–92
Діапазон температури застосування, °С	-45–+120	-50–+150	-70 - +250
Термін служби, років	Не менше 10 (10–30)	Не менше 10 (10–15)	До 50
Хімічна стійкість	Середня	Висока	Висока
Вартість за 1 м <sup>2</sup> , у. е.	від 2	від 17	від 3,5

Для зниження надлишкового тиску, що виникає під час внутрішніх аварійних вибухів, використовуються запобіжні конструкції (ЗК): скло глухого скління приміщень і скло стулок віконних рам, що відкриваються всередину, а також стулки віконних рам, які відкриваються назовні, двері та ворота (ЗК обертові), а також легкоскидні стінові панелі і полегшені плити покриттів приміщень (ЗК, що зміщуються). Стінові панелі можуть бути запроєктовані як обертові ЗК.

За вимогами нормативних документів запобіжні конструкції встановлюються у приміщеннях будівель або пожежних відсіків категорій А і Б за вибухопожежною і пожежною небезпекою.

За допомогою ЗК надлишковий тиск у приміщенні під час аварійного вибуху знижується до допустимої величини.

У разі проєктування будинків вибухонебезпечних виробництв надлишковий тиск приймають, як правило, від 3 до 5 кПа. Нижнє значення надлишкового тиску відповідає будівлям, конструкції яких не розраховані на вплив аварійного вибуху. У разі зменшення  $P_{\text{доп}}$  площа запобіжних конструкцій збільшується.

Для зниження надлишкового тиску, що виникає під час аварійних вибухів, до допустимої величини насамперед слід використовувати скління стін приміщень та ліхтарів. При цьому як ЗК можуть використовуватись скло глухого скління і скло стулок віконних рам, що відкриваються всередину, а також стулки віконних рам, що відкриваються назовні (краще з вертикальним шарніром).

Застосування ЗК у виді легкоскидних стінових панелей слід передбачати в тих випадках, коли це не становить небезпеку для людей, що перебувають поблизу будівлі, в якій встановлюються ЗК.

Якщо необхідна площа прорізів, що перекриваються ЗК, не може бути розміщена у стінах будівлі і ліхтарях, то їх слід розмішувати в покритті вибухонебезпечного приміщення; при цьому легкоскидні покриття можуть бути досить ефективними тільки за порівняно великого значення надлишкового тиску вибуху.

Несучі, огорожувальні конструкції будівель, що піддаються дії надлишкового тиску  $P_{\text{доп}}$  під час внутрішнього аварійного вибуху, повинні бути розраховані з урахуванням цього тиску.

У будівлях і приміщеннях вибухонебезпечних виробництв повинна бути, як правило, виключена можливість руйнування основних несучих і огорожувальних конструкцій у розрахунковій величині вибухових навантажень. Допускаються пошкодження конструкцій випадкового характеру, які не

впливають на їх міцність і стійкість, а також експлуатаційні характеристики, вимагають незначних матеріальних витрат на ліквідацію цих ушкоджень.

Як скління вікон використовується, як правило, віконне або вітринне неполіроване скло товщиною 3–5 мм. У посібнику зазначено, що склопакети і армоване скло як ЗК застосовувати не рекомендується.

Далі у п. 3.2.2 [1] наведено характерні особливості скла, які слід враховувати під час його використання як ЗК.

– значення міцності скла в одному вікні можуть відрізнитись завдяки наявності дефектів, можливе зниження міцності у разі збільшення площі і зменшення товщини скла;

– у разі тривалої дії навантаження міцність скла знижується приблизно в 3 рази порівняно з міцністю у разі короткочасної дії навантаження;

– руйнівне навантаження залежить від типу кріплення скла (найменше руйнівне навантаження – у разі кріплення на металевих клямках, розташованих з боку скла, що не піддається впливу навантаження);

– руйнівні навантаження менші в тому разі, якщо сторона скла, по якій проводиться його різка, піддається дії навантаження;

– температура продуктів горіння горючих сумішей (ГС) практично не впливає на величину руйнівного навантаження;

– склоскління приміщень може працювати досить ефективно як ЗК тільки у тому разі, якщо час освітлення прорізів у віконних переплетіннях під час руйнування буде набагато меншим за тривалість горіння ГС;

– у разі дефлаграційного горіння ГС навантаження, яке діє на скло, може бути прийняте рівним надлишковому тиску  $P_0$ , що виникає у приміщенні, помноженому на коефіцієнт, що дорівнює 1,2.

Таким чином, у розділі 3 посібника [1], який присвячено внутрішнім дефлаграційним вибухам, не наведено даних або якихось рекомендацій щодо використання полікарбонату або іншого полімерного матеріалу у вікнах як ЗК (ЛСК).

У посібнику [2] вказівки містять матеріали для проєктування несучих та огорожувальних конструкцій будівлі та приміщень вибухонебезпечних виробництв під час аварійних вибухів газо-, паро-, пилоповітряних горючих сумішей (ГС).

Вказівки [2] розроблені для будівель і приміщень, що проєктуються з урахуванням роздільного впливу внутрішнього і зовнішнього вибуху ГС.

Вказівки не поширюються на проєктування будівель і приміщень, в яких виробляються або



зберігаються вибухові речовини, засоби ініціювання вибухових речовин, а також будівлі і приміщення, що проєктуються за спеціальними нормами і правилами.

Вибухобезпека об'єкта повинна забезпечуватися:

– системою запобігання вибуху (вибухопепередження);

– системою противибухового захисту;

– організаційно-технічними заходами.

Положення посібника [2] аналогічні положенням посібника [1] і так само у розділі 3 частини I посібника «Зовнішній вибух» наведено, що в зовнішніх стінах вибухостійких будинків слід передбачати роздільні віконні прорізи з мінімально можливою площею, які використовуються для природного освітлення необхідних приміщень або їх окремих ділянок. При цьому розміри комірок віконних рам повинні бути мінімальними. У разі відповідного обґрунтування допускається проєктувати будівлі операторних зі штучним освітленням без світлових прорізів. Як заповнення вікон слід застосовувати звичайне віконне або неполироване вітринне скло, а також ударостійке безосколкове скло, полікарбонатний пластик і т.п. матеріали. З метою підвищення несучої здатності звичайне віконне або вітринне скло може бути обклеєне поліхлорвініловою плівкою.

У розділі 8 частини II «Внутрішній вибух» посібника [2] за аналогією з посібником [1] щодо використання скла у склінні вибухонебезпечних приміщень наведено таке: «В качестве остекления окон со стальными или деревянными переплетами используется, как правило, оконное или витринное неполированное стекло толщиной 4 мм по ГОСТ 111-90. Стекла крепятся в стальных переплетах съёмными штапиками, представляющими собой гнутые элементы из стальной оцинкованной ленты, или с помощью резиновых профилей. В деревянных переплетах стекла крепятся деревянными штапиками. Стеклопакеты и армированное стекло в качестве ЗК применять не рекомендуется».

Таким чином, за аналогією з посібником [1] у розділі 8 посібника [2], який присвячено внутрішнім (дефлаграційним) вибухам, не наведено даних

або якихось рекомендацій щодо використання полікарбонату або іншого полімерного матеріалу у вікнах як ЗК (ЛСК).

Щодо використання нових матеріалів, наприклад, полікарбонату, то у п. 5.10 [3] наведено, що у приміщеннях категорій А та Б слід передбачати зовнішні легкоскридні огорожувальні конструкції. І далі за текстом у примітці 1 наведено, що віконне скло належить до легкоскридних конструкцій за товщини 3, 4 і 5 мм і площі не менше (відповідно) 0,8, 1 і 1,5 м<sup>2</sup>. Армоване скло, склопакети, триплекс, сталініт і полікарбонат до легкоскридних конструкцій не належать.

У джерелах інформації [1; 2; 4; 6–16] відсутні будь-які дані або рекомендації щодо використання полікарбонату або іншого полімерного матеріалу як ЛСК.

Підбиваючи підсумок, наводимо нижче цитату з книги [5] щодо можливості використання полікарбонату або іншого полімерного матеріалу як легкоскридної конструкції: «При наличии необходимых данных о закономерностях вскрытия для устройства разрушающихся ПК вместо стекол могут использоваться листовые и пленочные пластмассовые материалы».

**Висновки.** За даними джерел інформації [9–13], полікарбонат порівняно з іншими полімерами має значну міцність на розтягнення, на стиснення, на вигин та значні ударну міцність і в'язкість, визначені за стандартними методиками.

Для визначення можливості використання полікарбонату як ЛСК потрібні експериментальні дослідження щодо характеру можливого руйнування полікарбонату (крихке, пластичне) внаслідок дії надлишкового тиску та його фізико-механічних характеристик.

З огляду на те, що за літературними джерелами полікарбонат досить міцний матеріал і спроможний витримувати значні навантаження, головне завдання легкоскридних конструкцій щодо зниження надлишкового тиску у приміщенні до допустимого значення за рахунок свого розкриття може бути вирішене за допомогою руйнування елементів кріплення, що має бути підтверджене експериментальними дослідженнями.

#### Список літератури:

1. Пособие по обследованию и проектированию зданий и сооружений, подверженных воздействию взрывных нагрузок. Москва : ЦНИИПромзданий, 2000.
2. Пособие по проектированию несущих и ограждающих конструкций промышленных зданий для взрывоопасных производств. Москва : ЦНИИПромзданий, 1994.
3. СП 56.13330-2011 Производственные здания. Введ. 2011-05-20. Москва : ОАО «ЦПП». 27 с.
4. Расчет параметров легкобрасываемых конструкций для взрывоопасных помещений промышленных объектов. Рекомендации. Москва : ВНИИПО, 2015. 48 с.

5. Пилюгин Л.П. Обеспечение взрывоустойчивости зданий с помощью предохранительных конструкций. Москва : Ассоциация «Пожарная безопасность и наука», 2000. 224 с.: ил. ISBN 5-901283-03-1.
6. Технический кодекс установившейся практики. (ТКП 45-2.02-38-2006. (02250) Конструкции легкобрасываемые. Правила расчета. Введ. 2007-01-01. Минск : Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2006. 27 с.
7. Пожарная профилактика в строительстве / под редакцией кандидата технических наук В.Ф. Кудаленкина. Москва, 1985.
8. СП 4. 13130.2013. Системы противопожарной защиты. Ограничение распространения пожара на объектах защиты. Требования к объемно-планировочным и конструктивным решениям.
9. Антивандальный материал. URL: <http://www.vista-dv.ru/safplast/monolitnyj-polikarbonat/item/14-antivandalnyj-material>.
10. Сутягин В.М. Основные свойства полимеров : учебное пособие. Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2010.
11. Ярцев В.П. Прогнозирование работоспособности полимерных материалов в деталях и конструкциях зданий и сооружений. Тамбов, 2001.
12. Методы испытаний полимерных материалов ООО «КОМЕФ», 2007.
13. Исследование физико-механических свойств полимеров и полимерных композитов: Лабораторные работы / авт.-сост.: А.Г. Воронков, В.П. Ярцев. Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2004.
14. Перетрухин В.В., Чернушевич Г.А. Пути снижения уровня травматизма и уменьшения вероятности возникновения чрезвычайных ситуаций на предприятиях со взрывопожароопасными технологиями. *Общественные вопросы лесопромышленного комплекса*. 2011. № 2. С. 267–270.
15. Миканович А.С. Анализ вопроса защиты зданий и сооружений при внутреннем взрыве газо-пылевоздушной смеси / А.С. Миканович, О.В. Любимова, О.А. Бужин. *Надзвичайні ситуації: попередження та ліквідація*. 2017. № 1. С. 59–65.
16. Невская Е.Е. Основные методы оценки параметров ударных волн при аварийных взрывах. Принципы проектирования взрывоустойчивых зданий и сооружений. *Безопасность труда в промышленности*, 2017. № 9. С. 20–29.

**Nikulin O.F., Dobriak D.O., Krikun O.M., Kravchenko N.V., Savchenko O.V., Lutsenko Yu.V. ABOUT USE OF POLYCARBONATE OR OTHER POLYMER MATERIAL AS LIGHT REMOVABLE CONSTRUCTIONS IN EXPLOSIVE INDUSTRIAL PREMISES**

*This article analyzes the sources of information on explosion protection of premises and buildings in the event of an internal deflagration explosion of gas, steam, dust and air mixture using light dump (removable) structures. It is noted that glazing is the most common type of light dump (removable) structures, but not always the area of glazing in enclosing structures is sufficient to reduce excess pressure to an acceptable value. Sources of information on the use of polycarbonate in industrial construction are considered, in particular in determining the possibility of using polycarbonate as a lightweight structure inside the production premises of industrial facilities. Light and strong, fire-resistant polymeric materials can be an alternative to usual glass in enclosing designs and in lanterns. The physical and mechanical characteristics of polycarbonate and other polymers, as well as various methods of mechanical impact that lead to the destruction of the polymeric material are considered. There are three typical cases of mechanical impact, such as shock impact, prolonged action under constant load, periodic effects. It is noted that emergency explosions can have detonation and deflagration character. The main characteristics and differences of explosions are described. The basic principles of explosion safety of objects and ways of their achievement are defined. The characteristic features of glass which should be considered at its use as easily dump structures are resulted. The use of double-glazed windows and reinforced glass as lightweight structures is not allowed. Based on the results of the analysis of physical and mechanical characteristics of the selected materials, conclusions were made regarding their possible use as lightweight structures. The advantages of physical and mechanical characteristics of polycarbonate in comparison with other polymers are given, such as significant tensile, compressive, bending strength and significant impact strength and toughness. Due to the significant strength of polycarbonate, the use of its easy-to-drop structures can be solved by destroying the fasteners. Attention is drawn to the fact that to determine the possibility of using polycarbonate as a lightweight structure requires experimental studies.*

**Key words:** light dump (removable) structures (LSC), parameters of light dump (removable) structures, allowable excess pressure, detonation and deflagration explosions, polycarbonate.

УДК 528.1:379.85

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/44>**Тимошевська Т.І.**

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

## **ЗАСТОСУВАННЯ ГІС-ТЕХНОЛОГІЙ ПІД ЧАС ВИКОНАННЯ КАДАСТРОВИХ РОБІТ У НАСЕЛЕНИХ ПУНКТАХ**

*Виконаний аналіз особливостей ведення земельного кадастру в населених пунктах. Розглянуті методи збору просторової інформації про земельні ділянки, структуру просторових даних та технології їх зберігання та використання таких даних у земельно-кадастрових ГІС. Узагальнені відомості про програмне забезпечення, яке використовується різними категоріями користувачів.*

*Для визначення просторового положення земельної ділянки використовуються дані топографічного знімання, лазерного наземного сканування, дешифрування аерофотознімків та космічних знімків, використання мобільних пристроїв для збору даних, оцифрування архівних матеріалів.*

*Отримані в результаті знімання дані зберігаються на території підприємств та організацій у вигляді структур даних, призначених для використання в ГІС-пакетах. У зв'язку із розповсюдженням віддаленого характеру офісної праці підвищується роль так званих «хмарних сховищ» – спеціальних інтернет-сервісів для розподіленого зберігання даних.*

*Відомі ГІС-пакети (ArcGIS, MapInfo, QGIS) мають розвинуті інструменти щодо імпорту різних типів просторових даних, їх аналізу та підготовки якісних картографічних зображень. Вони використовувалися для розроблення проектів нормативної грошової оцінки міст, розроблення генеральних планів міст, схем планування територій різного рівня.*

*Нагальною проблемою є відсутність в Україні єдиної кадастрової системи (за зразком соціальної мережі), до якої мали б доступ із відповідними правами всі учасники землевпорядного процесу. Запровадження такої системи суттєво покращить якість землевпорядних робіт, скоротить їх строки та зменшить вірогідність корупційних дій.*

**Ключові слова:** земельний кадастр, геоінформаційна система, структура просторових даних, хмарне сховище, землевпорядна документація.

**Постановка проблеми.** Сучасні населені пункти є складними системами, що поєднують у собі соціально-економічні, юридичні, технічні та природні чинники. Недостатнє врахування хоча б одного із чинників може призвести до катастрофічних наслідків і навіть припинити саме існування населених пунктів.

Саме тому накопичення, упорядкування, аналіз та обробка інформації про населені пункти займають значну частину роботи органів державної влади та місцевого самоврядування. Історично такий вид діяльності називають кадастровим обліком або скорочено кадастром (із француз. cadastre – реєстр). За об'єктами кадастрового обліку кадастри поділяють на: земельний кадастр, містобудівний кадастр, водний кадастр, кадастр корисних копалин тощо.

Державний земельний кадастр відіграє особливу роль у реформуванні земельних відносин

як інформаційна база для ефективного управління земельними ресурсами, ведення системи реєстрації, землеустрою, підтримки податкової та інноваційної політики держави, становлення та розвитку ринку землі, обґрунтування розмірів плати за землю. Державний земельний кадастр на всіх етапах розвитку суспільства є основним засобом реалізації земельної політики держави.

Створення сучасного земельного кадастру є складною науково-технічною проблемою. Сьогоднішній кадастр – це інтегровані бази даних, інформаційні та геоінформаційні технології, цифрові електронні карти, аерофото- та космічні зйомки. Створюють, наповнюють та удосконалюють Національну кадастрову систему висококваліфіковані фахівці.

За останні роки ГІС-системи набули широкого розповсюдження. З метою підвищення інформованості населення щодо використання земельних

ресурсів відповідно до Наказу Держгеокадастру від 04 грудня 2020 р. № 523 «Про затвердження плану реалізації пілотного проекту щодо національної інфраструктури геопросторових даних» громадською організацією УкрГео створений картографічний web-сервіс GEOPORTALUA. Розроблення механізмів застосування даних вказаного сервісу для виконання кадастрових робіт у населених пунктах є нагальною науковою проблемою.

**Аналіз останніх досліджень.** Об'єднуючу роль усіх кадастрів виконує земельний кадастр, тому що саме земля є просторовим базисом будь-якої діяльності людини. Закон України «Про Державний земельний кадастр» від 07.07.2011 р. № 3613-VI визначає земельний кадастр як єдину державну геоінформаційну систему відомостей про землі, а отже, наголошує на необхідності ведення земельного кадастру в електронному вигляді із застосуванням ГІС-систем (систем збору та обробки метричної та семантичної інформації про об'єкти, що мають просторову характеристику). Дослідженнями застосування таких систем для цілей ведення державного земельного кадастру займалися такі вчені, як Ю.М. Палеха [1], В.Д. Шипулін [2], Ю.О. Карпінський, А.А. Ляшенко [3], Larsson [4]. Було досліджено застосування настільних ГІС та не враховувалося розповсюдження сучасних мобільних пристроїв обробки інформації, підвищення ролі інтернет-технологій у накопиченні та обробці земельно-кадастрової інформації.

**Формулювання цілей статті.** У статті проаналізовано особливості застосування ГІС-технологій під час виконання кадастрових робіт у населених пунктах.

#### **Викладення основного матеріалу.**

*Джерела інформації про земельну ділянку.* Для визначення просторового положення земельної ділянки використовуються дані топографічного знімання, лазерного наземного сканування, дешифрування аерофотознімків та космічних знімків, використання мобільних пристроїв для збору даних, оцифрування архівних матеріалів.

Топографічне знімання проводиться із використанням електронних тахеометрів, GPS-приймачів високої точності. У результаті комп'ютерної обробки матеріалів польових вимірів отримують векторний графічний файл, що в подальшому використовується під час складання кадастрової та землевпорядної документації.

Лазерне сканування використовується із застосуванням лазерних сканерів. Після опрацювання даних сканування отримують тривимірну модель земельної ділянки. Використання тривимірних моделей ділянки для цілей саме кадастрового

обліку ще недостатньо вивчено та є перспективним методом побудови моделей населених пунктів.

Використання знімків із безпілотних літаючих апаратів (наприклад, Phantom 4 PRO) дає змогу отримати великий масив актуальних та точних даних, встановити факти незаконного використання земельних ділянок (будівництво, вирубка лісів, самовільне захоплення земельних ділянок тощо). Знімання земної поверхні може проводитися не тільки у видимому діапазоні, а й в ультрафіолетовому та інфрачервоному, наприклад супутникове знімання із використанням супутника Landsat 8. Такі знімки дозволяють здійснювати оперативний контроль за розвитком рослин у зелених зонах міст, оцінювати ступень нагріву земної поверхні. Це дає можливість оптимізувати систему землекористувань у населених пунктах.

Важливою науковою проблемою, що стримує використання супутникових знімків, є необхідність трансформації та дешифрування знімків. Такі операції проводяться вручну із використанням інструментів оцифрування (Digitizing tools), що входять до складу ГІС-пакетів.

Дані на паперових носіях (землевпорядна документація, звіти, міські планшети масштабів 1:500, 1:2000) нині використовуються порівняно рідко. Для їх використання в кадастровому обліку вони підлягають скануванню та оцифруванню. Отримані цифрові матеріали повинні мати точність, визначену для топографічного знімання відповідного масштабу.

Використання мобільних пристроїв має допоміжний характер, тому що точність вбудованих у мобільний телефон навігаційних приймачів GPS становить до  $\pm 10$  м. Значно підвищити точність визначення координат можна за умови використання польових ГІС-контролерів, наприклад Nomad 5 від компанії Trimble.

Визначення просторового положення ділянки має відповідати таким принципам:

– повнота, точність та однозначність визначення просторового положення має узгоджуватися з нормативними документами та специфічними вимогами замовника;

– роботи з топографічного знімання мають проводитися в єдиній державній системі координат та за потреби без втрат точності перераховуватися з однієї системи координат в іншу за відомими ключами перерахунку;

– результати топографічного знімання мають застосовуватися для цілей як кадастрового обліку, так і інженерного проектування (будівництво, меліорація, ландшафтний дизайн тощо);

– роботи з топографічного знімання мають проводитися кваліфікованими фахівцями із відповідною освітою та кваліфікаційним сертифікатом інженера-землевпорядника;

– відомості зі правовстановлюючих документів, витяги з різноманітних реєстрів та кадастрів даних є невід’ємною частиною земельно-кадастрової документації.

*Сучасні методи зберігання даних ГІС.* Отримані в результаті знімання дані зберігаються на території підприємств та організацій у вигляді структур даних, призначених для використання в ГІС-пакетах. У зв’язку з розповсюдженням віддаленого характеру офісної праці підвищується роль так званих «хмарних сховищ» – спеціальних інтернет-сервісів для розподіленого зберігання даних. Для зберігання даних можливо використовувати загальнодоступні хмарні сховища (Google Drive, Dropbox, Mega та ін.), однак для застосування разом із ГІС-пакетами останні потребують розроблення спеціалізованих додатків (утиліт), що дозволяють ефективно використовувати такі сервіси. В останній час з’явилися ГІС інтернет-сервіси, які надають послуги геоінформаційної обробки даних (ArcGIS cloud, QGIS cloud, NextGIS), такі сервіси містять вбудовані хмарні сховища та інструменти роботи з ними.

Цікавим є проект Mergin від компанії Lutra Consulting [5], він є хмарним сховищем геоінформаційних даних, що має інструменти взаємодії з пакетом QGIS та з мобільною платформою Android. Під час використання мобільного додатку користувач може використовувати спеціально налаштовані в пакеті QGIS таблиці атрибутивних даних.

*Структура та формати даних ГІС.* Просторові дані зберігаються у вигляді геометричних примітивів та атрибутивної інформації. Основними

геометричними примітивами є точка (point) – цим примітивом відображають кути повороту угідь та землекористувань, геодезичні пункти, лінія (line) – примітивом зображають суміжні землекористування, дороги, річки тощо, полігон (polygon) – землекористування, угіддя, будинки, сітка (mesh) – рельєф місцевості, будинки. Зміст атрибутивної інформації визначається Законом України «Про землеустрій» від 22.05.2003 р. № 858-IV, Наказом Держкомзему від 02.11.2009 р. № 573 «Про зміст обмінного файлу земельно-кадастрової інформації» [6]. Обмінний файл містить дані про кадастровий номер земельної ділянки, відомості про виконавця земельно-кадастрових робіт, метричні характеристики ділянки, адресу, відомості про власника та правовстановлюючі документи на ділянку, опис меж суміжних користувачів тощо. Дані в обмінному файлі записуються у форматі структурованих даних XML. Такий підхід є досить розповсюдженим у світі. Адже існує багато спеціалізованих структур даних, розроблених на базі XML, наприклад формат географічної мови розмітки GML, формат опису земельних ділянок Land XML тощо. Також добре розвинуті засоби програмування з обробки вказаних структур даних.

*Обробка кадастрових даних.* Дані з єдиної бази даних земельного кадастру використовують такі категорії споживачів (рис. 1).

Як видно, це громадяни та юридичні особи з метою реалізації своїх прав на володіння, користування та розпорядження земельними ділянками. Це і державні та приватні землевпорядні організації – для підготовки до реєстрації землевпорядної документації. Фахівці Державної служби з питань геодезії, картографії та кадастру (Держгеокадастр) – здійснюють перевірку землевпорядної документації та реєстрацію ділянок у Національну кадастрову систему. Посадові особи

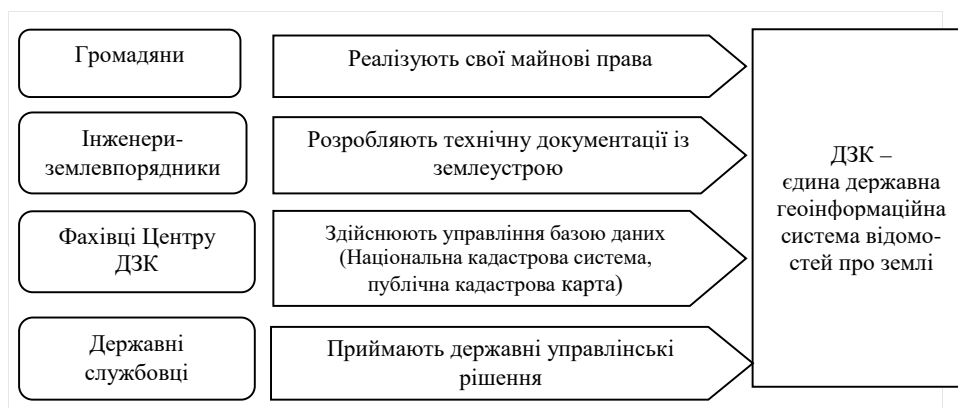


Рис. 1. Користувачі бази даних державного земельного кадастру

органів державної влади та місцевого самоврядування здійснюють державну політику з управління земельними ресурсами та додержання земельного законодавства. Ці категорії споживачів мають свої специфічні вимоги до програмного забезпечення.

Так, громадяни та юридичні особи можуть використовувати Публічну кадастрову карту України [7], яка розміщена в мережі Інтернет. За допомогою цього сервісу можна отримати інформацію про кадастровий поділ України, зареєстровані земельні ділянки. Визначити розміри, площу ділянки, її цільове призначення, а також відомості про виконавця. Для зручності користування сервісом використовуються додаткові карти, зокрема топокарта масштабу 1:100 000, гібридний супутниковий знімок Google MAP, карта Open Street MAP, довідкові шари щодо видобутку корисних копалин, урожайності товарних сільськогосподарських культур, розташування об'єктів енергетики тощо. Дані сайту можуть бути інтегровані в сторонній ГІС-проект шляхом використання технології Web Map Service (WMS) для додавання до проекту додаткових шарів інформації.

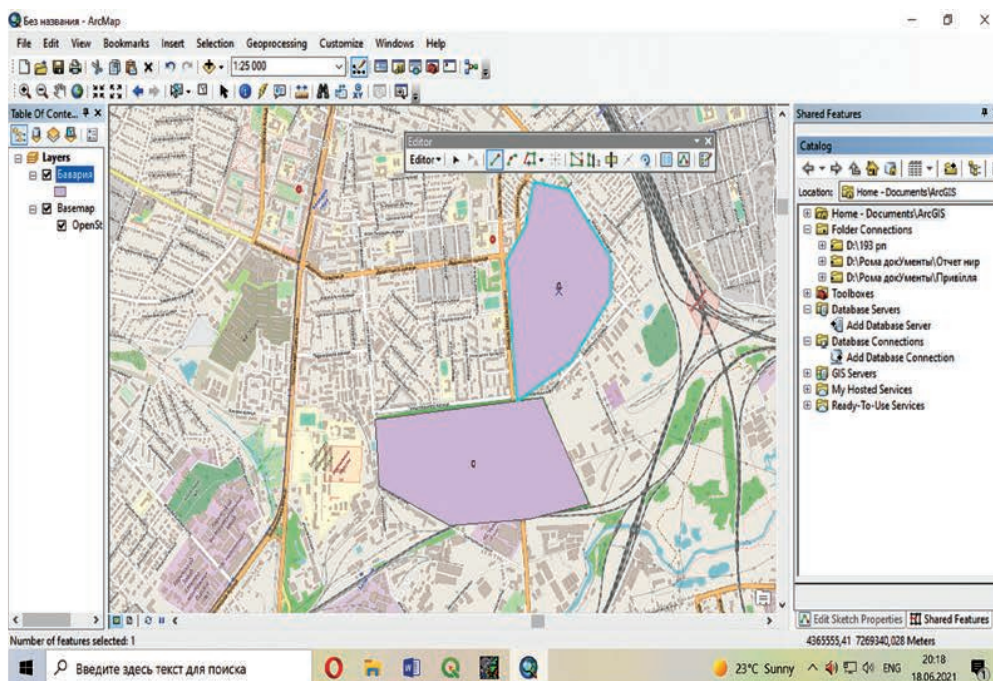
Землевпорядні організації користуються сподієними до традиційних ГІС-програмами (геодезичні програми), що призначені для імпорту результатів польових геодезичних вимірювань із використанням різних типів інструментів, врівноваження геодезичних мереж, перерахунку координат з однієї системи координат в іншу, підготовки топографічних та кадастрових планів, форму-

вання обмінних файлів XML та конвертації старих файлів In4.

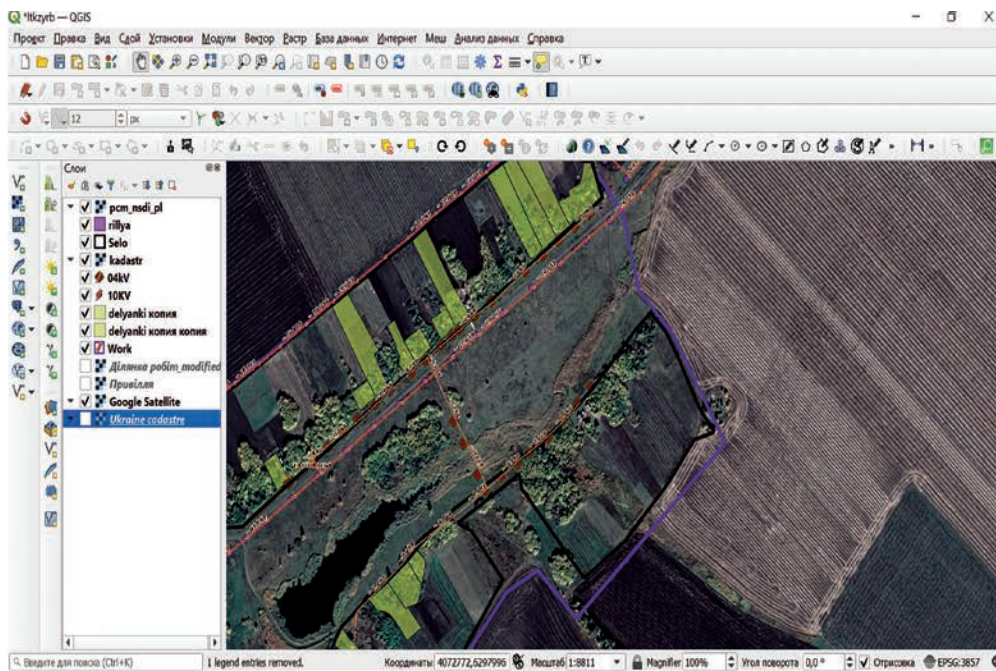
Для забезпечення єдності у структурі землевпорядної документації землевпорядним організаціям в своїй роботі бажано використовувати геодезичні програми українських виробників. Зокрема, Delta Digital (ТОВ «Аналітика», м. Вінниця) [8], GIS-6 (компанія «Шелс», м. Кропивницький) [9], також можна використовувати програмний пакет CREDO (СП «Кредо Діалог», м. Мінськ). Для підготовки текстової частини землевпорядної документації використовують відомі офісні пакети.

Фахівці Центру Державного земельного кадастру здійснюють перевірку землевпорядної документації, вносять відомості до єдиної Національної кадастрової системи. У своїй роботі вони користуються автоматизованою системою (АС ДЗК). Ця система призначена для перевірки атрибутивної та семантичної інформації, реєстрації майнових прав, менеджменту чергового кадастрового плану, коригування та видалення меж об'єктів земельно-кадастрового обліку, формування звітності із земельних ресурсів.

Відомі ГІС-пакети (ArcGIS, MapInfo, QGIS) мають розвинуті інструменти щодо імпорту різних типів просторових даних, їх аналізу та підготовки якісних картографічних зображень. Вони використовувалися для розроблення проектів нормативної грошової оцінки земель населених пунктів [10], розроблення генеральних планів міст, схем планування територій різного рівня (рис. 2).



А) ArcMAP



Б) QGIS

Рис. 2. Інтерфейс ГІС-пакетів ArcMAP та QGIS

**Висновки.** Сучасний період розвитку земельного кадастру населених пунктів в Україні характеризується завершенням перехідного періоду від обліку земель на паперових носіях до електронного обліку. Під час електронного обліку широко використовуються технології, зорієнтовані на використання мережі інтернет. Нагальною проблемою є відсутність в Україні функціонуючої єдиної кадастрової системи (за зразком соціальної мережі), до якої мали б доступ із відповідними правами всі учасники землевпорядного процесу. Запровадження такої системи суттєво покращить якість землевпорядних робіт, скоротить їх

строки та зменшить вірогідність корупційних дій. ДП НДІГК було розроблено геопортал пілотного проекту щодо національної інфраструктури геопросторових даних як інноваційний проект на виконання постанови Кабінету Міністрів України від 12 лютого 2020 р. № 134 «Про внесення змін та визнання такими, що втратили чинність, деяких постанов Кабінету Міністрів України» та наказу Держгеокадастру від 04 грудня 2020 р. № 523 «Про затвердження плану реалізації пілотного проекту щодо національної інфраструктури геопросторових даних». Геопортал пілотного проекту функціонує у режимі дослідної експлуатації.

#### Список літератури:

1. Палеха Ю.Н. Градостроительство и ГИС в Украине на рубеже веков. Ретроспективний аналіз. ГИС обозрение. 2001. №2. – С. 12–17.
2. Шипулин В.Д. Основные принципы геоинформационных систем: учебн. пособие. – Харьков: ХНАГХ, 2010. – 337 с.
3. Карпінський Ю.О., Ляшенко А.А. Сучасний стан та проблеми топографо-геодезичного і картографічного забезпечення ведення земельного кадастру. Матеріали ГІС-ФОРУМУ 2000. – С. 28–33.
4. Gerhard Larsson Land Registration and Cadastral Systems: Tools for Land Information and Management/ Boston, Addison-Wesley Longman Publishing Co.1991. – 173 p.
5. Lutra Consulting. URL: <https://www.lutraconsulting.co.uk> (дата звернення 01.06.2021).
6. Про затвердження Вимог до структури, змісту та формату оформлення результатів робіт із землеустрою в електронному вигляді (обмінного файлу) // Наказ Держкомзему від 02.11.2009 р. № 573, зареєстрований в Мінюсті України 15.02.2010 № 157/17452. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0157-10#Text> (дата звернення 01.06.2021).
7. Публічна кадастрова карта. URL: <https://map.land.gov.ua> (дата звернення 01.06.2021).

8. Digitals – землеустройство, геодезия и картография в едином программном продукте. URL: [https://vinmap.net/?act=dig\\_obzor](https://vinmap.net/?act=dig_obzor) (дата звернення 01.06.2021).
9. Бердников Є. GIS-6 – геоінформаційна система майбутнього // Землевпорядний вісник. 2008, № 3. – с. 27–30.
10. Лященко А.А., Ціпенко О.В. Наскрізнi геоінформаційні технології грошової оцінки земель населених пунктів. Інженерна геодезія. Київ: КНУБА, 2000. Вип. 42. – С. 155–160.
11. Національна інфраструктура геопросторових даних. URL: <https://nsdi.land.gov.ua/> (дата звернення 01.06.2021).

#### **Tymoshevska T.I. APPLICATION OF GIS TECHNOLOGIES DURING THE PERFORMANCE OF CADASTRAL WORKS IN SETTLEMENTS**

*The analysis of features of conducting the land cadastre in settlements is executed. Methods of collecting spatial information about land plots, structure of spatial data and technologies of their storage and use of such data in land cadastral GIS are considered. Generalized information about the software used by different categories of users.*

*To determine the spatial position of the land plot, data from topographic surveying, laser ground scanning, decoding of aerial photographs and space images, use of mobile devices for data collection, digitization of archival materials are used.*

*The data obtained as a result of the survey are stored on the territory of enterprises and organizations in the form of data structures intended for use in GIS packages. Due to the proliferation of remote office work, the role of so-called "cloud storage" - a special Internet service for distributed storage.*

*Well-known GIS packages (ArcGIS, MapInfo, QGis) have developed tools for importing various types of spatial data, their analysis and preparation of high-quality cartographic images. They were used to develop projects of normative monetary valuation of cities, development of master plans of cities, schemes of planning of territories of different levels.*

*An urgent problem is the lack of a single cadastral system in Ukraine (modeled on a social network), to which all participants in the land management process would have access with appropriate rights. The introduction of such a system will significantly improve the quality of land management, reduce their time and reduce the likelihood of corruption.*

**Key words:** *land cadastre, geographic information system, spatial data structure, cloud storage, land management documentation.*



# ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382

DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2021.4/45>**Осадчук О.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Крилик Л.В.**

Вінницький національний технічний університет

**Звягін О.С.**

Вінницький національний технічний університет

**Осадчук Я.О.**

Вінницький національний технічний університет

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ МІКРОЕЛЕКТРОННОГО АВТОГЕНЕРАТОРНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ВИМІРЮВАННЯ ВОЛОГОСТІ

Розроблено математичну модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря. Мікроелектронний частотний перетворювач вологості розроблено на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором на основі двох біполярних транзисторів та вологочутливого ємнісного елемента. Від'ємний диференціальний опір, утворений паралельним включенням повного опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярної транзисторної структури та індуктивності, приводить до виникнення електричних коливань у контурі автогенераторного перетворювача вологості. Використовуючи середовище Maple, доведена адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході автогенератора існують періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною ємності вологочутливого елемента  $C_w(W)$ . Так, при  $C_w(W) = 305$  пФ частота  $F = 64,53$  МГц, а при  $C_w(W) = 354$  пФ частота  $F = 58,834$  МГц, при цьому напруга живлення  $U = 5$  В.

Для підтвердження теоретичних результатів автогенераторний засіб досліджено у середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від 305 пФ до 354 пФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%. За результатами моделювання у середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 пФ ( $W = 20\%$ ) до 354 пФ ( $W = 95\%$ ) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря існують періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,5%.

**Ключові слова:** частотний перетворювач вологості, вологочутливий ємнісний елемент, від'ємний диференціальний опір, періодичні коливання, частота.

**Постановка проблеми.** Стан сучасного науково-технічного прогресу суттєво визначається успішним розв'язанням питань створення та освоєння випуску автоматичних засобів інформаційно-вимірювальних систем, приладів вимірювального контролю, біомедичних пристроїв, систем визначення якості продукції, а також визначення параметрів довкілля. Ефективність

вищезгаданого комплексу технічних засобів насамперед залежить від якості вимірювальних перетворювачів, які є основними чутливими пристроями інформаційно-вимірювальних систем [1; 2, с. 256–272, 337–359; 3, с. 43–50, 398–406; 4; 5; 6; 7; 8].

Важливою різновидністю перетворювачів фізичних величин є сенсори вологості.

Вимірювання та контроль вологості є одним із поширених напрямів вимірювань фізичних величин. Такий напрям зумовлений потужним промисловим та науково-технічним потенціалом нашої країни та великим різноманіттям промислових галузей (наприклад, енергетика, металургія, машинобудування, хімічна промисловість), ефективність яких значною мірою залежить від чутливості та точності вимірювань вологості, тиску, температури та інших фізичних величин. Тому досить важливим завданням сучасної автоматизації та контрольно-вимірювальної техніки є вибір надійних методів вимірювання вологості для конкретних виробництв та застосувань, створення вимірювальних приладів та систем необхідної чутливості й точності, швидкодії і стабільності, а також дослідження впливів на результати вимірювань впливу неінформативних параметрів [9, с. 11–18, 123–124].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Нині серед первинних перетворювачів різного типу вагоме місце у вимірювальній техніці посідають сенсори вологості. Необхідність вимірювального контролю вологості як у промисловості, так і в побуті робить актуальною проблему розроблення та дослідження сенсорів вологості різних типів, принцип роботи яких оснований на зміні електрофізичних параметрів.

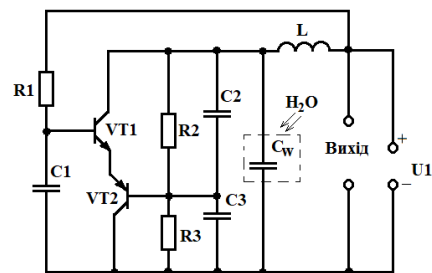
Зазначимо, що сучасний стан науки та техніки висуває високі вимоги до засобів вимірювання вологості. Це насамперед зумовлено потребою в автоматизації технологічних процесів. Крім того, питання вивчення, розроблення та виготовлення засобів вимірювання вологості нині є актуальним [1; 4; 5; 6; 7; 8; 10]. Серед великого різноманіття сенсорів вологості практичний інтерес мають мікроелектронні сорбційні сенсори вологості. Принцип дії таких сенсорів заснований на явищі сорбції вологи з досліджуваного середовища.

Використання первинних перетворювачів вологості в частотних пристроях, які реалізують принцип перетворення «вологість-частота», дозволяє значно підвищити чутливість, точність вимірювання вологості та спростити схеми подальшої обробки інформації. У цьому разі необхідно використовувати вологочутливий елемент у вигляді ємності, який є найоптимальнішим за сукупністю параметрів, а саме забезпечує широкий діапазон вимірювань, високу надійність, низьку вартість у разі використання мікроелектронної технології. Завдяки чому маємо мініатюрні габарити чутливого елемента

[10, с. 235–267; 11; 12; 13; 14; 15; 16, с. 6–8; 17, 18, 19, 20]. Тобто для вимірювання вологості ємнісний метод є одним з найкращих.

**Постановка завдання.** Метою роботи є розробка та дослідження математичної моделі мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором, вологочутливим елементом якої слугує ємнісний елемент. Для досягнення поставленої мети у роботі потрібно вирішити такі завдання: 1) провести аналіз наявних наукових джерел та обґрунтувати переваги застосування реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором; 2) розрахувати електричні характеристики мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря, в яких враховано залежність реактивних властивостей напівпровідникових структур з від'ємним диференціальним опором від впливу відносної вологості навколишнього середовища; 3) зробити висновки з проведеного дослідження.

**Теоретичні та експериментальні дослідження.** Метою роботи є розробка мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000. На рис. 1 представлена електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря.



**Рис. 1. Електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості**

Мікроелектронний автогенераторний пристрій для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом розроблено на основі транзисторної структури з від'ємним диференціальним опором на основі двох біполярних транзисторів VT1 та VT2. За допомогою джерела постійної напруги створюється такий режим роботи, коли від'ємний диференціальний опір, який утворений пара-

лельним включенням повного опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  та індуктивності  $L$ , приводить до виникнення електричних коливань у контурі. Дільник напруги утворюють резистори  $R_2$  і  $R_3$ , які забезпечують живлення схеми за постійним струмом. Резистор  $R_4$  і ємність  $C_1$  слугують фазозсувним ланцюгом для забезпечення балансу фаз в автогенераторному перетворювачі. Вологочутлива ємність  $C_W$  включена паралельно повному опору з ємнісним складником на електродах колектор-колектор біполярних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ . У разі дії вологи на вологочутливу ємність  $C_W$  змінюється ємнісний складник повного опору на електродах транзисторної структури на основі біполярних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ , що викликає ефективну зміну частоти коливального контуру.

Для експериментального дослідження схема мікроелектронного автогенераторного перетворювача вологості з вологочутливим ємнісним елементом на основі НСН-1000 (рис. 1) була зібрана на біполярних транзисторах ВFP450 та ВFT92. Режим біполярних транзисторів  $VT1$  і  $VT2$  по постійному струму був таким: струм у ланцюзі колектора транзистора  $VT1$  дорівнює 4,25 мА, а напруга на колекторі – 5 В.

Для визначення електричних характеристик, в яких враховано залежність реактивних властивостей транзисторних структур з від'ємним диференціальним опором від впливу відносної вологості досліджуваного середовища, розроблено еквівалентну схему автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000 (рис. 2).

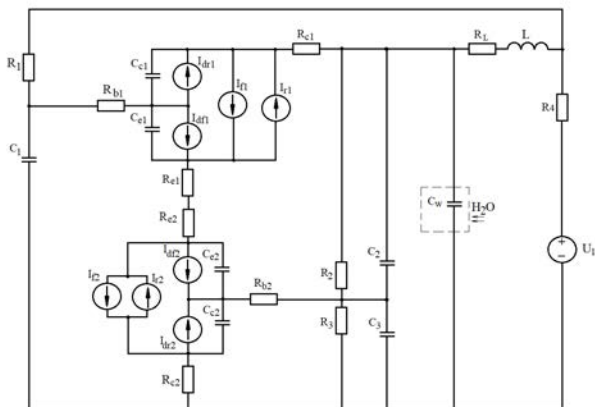


Рис. 2. Еквівалентна схема автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000

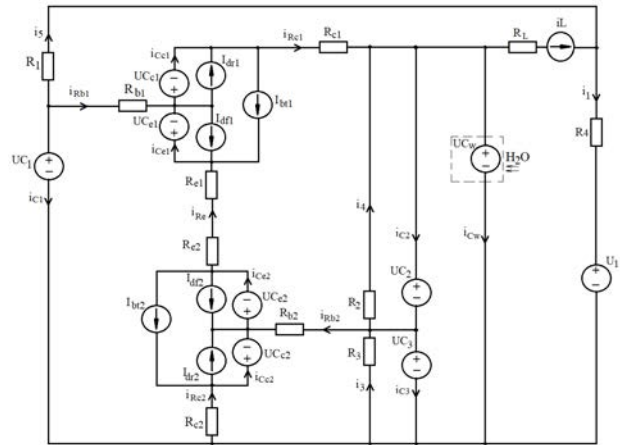


Рис. 3. Перетворена еквівалентна схема автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000

Для зручності розрахунків, об'єднавши струми  $I_f$  і  $I_r$  у  $I_{bt} = (I_f - I_r) / QB$ , а також скориставшись методом змінних стану, на рис. 3 подано перетворену еквівалентну схему розробки. На основі вибраних напрямків струмів було складено систему рівнянь Кірхгофа:

$$\begin{cases}
 U_L = i_5 R_1 - i_{R_{b1}} R_{b1} - i_L R_L - i_{R_{c1}} R_{c1} - U_{C_{c1}}, \\
 i_{R_e} = (i_4 R_2 - i_{R_{b2}} R_{b2} - i_{R_{c2}} R_{c2} - U_{C_{c1}} - U_{C_{c2}} - U_{C_{c1}}) / R_{e_e}, \\
 i_{R_{b2}} = (U_{C_{c2}} + i_{R_{c2}} R_{c2} - i_3 R_3) / R_{b2}, \\
 i_{R_{b1}} = (U_{C_{c2}} + U_{C_{c1}} + U_{C_{c2}} + U_{C_1} + i_{R_{c2}} R_{c2} + i_{R_e} R_{e_e}) / R_{b1}, \\
 i_1 = (U_{C_W} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4, \\
 i_3 = -U_{C_3} / R_3, \\
 i_4 = -U_{C_4} / R_4, \\
 i_{R_{c1}} = (U_{C_1} - U_{C_{c1}} - U_{C_W} - i_{R_{b1}} R_{b1}) / R_{c1}, \\
 i_{C_1} = -i_5 - i_{R_{b1}}, \\
 i_{C_W} = i_3 - i_1 - i_{C_1} - i_{C_3} + i_{R_{c2}}, \\
 i_{C_{c1}} = i_{R_{c1}} + I_{bt1} - I_{dr1}, \\
 i_{C_2} = i_4 - i_{C_W} - i_L + i_{R_{c1}}, \\
 i_{C_{e1}} = i_{R_e} + I_{bt1} + I_{df1}, \\
 i_{C_{e2}} = i_{R_e} + I_{bt2} + I_{df2}, \\
 i_{C_{c2}} = i_{C_{e2}} - i_{R_{b2}} - I_{dr2} - I_{df2}, \\
 i_{R_{c2}} = i_{C_{c2}} - I_{bt2} + I_{dr2}, \\
 i_5 = i_1 - i_L, \\
 i_{C_3} = i_3 - i_4 - i_{R_{b2}} + i_{C_2},
 \end{cases} \quad (1)$$

де  $R_1, R_2, R_3, C_1, C_2, C_3$  – опори та ємності дільників напруги;  $R_{b1}, R_{b2}, R_{e1}, R_{e2}, R_{c1}, R_{c2}$  – об'ємні опори бази, емітера, колектора транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ ;  $R_{e_e}$  – загальний опір емітерів транзисторів  $VT1$  і  $VT2$ ;  $C_{e1}, C_{e2}, C_{c1}, C_{c2}$  – ємності емітерного та колекторного переходів транзисторів  $VT1$

і  $VT_2$ ;  $C_w$  – вологочутливий ємнісний елемент;  $L$  – індуктивність;  $U_1$  – джерело живлення постійної напруги;  $I_{dr1}$ ,  $I_{dr2}$ ,  $I_{df1}$ ,  $I_{df2}$  – струми внутрішніх переходів база-колектор та база-емітер транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$ ;  $I_{f1}$ ,  $I_{f2}$ ,  $I_{r1}$ ,  $I_{r2}$  – прямий та зворотний струми транзисторів  $VT_1$  і  $VT_2$ .

Вважаючи заданими значення відповідних напруг на ємностях та струм через індуктивність, розв'яжемо систему рівнянь (1) відносно  $U_L$ ,  $i_{C_w}$ ,  $i_{C_1}$ ,  $i_{C_2}$ ,  $i_{C_3}$ ,  $i_{C_{e1}}$ ,  $i_{C_{e2}}$ ,  $i_{C_{c1}}$ ,  $i_{C_{c2}}$ .

$$\begin{cases} U_L = U_{C_w} - U_{C_{e1}} + A_6 R_1 - i_L(R_1 + R_L) - A_3, \\ i_{C_w} = A_5 - A_6 + i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{C_1} - i_{C_3}, \\ i_{C_1} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ i_{C_2} = A_4 - i_{C_w} - i_L + A_{11}, \\ i_{C_3} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{C_2}, \\ i_{C_{e1}} = A_9 + I_{br1} + I_{df1}, \\ i_{C_{e2}} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ i_{C_{c1}} = A_{11} + I_{br1} - I_{dr1}, \\ i_{C_{c2}} = i_{C_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}, \end{cases} \quad (2)$$

де  $R_{ee} = R_{e1} + R_{e2}$ ,  $A_1 = U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_{c1}}$ ,  $A_2 = U_{C_{e2}} + U_{C_{e1}} + U_{C_{e2}} + U_{C_1}$ ,  $A_3 = U_{C_1} - U_{C_{c1}}$ ,  $A_4 = U_{C_1} / R_4$ ,  $A_5 = U_{C_3} / R_3$ ,  $A_6 = (U_{C_w} - U_1 - U_L - i_L R_L) / R_4$ ,  $A_7 = (i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2}) \cdot R_{c2}$ ,  $A_8 = (U_{C_{e2}} + A_7 + U_{C_3}) / R_{b2}$ ,  $A_9 = (A_4 R_2 - A_8 R_{b2} - A_7 - A_1) / R_{ee}$ ,  $A_{10} = (A_2 + A_7 + A_9 R_{ee}) / R_{b1}$ ,  $A_{11} = (A_3 - U_{C_w} - A_{10} R_{b1}) / R_{c1}$ .

Проведемо заміну у лівій частині рівнянь системи рівнянь (2) у відповідності до виразів, які описують струми в ємностях  $i_c(t) = C \frac{dU_c(t)}{dt}$  і напруги в індуктивностях  $U_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt}$ , а також врахуємо, що всі напруги та струми у системі змінюються в часі [20]:

$$\begin{cases} L \frac{di_L(t)}{dt} = U_{C_w}(t) - U_{C_{e1}}(t) + A_6 R_1 - i_L(R_1 + R_L) - A_3, \\ C_w \frac{dU_{C_w}(t)}{dt} = A_5 - A_6 + i_{C_{e2}} - I_{br2} + I_{dr2} - i_{C_1} - i_{C_3}, \\ C_1 \frac{dU_{C_1}(t)}{dt} = -A_6 + i_L - A_{10}, \\ C_2 \frac{dU_{C_2}(t)}{dt} = A_4 - i_{C_w} - i_L + A_{11}, \\ C_3 \frac{dU_{C_3}(t)}{dt} = -A_5 + A_4 - A_8 + i_{C_2}, \\ C_{e1} \frac{dU_{C_{e1}}(t)}{dt} = A_9 + I_{br1} + I_{df1}, \\ C_{e2} \frac{dU_{C_{e2}}(t)}{dt} = A_9 + I_{br2} + I_{df2}, \\ C_{c1} \frac{dU_{C_{c1}}(t)}{dt} = A_{11} + I_{br1} - I_{dr1}, \\ C_{c2} \frac{dU_{C_{c2}}(t)}{dt} = i_{C_{e2}} - A_8 - I_{dr2} - I_{df2}. \end{cases} \quad (3)$$

□ Система рівнянь (3) є нелінійною, оскільки містить у собі нелінійні елементи, а саме дже-

рела струмів  $I_{dr}$ ,  $I_{df}$ ,  $I_{br} = (I_f - I_r) / QB$  та ємності  $C_e$ ,  $C_c$  [20]:

$$\begin{aligned} I_f &= I_S \left( e^{\frac{V_{BE}}{VT \cdot NF}} - 1 \right), \quad I_r = I_S \left( e^{\frac{V_{BC}}{VT \cdot NR}} - 1 \right), \\ I_{df} &= \frac{I_f}{BF}, \quad I_{dr} = \frac{I_r}{BR}, \end{aligned} \quad (4)$$

де  $I_S$  – струм насичення біполярного транзистора;  $V_{BE}$ ,  $V_{BC}$  – напруги на внутрішніх точках база-емітер, база-колектор;  $VT$  – температурний потенціал;  $NF$ ,  $NR$  – коефіцієнти неідеальності в нормальному та інверсному режимах;  $BF$ ,  $BR$  – максимальні коефіцієнти передачі струму за схемою із загальним емітером у нормальному та інверсному режимах;  $QB$  – коефіцієнт неідеальності переходів біполярного транзистора.

Ємності біполярного транзистора мають дифузійний та бар'єрний складники. Розглянемо окремо ємність колекторного переходу  $C_c$  [20]:

$$\begin{aligned} C_c bar &= \begin{cases} \frac{CJC}{\left(1 - \frac{V_{BC}}{V_{JC}}\right)^{MJC}}, & V_{BC} < 0; \\ CJC, & V_{BC} \geq 0. \end{cases} \\ C_c &= C_c dif + C_c bar, \quad C_c dif = \frac{(I_r + I_S) \cdot TR}{VT \cdot NR}. \end{aligned} \quad (5)$$

Ємність емітерного переходу  $C_e$  запишеться як [20]:

$$\begin{aligned} C_e bar &= \begin{cases} \frac{CJE}{\left(1 - \frac{V_{BE}}{V_{JE}}\right)^{MJE}}, & V_{BE} < 0; \\ CJE, & V_{BE} \geq 0, \end{cases} \\ C_e &= C_e dif + C_e bar; \quad C_e dif = \frac{(I_f + I_S) \cdot TF}{VT \cdot NF}; \end{aligned} \quad (6)$$

де  $C_c dif$ ,  $C_c bar$ ,  $C_e dif$ ,  $C_e bar$  – дифузійні і бар'єрні ємності колекторного та емітерного переходів;  $V_{JE}$ ,  $V_{JC}$  – контактна різниця потенціалів переходів;  $TF$ ,  $TR$  – час переносу заряду через базу в нормальному та інверсному режимах;  $MJE$ ,  $MJC$  – коефіцієнти плавності переходів;  $CJE$ ,  $CJC$  – ємність емітерного і колекторного переходів у разі нульового зміщення.

Система рівнянь (3) є динамічною математичною моделлю автогенераторного засобу для вимірювання вологості повітря, яка дозволяє визначити значення напруги та струму в будь-якій точці схеми в заданий момент часу.

Для перевірки адекватності розробленої моделі написано програму для розрахунку параметрів схеми у середовищі Maple. Розрахунок показує,

що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря справді будуть існувати періодичні коливання (рис. 4), частота яких буде змінюватись зі зміною ємності вологочутливого сенсора  $C_w(W)$ .

Так, при  $C_w(W) = 305$  пФ частота  $F = 64,530$  МГц, а при  $C_w(W) = 354$  пФ частота  $F = 58,834$  МГц, при цьому напруга живлення  $U = 5$  В. Для підтвердження теоретичних результатів та проведення експериментальних досліджень електричне коло автогенераторного засобу для вимірювання вологості з вологочутливим ємнісним елементом (рис. 1) було досліджене у середовищі схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від  $C_w(W) = 305$  пФ до  $C_w(W) = 354$  пФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%.

За результатами моделювання у середовищі LTSpice легко бачити, що на ємності  $C_5$  діє гармонічна напруга (рис. 6). Підрахувавши частоту напруги вологочутливої ємності, можна побачити, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 пФ ( $W = 20\%$ ) до 354 пФ ( $W = 95\%$ ) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц. Так, на рис. 6 наведено експериментальну залежність напруги на вологочутливій ємності від часу за відносної вологості повітря  $W = 20\%$ , при цьому частота вихідного сигналу дорівнює  $F = 64,516$  МГц. На рис. 7 наведено експериментальну залежність напруги на вологочутливій ємності від часу за відносної вологості повітря  $W = 95\%$ , що відповідає значенню вологочутливої ємності  $C_w(W) = 354$  пФ, при цьому частота вихідного сигналу дорівнює  $F = 58,823$  МГц.

За результатами теоретичних та експериментальних досліджень легко бачити, що на виході мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості повітря справді будуть існувати періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря.

Порівнявши отримані теоретичні та експериментальні значення частоти вихідного сигналу, було встановлено, що відносна похибка не перевищує 1,5%.

**Висновки.** Розроблено математичну модель мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря з вологочутливим ємнісним елементом НСН-1000. Використовуючи середовище Maple, доведена адекватність розробленої математичної моделі. Встановлено, що на виході автогенератора існують

періодичні коливання, частота яких змінюється зі зміною ємності вологочутливого елемента  $C_w(W)$ . Так, при  $C_w(W) = 305$  пФ частота  $F = 64,53$  МГц, а при  $C_w(W) = 354$  пФ частота  $F = 58,834$  МГц, при цьому напруга живлення  $U = 5$  В.

Для підтвердження теоретичних результатів автогенераторний засіб досліджено у середовищі

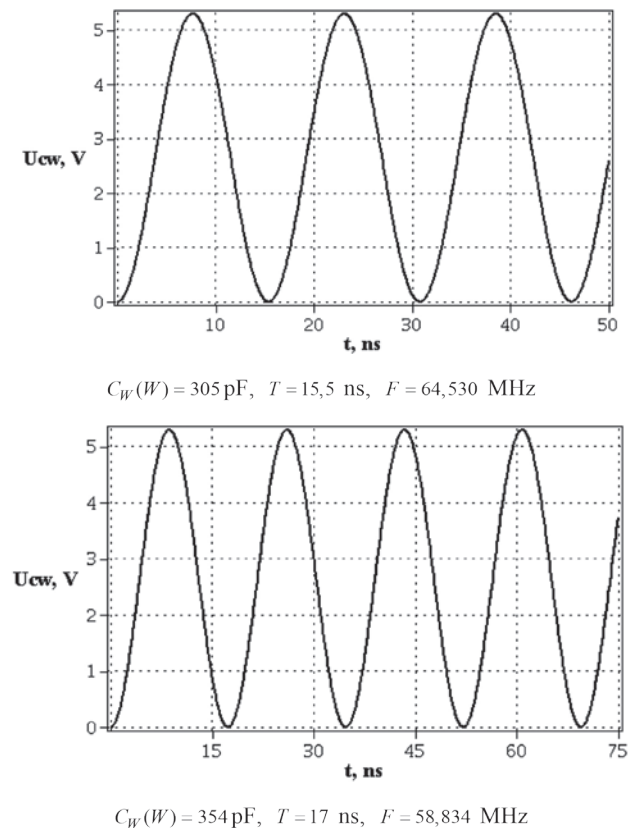


Рис. 4. Зміна напруги вологочутливої ємності від часу за різних значень ємності вологочутливого сенсора

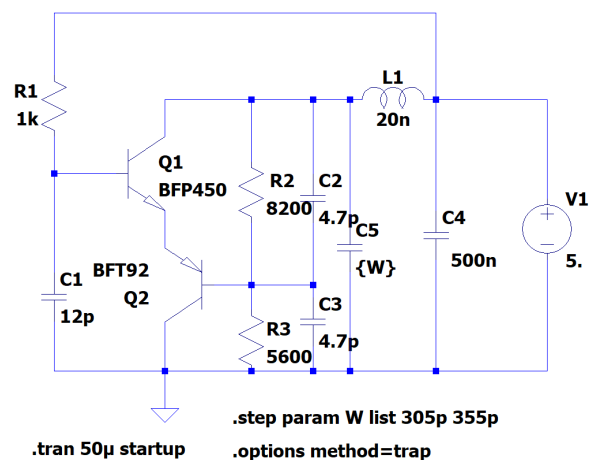


Рис. 5. Електрична схема мікроелектронного автогенераторного засобу для вимірювання вологості в LTSpice

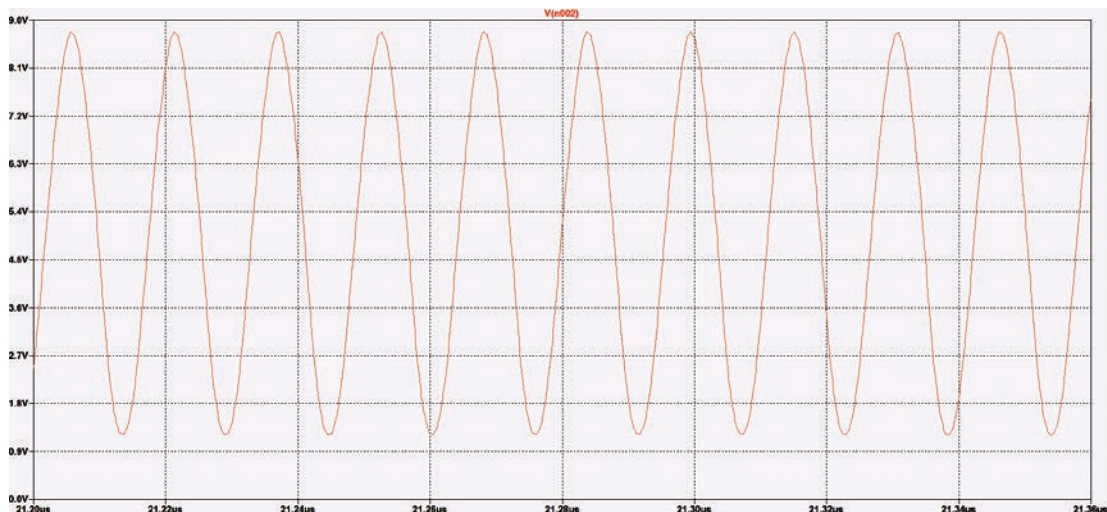


Рис. 6. Експериментальна залежність напруги вологочутливої ємності від часу за відносної вологості повітря  $W = 20\%$

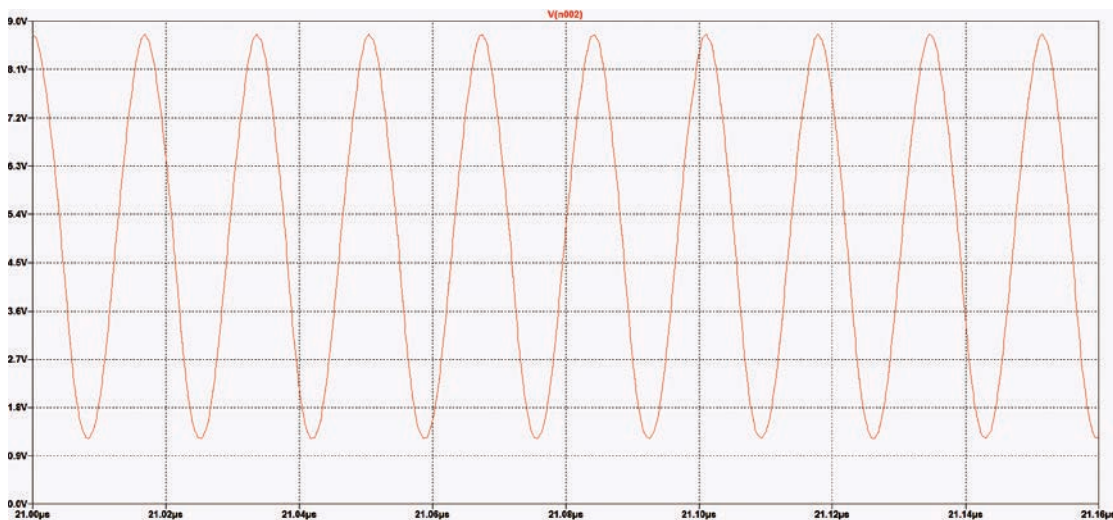


Рис. 7. Експериментальна залежність напруги вологочутливої ємності від часу за відносної вологості повітря  $W = 95\%$

схемотехнічного моделювання LTSpice. Дослідження проводились у діапазоні зміни вологочутливої ємності від 305 пФ до 354 пФ, що відповідає збільшенню значення відносної вологості повітря від 20% до 95%. За результатами моделювання у середовищі LTSpice встановлено, що зі збільшенням ємності вологочутливого елемента від 305 пФ ( $W = 20\%$ ) до 354 пФ ( $W = 95\%$ ) частота сигналу зменшується від 64,516 МГц до 58,823 МГц.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень показали, що на виході автогенераторного засобу для вимірювання відносної вологості повітря існують періодичні коливання, частота яких буде зменшуватись зі збільшенням значення відносної вологості повітря. Отримані теоретичні та експериментальні дослідження мають гарний збіг, відносна похибка не перевищує 1,5%.

#### Список літератури:

1. Bozhi Yang, Burak Aksak, Qiao Lin, Metin Sitti. Compliant and Low-cost Humidity Sensors using Nanoporous Polymer Membranes. Appeared in *Sensors and Actuators B: Chemical*. 2006. Vol. 114. No. 1. P. 254–262.
2. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. Москва : Техносфера, 2007. 384 с.

3. Датчики : справочное пособие / под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. Москва : Техносфера, 2012. 624 с.
4. Hamid Farahani, Rahman Wagiran, Mohd Nizar Hamidon. Humidity Sensors Principle, Mechanism, and Fabrication Technologies: A Comprehensive Review. *Sensors*. 2014. No.14. P. 7881–7939.
5. Mario Pelino, Carlo Cantalini. Principles and applications of ceramic humidity sensors. *Active and Passive Elec. Comp.* 1994. Vol. 16. P. 69–87.
6. Ashis Tripathy, Sumit Pramanik, Ayan Manna, Satyanarayan Bhuyan, Nabila Farhana Azrin Shah, Zamri Radzi, Noor Azuan Abu Osman. Design and Development for Capacitive Humidity Sensor Applications of Lead-Free Ca, Mg, Fe, Ti-Oxides-Based Electro-Ceramics with Improved Sensing Properties via Physisorption. *Sensors*. 2016. No. 16. P. 1135.
7. Nathan Lazarus, Sarah S. Bedair, Chiung-C. Lo, and Gary K. Fedder. CMOS-MEMS Capacitive Humidity Sensor. *Journal of microelectromechanical system*. 2010. Vol. 19. No. 1. P. 183–191.
8. Zhi Chen, Chi Lu. Humidity Sensors: A Review of Materials and Mechanisms. *Sensor Letters*. 2005. Vol. 3. P. 274–295.
9. Маргелов А. Датчики влажности компании Honeywell. *Chip News*. 2005. № 8(101). С. 40–42.
10. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В. Сенсори вологості : монографія. Вінниця : УНІВЕРСУМ, 2003. 208 с.
11. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. Винница : «Универсум-Винница», 1999. 275 с.
12. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Seletskia O.O., Kisała P., Nurseitova K. Theory of photoreactive effect in bipolar and MOSFET transistors. *Proceedings SPIE Volume 11176, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High-Energy Physics Experiments*, 2019. 111761I.
13. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A., Maksat Kolimoldayev, Paweł Komada, Kanat Mussabekov. Optical transducers with frequency output. *Proc. SPIE 10445, Photonics Applications in Astronomy, Communications, Industry, and High Energy Physics Experiments*, 2017, 104451X.
14. Osadchuk A., Osadchuk V., Seletskia O., L. Krylik L. Microelectronic Transducer of Gas Concentration based on MOSFET with an Active Inductive Element. *PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY*, R. 95. Warszawa, Poland. 2019. No. 4. P. 237–241.
15. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О. Математична модель мікроелектронного вимірювача вологості з частотним виходом. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2019. № 5 (277). С. 195–198.
16. Осадчук О.В., Крилик Л.В., Осадчук Я.О. Математична модель параметричного перетворювача вологості з частотним виходом. *Прикладні питання математичного моделювання*. Т. 3. № 2.1. 2020. С. 206–215.
17. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Звягін О.С. Проблеми вимірювання вологості нафтопродуктів та метод підвищення його точності. *Нові технології. Науковий вісник Кременчуцького університету економіки, інформаційних технологій і управління*. 2010. № 1 (27). С. 135–139.
18. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Крилик Л.В., Селецька О.О., Мартинюк В.В. Мікроелектронний перетворювач «вологість-частота» з ємнісними елементами на основі вологочутливих пористих шарів. *Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки*. 2018. № 1 (257). С. 83–87.
19. Осадчук О.В., Звягін О.С., Савицький А.Ю., Барабан С.В., Селецька О.О. The radiomeasuring humidity sensor with the frequency output signal. *Вісник Хмельницького національного університету*. 2016. № 6. С. 216–218.
20. Осадчук В.С., Осадчук О.В., Звягін О.С. Частотні перетворювачі для контролю вологості нафтопродуктів : монографія. Вінниця : ВНТУ, 2014. 152 с.

#### **Osadchuk A.V., Krylik L.V., Zviahin O.S., Osadchuk I.A. MATHEMATICAL MODEL OF A MICROELECTRONIC GENERATING MEAN FOR MEASURING HUMIDITY**

*A mathematical model of a microelectronic autogenerating device for measuring the relative humidity of air has been developed. The microelectronic frequency transducer of humidity is developed on the basis of a transistor structure with a negative differential resistance based on two bipolar transistors and a capacitive element that is sensitive to moisture. The negative differential resistance obtained by parallel connection of the impedance with a capacitive component on the collector-collector electrodes of the bipolar transistor structure and inductance leads to the occurrence of electrical oscillations in the circuit of the autogenerating humidity transducer. Using the Maple environment, the adequacy of the developed mathematical model has been proved. It was found that there are periodic oscillations at the output of the autogenerator, the frequency of which changes with a change in the capacitance of the humidity sensitive element. So, at 305 pF the frequency is 64.53 MHz, and at 354 pF the frequency is 58.82 MHz, while the supply voltage is 5 V.*

*To confirm the theoretical results, the autogenerating means were investigated in the LTSpice circuit simulation environment. The studies were carried out in the range of variation of the humidity sensitive capacitance from 305 pF to 354 pF, which corresponds to an increase in the value of the relative air humidity from 20% to 95%. Based on the results of modelling in the LTSpice environment, it was found that with an increase in the capacitance of the humidity sensitive element from 305 pF ( $W = 20\%$ ) to 354 pF ( $W = 95\%$ ), the signal frequency decreases from 64.516 MHz to 58.823 MHz.*

*The results of theoretical and experimental studies have shown that at the output of an autogenerating device for measuring the relative humidity of air, there are periodic fluctuations, the frequency of which will decrease with an increase in the value of the relative humidity of the air. The obtained theoretical and experimental studies are in good agreement, the relative error does not exceed 1.5%.*

**Key words:** *frequency transducer of humidity, humidity sensitive capacitive element, negative differential resistance, periodic oscillations, frequency.*



## Відомості про авторів

**Азізов Т.Н.** – доктор технічних наук, професор, Уманський державний педагогічний університет імені Павла Тичини

**Акмалдінова В.Є.** – старший викладач кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

**Бажак О.В.** – асистент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Баклан Д.В.** – аспірант кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Баклан І.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформатики та програмної інженерії (автоматизованих систем обробки інформації та управління) Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Белашов Ю.О.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

**Бичковський Ю.В.** – старший викладач кафедри навігації і керування судном Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

**Білецький М.С.** – аспірант 1 курсу групи А-АК-1-3 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

**Блаженний Н.В.** – старший викладач кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету телекомунікацій

**Букатенко Н.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Волков Д.В.** – аспірант кафедри автомобільного транспорту ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

**Волковська Г.Г.** – старший викладач кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

**Воскресенський В.Б.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Гаврилова А.А.** – студент кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Гламаздін П.М.** – доцент кафедри теплотехніки Київського національного університету будівництва і архітектури

**Глухова Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кіберфізичних та інформаційно-вимірювальних систем Національного технічного університету «Дніпровська політехніка»

**Голуб Л.С.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Гребенюк А.М.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Губар Т.М.** – здобувач факультету готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Національного університету харчових технологій

**Гуйда О.Г.** – кандидат наук державного управління, старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Дакі О.А.** – доктор технічних наук, доцент, директор Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Данилян А.Г.** – старший викладач кафедри судових енергетичних установок і систем Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Добряк Д.О.** – науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Дяченко А.А.** – студент Київського національного університету будівництва і архітектури

**Забіяка Н.А.** – доктор філософії, асистент кафедри хімічної техніки та промислової екології Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Завгородній О.І.** – доктор технічних наук, професор кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Залюбовський М.Г.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Замковий І.Т.** – студент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Звягін О.С.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Злотенко Б.М.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

**Зозуля Б.М.** – здобувач вищої освіти Національної академії Національної гвардії України

**Кандиба І.О.** – викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Кануннікова Н.О.** – доктор філософії, аспірант 4-го курсу групи А-161-7 кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

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

**Кисельов Г.Д.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Кишенько В.Д.** – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

**Кірей К.О.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії програмного забезпечення Чорноморського національного університету імені Петра Могили

**Когут Д.О.** – здобувач факультету готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Національного університету харчових технологій

**Козак Є.Б.** – магістр в галузі комп'ютерних наук, розробник програмного забезпечення, інженер-програміст GAN Inc.

**Козюба М.М.** – провідний науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Колос К.Р.** – доктор педагогічних наук, професор кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Котко Я.М.** – кандидат економічних наук, старший викладач кафедри підприємництва, торгівлі та біржової діяльності Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Коцун В.І.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри математики та комп'ютерних дисциплін ПВНЗ «Європейський університет»

**Кошель А.В.** – магістр Київського національного університету імені Тараса Шевченка, розробник програмного забезпечення ТОВ «Арткай»

**Кравченко Н.В.** – молодший науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Крикун О.М.** – науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Крилик Л.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук Вінницького національного технічного університету

**Крищенко Д.О.** – аспірант 1 курсу групи А-АК-1-2 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

**Кужелович В.І.** – старший викладач кафедрм автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

**Кулагін Е.О.** – курсант 4-го курсу спеціальності «Управління судновими технічними системами і комплексами» Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Кулік Т.І.** – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

**Кучер А.Є.** – аспірант 3 курсу групи А-АК-3-3 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

**Латанська Л.О.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Лебідь Г.О.** – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

**Левкін А.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри кібернетики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Левкін Д.А.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри вищої математики Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка

**Левченко Є.П.** – аспірант кафедри технологій природних і синтетичних полімерів, жирів та харчової продукції ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет»

**Лисенко О.І.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Ліганенко В.В.** – асистент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ловська А.О.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Луценко Ю.В.** – начальник сектору Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Ляшенко О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Майзеліс А.О.** – доктор технічних наук, старший науковий співробітник кафедри технічної електрохімії Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Макарова Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Маслов І.З.** – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри експлуатації судових енергетичних установок і систем Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Медведєв М.Г.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Мельник О.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету, капітан далекого плавання

**Мельніков С.М.** – старший викладач, Національна академія Національної гвардії України

**Миронюк О.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Мовчан К.О.** – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби Безпеки України

**Нікітенко Є.В.** – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних та комп'ютерних систем, Навчально-науковий інститут електронних та інформаційних технологій, Національний університет «Чернігівська політехніка»

**Нікулін О.Ф.** – доктор технічних наук, головний науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Новіков В.І.** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри телекомунікаційних систем Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Овсяник А.Г.** – здобувач факультету готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Національного університету харчових технологій

**Олещенко Л.М.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Омецинська Н.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

**Осадчук О.В.** – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Осадчук Я.О.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри радіотехніки Вінницького національного технічного університету

**Осипенко В.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

**Панасюк І.В.** – доктор технічних наук, професор, директор Навчально-наукового інституту інженерії та інформаційних технологій Київського національного університету технологій та дизайну

**Петренко М.В.** – старший викладач Відкритого міжнародного університету розвитку людини «Україна»

**Петросян А.Р.** – студент першого курсу магістратури Державного університету «Житомирська політехніка»

**Петросян Р.В.** – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

**Підтиченко О.В.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій імені Б.Б. Самотокіна Державного університету «Житомирська політехніка»

**Прачик В.В.** – аспірант кафедри програмних засобів і технологій Херсонського національного технічного університету

**Приходько К.С.** – кандидат технічних наук, викладач кафедри інформаційних управляючих систем і технологій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Пухалевич А.В.** – кандидат технічних наук, викладач кафедри програмного забезпечення автоматизованих систем Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Рибін А.В.** – старший викладач кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

**Савченко О.В.** – науковий співробітник Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

**Сарнацький В.В.** – аспірант II року навчання групи ПІ-91ф кафедри інформатики та програмної інженерії (автоматизованих систем обробки інформації та управління), факультет інформатики та обчислювальної техніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Сивобородько А.В.** – заступник начальника центру Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Скакун О.В.** – науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

**Соков В.М.** – асистент кафедри будівельної механіки та конструкції корпусу корабля Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Срібняк Н.М.** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет

**Стаценко В.В.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

**Стаценко Д.В.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та електромеханіки Київського національного університету технологій та дизайну

**Суровицький С.В.** – молодший науковий співробітник кафедри фізики металів і напівпровідників Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

**Сушин І.О.** – аспірант кафедри телекомунікацій Інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Тачиніна О.М.** – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

**Тимошевська Т.І.** – кандидат економічних наук, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

**Тищенко О.М.** – старший викладач факультету готельно-ресторанного та туристичного бізнесу Національного університету харчових технологій

**Тірон-Воробйова Н.Б.** – кандидат технічних наук, доцент кафедри загальнонаукових дисциплін Дунайського інституту Національного університету «Одеська морська академія»

**Тришин В.В.** – старший викладач кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Урум Н.С.** – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Ушкаренко О.О.** – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри програмованої електроніки, електротехніки і телекомунікацій Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова

**Федунов В.М.** – асистент кафедри судноводіння та експлуатації технічних систем на водному транспорті Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

**Фомін О.В.** – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

**Фролова Н.Е.** – доктор технічних наук, професор кафедри «Технології ресторанної та аюрведичної продукції» Національного університету харчових технологій

**Циганенко Л.А.** – кандидат технічних наук, доцент, Сумський національний аграрний університет

**Шаптала Р.В.** – аспірант, асистент кафедри системного проектування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

**Шевченко Ю.В.** – кандидат економічних, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

**Юсипів Т.В.** – старший викладач кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики, Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

**Якусевич Ю.Г.** – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та інженерно-технічних дисциплін Дунайського інституту водного транспорту Державного університету інфраструктури та технологій

Науковий журнал

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

**Серія: Технічні науки**

**Том 32 (71) № 4 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. 29,01. Ум. друк. арк. 35,11. Зам. № 0921/321

Підписано до друку 15.09.2021. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефон +38 (048) 709 38 69,

+38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: [mailbox@helvetica.ua](mailto:mailbox@helvetica.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 6424 від 04.10.2018 р.