

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

Журнал заснований у 1918 році

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

Серія: Технічні науки

Том 34 (73) № 1 2023



Видавничий дім
«Гельветика»
2023

Головний редактор:

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

Члени редакційної колегії:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**Рекомендовано до друку та поширення через мережу Internet
Вченою радою Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського
(протокол № 10 від 22.03.2023 року)**

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

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

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

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

ISSN 2663-5941 (Print)

ISSN 2663-595X (Online)

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

ЗМІСТ

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Габовда О.В.

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГІБРИДНОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА
ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ.....1

Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В.

ЗУСИЛЛЯ ПРИТИСКУ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ
ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ.....9

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Гуриненко С.О.

КОНЦЕПТ УНІВЕРСАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНФОРМАЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТА
ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ.....18

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Бунько В.Я.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЖЕРЕЛА АВТОНОМНОГО
ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ.....25

ПРИЛАДИ

Романюк В.А., Стародубцев С.О.

ОЦІНКА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ ПРОТИДІЇ СНАЙПЕРАМ.....31

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Бараннік В.В., Шульгін С.С., Онищенко Р.С., Ігнат'єв О.О.

МЕТОДОЛОГІЯ КОДУВАННЯ ТРАНСФОРМОВАНИХ ВІДЕОСЕКМЕНТІВ
В УСІЧЕНО-ПОЗИЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ.....38

Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Новіков В.І., Фуртат О.В., Фуртат С.О.

МЕТОД АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ СТЕНДУ
НАПІВНАТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МІНІДРОНУ.....43

Сайко В.Г., Наритник Т.М., Баховський П.Ф.

МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ
МЕРЕЖНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ.....51

Сібрुक Л.В., Слободян О.П., Єнчев С.В.

СПОСІБ І ПРИСТРІЙ ВИМІРЮВАННЯ ПОЧАТКОВОЇ ФАЗИ ГАРМОНІЧНОГО
РАДІОСИГНАЛУ НА ОСНОВІ МАГНІТООПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....57

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

Гайдукевич С.В., Семенова Н.П.

ІННОВАЦІЙНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЖИТТЯ ЛЮДЕЙ.....67

Гнатчук Є.Г., Засорнова І.О., Рей К.С.

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВАКЦИНАЦІЇ ВІД COVID-19.76

Гоменюк С.І., Козуб В.Ю.

ПАРАЛЛЕЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦІ ЖОРСТКОСТІ СКІНЧЕННОГО
ЕЛЕМЕНТА.....82

Киричек Г.Г., Тягунова М.Ю., Латишев А.В.

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗШОВНОЇ МЕРЕЖІ
НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ МІКРОТІК CAPSMAN88

Кишенько В.Д., Крищенко Д.О., Ромашук О.М., Горпинченко А.С.

ОЦІНКА ХАРАКТЕРНИХ ПРОЯВІВ ПОВЕДІНКИ
СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ.....95

Кулінченко Г.В., Панич А.О., Журба В.О., Соколов С.В. МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ ПІДГРІВУ ГАЗУ.....	101
Левкін Д.А., Жерновникова О.А., Штонда О.Г. УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ В БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ.....	108
Лісовець С.М., Кисельов В.Б., Ківа І.Л., Гуйда О.Г., Фуртат О.В. ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ПО ШВИДКОСТІ.....	113
Марчук Д.К., Кравченко С.М., Левченко А.Ю., Лежньов І.Я. ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ГРОШОВОЇ ВАРТОСТІ АВТОМОБІЛІВ.....	119
Олещенко Л.М., Вернік М.О. ПРИНЦИПИ РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАЕВРЕСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ.....	126
Falkevych V.G., Lisniak A.O. METHODOLOGY OF CACHE INVALIDATION IN MICROSERVICES ARCHITECTURE OF THE WEB APPLICATIONS.....	131
Хазанович Ю.Ю., Киричук Ю.В., Черепанська І.Ю. МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КІНЦІВОК КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТУ У ПРОСТОРІ.....	136
Чумаченко С.М., Кутовий О.П., Попель В.А., Гуйда О.Г., Заїка Н.В., Мурасов Р.К. НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ЇЇ ОБ'ЄКТІВ ВІД БПЛА І КРИЛАТИХ РАКЕТ.....	144

ЕНЕРГЕТИКА

Баранюк О.В., Воробйов М.В., Рябцун Р.В. МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТАНО-ВОДНЕВОЇ СУМІШІ ЯК ПАЛИВНОГО ГАЗУ.....	155
Босий М.В., Боса О.А., Ботнаренко В.О., Герасименко І.О. ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНОГО ЦИКЛУ ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	162
Босий М.В. ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ДИСОЦІАЦІЇ ГАЗОГІДРАТУ МЕТАНУ	169
Вербинець В.М., Шерстньов Ю.В., Сільченко С.А., Купін А.І., Осадчук Ю.Г., Савицький О.І. АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМИ ПРИСТРОЯМИ ЗА УМОВИ НАЯВНОСТІ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ.....	173
Кирисов І.Г., Михайлов Б.К., Лосенко Є.В. ВПЛИВ ЗАТІНЕННЯ ТА ПОШКОДЖЕНЬ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ЇХ ПАРАМЕТРИ.....	180
Пантелєєва І.В., Шматько Н.М. ТЕХНІЧНІ ПИТАННЯ РОБОТИ ОБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У СКЛАДІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ.....	186
Прокопенко О.О., Антоненко Н.С., Гулей О.Б. ВИХРОВИЙ ВИТРАТОМІР ОБ'ЄМНИХ ТА МАСОВИХ ВИТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ.....	192
Furtat I.E., Furtat Yu.O. DETERMINING PARAMETERS AND SIMULATING THE MOVEMENT OF THE TEMPERATURE FRONT IN NON-ISOTHERMAL FILTRATION.....	199

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

Золотарьова О.В. ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗКЛАДАННЯ ФОСФОРВМІСНОЇ СИРОВИНИ МІНЕРАЛЬНИМИ КИСЛОТАМИ.....	203
---	-----

Kutovyi D.S., Kazakov V.V. OPTIMIZATION OF THE GASIFICATION PROCESS OF LOW-METAMORPHOSED COAL: REGRESSION ANALYSIS.....	211
Мельник Л.І. АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТРУМОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ.....	219
Радовенчик Я.В., Гордієнко К.Ю., Крисенко Т.В., Іваненко О.І. ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ СПОЛУК МАГНІЮ З ВОДИ В ПРОЦЕСАХ ЇЇ ПОМ'ЯКШЕННЯ.....	225
Римар Т.Е. ЗАСТОСУВАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ЗАПОВНЮВАЧА ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДИННОСКЛЯНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ОТРИМАНИХ ПІД ДІЄЮ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ.....	231

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Єфімова В.Г. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІОЛОГІЧНО АКТИВНОЇ ДОБАВКИ З НАСІННЯ САФЛОРУ.....	237
Фролова Н.Е., Польова О.А., Цикало Д.Ю., Віноградов В.М., Демчук П.В., Біленький П.С. ПРО МОЖЛИВОСТІ РОЗШИРЕННЯ АЮРВЕДИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ПРИРОДНИМИ РОСЛИННИМИ ДЖЕРЕЛАМИ.....	242
Ющенко Н.М., Фролова Н.Е., Шульженко В.В., Запорожець О.В., Романовський Д.С. УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АНГЛІЙСЬКИХ МАННИХ ПУДИНГІВ.....	248

ТРАНСПОРТ

Кириченко О.С. ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З РІЗНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ФОРМАМИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТУ.....	256
Коваленко Л.О. СТАН І ОСНОВНІ ПРИЧИНИ АВАРІЙНОСТІ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ.....	264
Лебідь Є.М., Лужанська Н.О., Лебідь І.Г. ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ПРИ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ.....	268
Ловська А.О. ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА МІЦНІСТЬ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ КРИТОГО ВАГОНА.....	276
Півторак Г.В., Булишин Н.А. ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ РОЗВИТКУ КРАУДШИПІНГУ У ЛЬВОВІ.....	281
Семичаєвський С.В., Присяжнюк В.В., Осадчук М.В., Якіменко М.Л. ЩОДО НЕОБХІДНОСТІ ОБГРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ТИПІВ ПЕРВИННИХ ЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ.....	288
Сільванська Г.Н., Карп Г.В. МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ РЕГУЛЯРНОГО КРУЇЗНОГО МАРШРУТУ.....	295
Соколова О.Є., Чередніченко К.В. МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОГО РИНКУ АВІАЦІЙНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ.....	306
Фомін О.В., Козинка О.С. ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ТИПОВИХ І КОМПОЗИТНИХ КРИШОК ЛЮКІВ НАПІВВАГОНІВ.....	317
Черненко П.В. ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ОБЛАДНАННЯ ДІЛЯНКИ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ СУЧАСНИМ УСТАТКУВАННЯМ.....	322

Чупайленко О.А., Білоус М.В., Колесник Ю.О., Поліщук Р.В. ВИЗНАЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ І МИТНИХ РИЗИКІВ У МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ МЕТОДОМ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК.....	329
---	-----

БУДІВНИЦТВО

Ніжник В.В., Савченко О.В., Добряк Д.О. КРИТЕРІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК.....	336
Ніжник В.В., Присяжнюк В.В., Савченко О.В. АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ДИМО- ТА ТЕПЛОВИДАЛЕННЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ.....	342

ЕЛЕКТРОНІКА

Бурик І.П., Бібик В.В., Гричановська Т.М., Бурик М.П. МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ МОЛІБДЕН СУЛЬФІДУ.....	348
Осадчук Я.О. АВТОГЕНЕРАТОРНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІПОЛЯРНИМ І ПОЛЬОВИМ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ.....	354
ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ.....	364

CONTENTS

INDUSTRIAL ENGINEERING

Habovda O.V.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF HYBRID ADDITIVE PRODUCTION
AND PROSPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN UKRAINE.....1

Rudasov V.B., Yakubovskiy O.M., Holovina O.V.

THE HOLDDOWN PRESSURE IN THE PROCESS OF SHEET-METAL STAMPING
OF HIGH-STRENGTH STEELS.....9

SHIPBUILDING

Gurynenko S.O.

THE CONCEPT OF UNIVERSAL INFORMATION TRANSDUCER
AS AN ELEMENT OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS.....18

ELECTRICAL ENGINEERING

Bunko V.Ya.

RESEARCH OF THE QUALITY OF THE ELECTRIC ENERGY OF THE SOURCE
OF AUTONOMOUS ELECTRICITY SUPPLY..... 25

EQUIPMENT

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O.

EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF LASER ANTI-SNIPER SYSTEMS.....31

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Barannik V.V., Shulgin S.S., Onyshchenko R.S., Ignatyev O.O.

CODING METHODOLOGY FOR TRANSFORMED VIDEO SEGMENTS
IN TRUNCATED-POSITIONAL SPACE.....38

Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Furtat O.V., Furtat S.O.

THE METHOD OF ALGORITHMIC MODERNIZATION OF THE DRIVE CONTROL SYSTEM
OF THE SEMI-NATURAL SIMULATION STAND OF MINIDRON MOTION.....43

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Bakhovskiy P.F.

A MODEL FOR IMPROVING QUALITY OF SERVICE INDICATORS OF A HETEROGENEOUS
NETWORK INFRASTRUCTURE IN THE TERAHERTZ RANGE..... 51

Sibruk L.V., Slobodian O.P., Yenchov S.V.

METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE INITIAL PHASE OF A HARMONIC RADIO
SIGNAL BASED ON A MAGNETO-OPTICAL TRANSDUCER..... 57

INFORMATICS, COMPUTER ENGINEERING AND AUTOMATION

Haidukevych S.V., Semenova N.P.

INNOVATIVE TENDENCIES IN IMPROVING THE STANDARD OF PEOPLE'S LIVING.....67

Hnatchuk Ye.H., Zasornova I.O., Rei K.S.

DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM ABOUT THE POSSIBILITY
OF VACCINATION AGAINST COVID-1976

Homeniuk S.I., Kozub V.Yu.

PARALLEL ALGORITHM FOR FORMATION OF THE STIFFNESS MATRIX OF A FINITE ELEMENT.. 82

Kyrychek H.H., Tiahunova M.Yu., Latyshev A.V.

SIMULATION OF WORKING CHARACTERISTICS A SEAMLESS NETWORK BASED
ON MIKROTIK CAPSMAN TECHNOLOGY..... 88

Kyshenko V.D., Kryshchenko D.O., Romaschuk O.M., Gorpichenko A.S.

ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTIC MANIFESTATIONS OF THE BEHAVIOR
OF COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECTS..... 95

Kulinchenko H.V., Panych A.O., Zhurba V.O., Sokolov S.V. MODELING OF THE GAS HEATING TEMPERATURE REGULATOR.....	101
Levkin D.A., Zhernovnykova O.A., Shtonda O.H. QUALITY MANAGEMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS IN BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES..	108
Lisovets S.M., Kyselov V.B., Kiva I.L., Guida O.G., Furtat O.V. RESEARCH OF CONTROL CIRCUIT OF ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT BY SPEED....	113
Marchuk D.K., Kravchenko S.M., Levchenko A.Yu., Lezhnyov I.Ya. USING TIME SERIES IN FORECASTING THE CASH VALUE OF CARS.....	119
Oleshchenko L.M., Vernik M.O. PRINCIPLES OF RECOMMENDER SYSTEMS DEVELOPMENT USING METAHEURISTIC OPTIMIZATION	126
Falkevych V.G., Lisniak A.O. METHODOLOGY OF CACHE INVALIDATION IN MICROSERVICES ARCHITECTURE OF THE WEB APPLICATIONS.....	131
Khazanovych Yu.Yu., Kyrychuk Yu.V., Cherepanska I.Yu. METHOD OF DETERMINING THE POSITION OF THE EXTREMITIES OF A STEPPING MOBILE ROBOT IN SPACE.....	136
Chumachenko S.M., Kutovoi O.P., Popel V.A., Guida O.G., Zaika N.V., Murasov R.K. SCIENTIFIC-METHODICAL APPROACH REGARDING CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY ASSESSMENT ON THE BASIS OF THE COMPLEX OF TOOLS FOR THE PROTECTION OF ITS FACILITIES FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES AND CRUISE MISSILES.....	144

POWER ENGINEERING

Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Ryabtsun R.S. SIMULATION OF ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF DKVR-10-13 BOILER OPERATION USING METHANE-HYDROGEN MIXTURE AS FUEL GAS.....	155
Bosyi M.V., Bosa O.A., Botnarenko V.O., Gerasymenko I.O. ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING THE STEAM COMPRESSION CYCLE OF THE AIR HEAT PUMP IN AGRICULTURAL PRODUCTION.....	162
Bosyi M.V. NUMERICAL METHOD OF DETERMINING THE RATE OF DISSOCIATION OF METHANE GAS HYDRATE.....	169
Verbynets V.M., Sherstnov Yu.V., Silchenko S.A., Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I. CONTROL ALGORITHM OF FILTER-COMPENSATING DEVICES UNDER THE CONDITIONS OF THE PRESENCE OF SYNCHRONOUS MOTORS.....	173
Kyrysov I.G., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. INFLUENCE OF SHADING AND DAMAGE OF SOLAR BATTERIES ON THEIR PARAMETERS...180	180
Pantielieieva I.V., Shmatko N.M. TECHNICAL ISSUES OF THE OPERATION OF DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES AS PART OF THE ENERGY SYSTEM.....	186
Prokopenko O.O., Antonenko N.S., Huley O.B. VORTEX FLOW METER OF VOLUMETRIC AND MASS FLOW RATES OF NATURAL GAS OF THE GAS COMPRESSOR UNIT AT THE COMPRESSOR STATION.....	192
Furtat I.E., Furtat Yu.O. DETERMINING PARAMETERS AND SIMULATING THE MOVEMENT OF THE TEMPERATURE FRONT IN NON-ISOTHERMAL FILTRATION.....	199

CHEMICAL TECHNOLOGY

Zolotarova O.V. POTENTIOMETRIC STUDIES OF THE DECOMPOSITION OF PHOSPHORUS-CONTAINING MATERIALS BY MINERAL ACIDS.....	203
Kutovyi D.S., Kazakov V.V. OPTIMIZATION OF THE GASIFICATION PROCESS OF LOW-METAMORPHOSED COAL: REGRESSION ANALYSIS.....	211

Melnyk L.I.	
ASPECTS OF MANUFACTURING OF CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES.....	219
Radovenchuk I.V., Gordienko K.Yu., Krysenko T.V., Ivanenko O.I.	
INCREASING THE EFFICIENCY OF REMOVAL OF MAGNESIUM COMPOUNDS FROM WATER IN ITS SOFTENING PROCESSES.....	225
Rimar T.E.	
APPLICATION OF GRANULAR AGGREGATE TO IMPROVE THE PROPERTIES OF LIQUID GLASS THERMAL INSULATION MATERIALS OBTAINED UNDER THE ACTION MICROWAVE RADIATION.....	231

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Yefimova V.G.	
STUDY OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A SAFFLOWER BIOLOGICALLY ACTIVE SUPPLEMENT.....	237
Frolova N.E., Poleva O.A., Tsykalo D.Yu., Vynogradov V.M., Demchuk P.V., Bilenkyi P.S.	
OPPORTUNITIES TO EXPAND AYURVEDIC PRODUCTS WITH NATURAL PLANT SOURCES....	242
Yushchenko N.M., Frolova N.E., Shulzhenko V.V., Zaporozhets O.V., Romanovskiy D.S.	
IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ENGLISH SEMPAN PUDDINGS.....	248

TRANSPORT

Kyrychenko O.S.	
COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC MODULES WITH DIFFERENT GEOMETRIC SHAPES OF SEMICONDUCTORS FOR TRANSPORT ELECTRICAL EQUIPMENT	256
Kovalenko L.A.	
STATE AND MAIN CAUSES OF ACCIDENTS ON THE ROADS OF THE KHARKOV REGION.....	264
Lebid Ie.M., Luzhanska N.O., Lebid I.H.	
RATIONALE FOR THE CHOICE OF A LOGISTIC CHAIN TO ENSURE THE EFFICIENCY OF BUSINESS PROCESSES IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION.....	268
Lovska A.O.	
RESEARCH OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE STRENGTH OF THE BEARING STRUCTURE OF A COVERED RAILROAD CAR	276
Pivtorak H.V., Bulyshyn N.A.	
ASSESSMENT OF OPPORTUNITIES FOR CROWDSHIPING DEVELOPMENT IN LVIV	281
Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L.	
CONCERNING THE NEED TO JUSTIFY PARAMETERS AND TYPES OF PRIMARY FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT WHEELED VEHICLES.....	288
Silvanskaya G.N., Karp G.V.	
METHODOLOGY FOR ORGANIZING A REGULAR CRUISE ROUTE IN MODERN CONDITIONS....	295
Sokolova O.Ye., Cherednichenko K.V.	
METHODS AND MODELS OF SHORT-TERM FORECASTING OF THE EUROPEAN AIR TRANSPORT MARKET.....	306
Fomin O.V., Kozynka O.S.	
FUNDS OF CONTROL OF TYPICAL AND COMPOSITE HATCH COVERS OF GONDOLAS.....	317
Chernenko P.V.	
PROPOSALS FOR EQUIPMENT OF THE MAINTENANCE AND REPAIR SITE OF DIESEL ENGINE FUEL EQUIPMENT WITH MODERN EQUIPMENT.....	322
Chupaylenko O.A., Bilokur M.V., Kolesnyk Yu.O., Polishchuk R.V.	
DETERMINATION OF TRANSPORT AND CUSTOMS RISKS IN INTERNATIONAL TRUCK TRANSPORTATION USING THE METHOD OF EXPERT ASSESSMENTS.....	329

CONSTRUCTION

Nizhnyk V.V., Savchenko O.V., Dobriak D.O.

CRITERIA FOR STUDYING THE INFLUENCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS
ON INDIVIDUAL FIRE RISK.....336

Nizhnyk V.V., Prisyazhnuk V.V., Savchenko O.V.

ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF USE OF SMOKE AND HEAT EXTRACTION MEANS
BY FIRE AND RESCUE DEPARTMENTS.....342

ELECTRONICS

Buryk I.P., Bibyk V.V., Grychanovs'ka T.M., Buryk M.P.

SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A CHANNEL FIELD TRANSISTOR BASED
ON MOLYBDENUM SULPHIDE.....348

Osadchuk I.O.

SELF-OSCILLATING MICROELECTRONIC MAGNETIC FIELD SENSORS
WITH BIPOLAR AND FIELD MAGNETIC-SENSITIVE TRANSISTORS.....354

INFORMATION ABOUT AUTHORS..... 364

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-93

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/01>**Габовда О.В.**

Мукачівський державний університет

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ГІБРИДНОГО АДИТИВНОГО ВИРОБНИЦТВА ТА ПЕРСПЕКТИВИ ЙОГО ВПРОВАДЖЕННЯ В УКРАЇНІ

У статті висвітлені переваги гібридного адитивного виробництва, розглянуті сучасні гібридні адитивні машини провідних світових компаній, проведений порівняльний аналіз їх технічних характеристик та адитивних технологій, на основі яких вони побудовані, надані рекомендації щодо виробів, які доцільніше виготовляти на цих машинах. Актуальність статті зумовлено невинним розвитком гібридних адитивних систем, які суміщають адитивні і субтрактивні процеси на одній виробничій платформі, в склад якої зазвичай входять багатівісний обробний центр і лазерні коаксіальні головки, для прямого осадження металевих порошків або дроту в залежності від використовуваної адитивної технології. Система дозволяє практично на будь-якій машині з ЧПК виконувати адитивні операції разом з фрезерними, токарними, шліфувальними та іншими в одній установці, причому різальні інструменти та лазерні головки розміщені у одному інструментальному магазині і подаються з нього у відповідності з послідовністю технологічного процесу обробки деталей завдяки оснащенню машин інтегрованими системами програмування. Досвід українських підприємств, на яких багато застарілого обладнання, у використанні адитивних технологій достатньо обмежений, особливо це стосується впровадження гібридних адитивних процесів. У статті висвітлені досягнення українських компаній, які розробляють нові оригінальні адитивні технології та обладнання. У зв'язку з війною в Україні ситуація на виробництві погіршується. Але в перспективі кардинальна трансформація українського виробництва є неминучою. Метою дослідження є порівняльний аналіз технічних характеристик та технологій найсучасніших гібридних адитивних машин як підґрунтя для більш ретельного підходу підприємств до придбання гібридного адитивного обладнання, а також переосмислення ролі інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності.

Ключові слова: гібридизація, адитивні технології, субтрактивні процеси, гібридні адитивні машини, інновації, конкурентоспроможність.

Постановка проблеми. Більшість деталей, виготовлених за допомогою адитивних технологій, проходять механічну пост-обробку у зв'язку з необхідністю забезпечити потрібну шорсткість поверхонь та більш жорсткі допуски. Спосіб остаточної обробки деталей після адитивного процесу багато, але у теперішній час з'явилася тенденція розробки систем, що поєднують адитивні (AM, Additive manufacturing) і субтрактивні (SM, Subtractive manufacturing) процеси, які виконуються на одній гібридній виробничій платформі, в склад якої входять багатівісний обробний центр і модуль AM, який реалізує одну з адитивних технологій. Переходи з операцій AM на SM відбуваються швидко, оскільки лазерні головки і різальні інструменти знаходяться в одному інструментальному магазині та подаються автоматично в техно-

логічній послідовності обробки деталі, яка реалізується за допомогою інтегрованого програмного забезпечення.

Гібридизація між AM та SM у даний час у світі стає практично стандартною практикою для виготовлення переважної більшості металевих деталей. На думку менеджера з технологій та бізнесу американської компанії Mitsui Seiki Робба Хадсона «рівень розвитку гібридної концепції настільки високий, що в найближчому майбутньому вона може бути розширена для інтеграції додаткових насадок для лазерного свердління і різання, локальної термічної обробки, конкретних операцій по очищенню поверхні заготовки, а також для сушіння залишків теплоносія» [1].

Швидкі темпи розвитку гібридного адитивного виробництва збільшують відставання України

у розвитку цієї наукомісткої галузі, яка потребує значних інвестицій. Оскільки інвестування будь-якої інноваційної діяльності в країні відбувається за власні кошти підприємств, у 2019 році тільки 13,8% промислових підприємств впроваджували інновації [2]. Крім того, підприємства недостатньо якісно відслідковують тенденції конкурентів з розвинутих країн та невірно оцінюють роль інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності.

Окремі провідні українські підприємства аерокосмічної, автомобільної промисловості, енергетики, такі як КБ «Південне», КБ «Антонов», мають досвід практичного використання АМ-технологій, наприклад, для виробництва деталей з композитних та полімерних матеріалів застосовується промислова американська адитивна система Stratasys F900, а також для виготовлення металевих деталей – німецька система SLM [3-4].

Дослідження у сфері адитивних технологій в Україні, повільно, але ведуться. В Інституті електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН на основі адитивних технологій проведені дослідження у галузі спеціальної металургії, зварювання та матеріалознавства, за результатами яких створено і експериментально підтверджено новітню наукову концепцію управління структурою металів та сплавів при їх кристалізації [5], а також розроблено устаткування для пошарового виготовлення металевих виробів методом електронно-променевого 3D-друку із застосуванням порошкових металевих матеріалів вітчизняного виробництва. Це обладнання орієнтоване на впровадження на підприємствах турбінобудування та авіакосмічної промисловості України [6].

Не можна не відмітити внесок української компанії ПРАТ«НВО «Червона хвиля» у розвиток адитивних технологій, яка винайшла ексклюзивну технологію адитивного виробництва електронним променем xBeam, в якій використовується унікальний порожнистий конічний електронний пучок у якості нагріву і коаксіальної подачі дроту в зону осадження. Ця технологія відрізняється від багатьох існуючих адитивних технологій на основі металевих дроту точністю, високою продуктивністю, простотою експлуатації та високим рівнем ефективності, завдяки чому компанія отримала замовлення на електронно-променеву систему xBeam-18/I від TWI – науково-дослідної та технологічної організації на базі Британського інституту зварювання [7].

В енергетичній галузі розглядаються перспективи для вітчизняної енергетики з точки

зору застосувань адитивних технологій [8], проводиться метрологічний аналіз можливостей національних еталонів України для забезпечення простежуваності вимірювань у сфері адитивного виробництва [9].

На промислових підприємствах України великий відсоток застарілого обладнання, яке в решті решт буде замінюватися. Правильний вибір сучасного обладнання пов'язаний з ретельним аналізом можливостей того чи іншого типу гібридних адитивних машин для конкретного типу виробів. Оскільки досвід України у використанні адитивних технологій дуже обмежений (особливо це стосується гібридних адитивних процесів), є потреба в їх аналізі для впровадження на підприємствах нашої країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В статті [10] аналізується доцільність перепрофілювання багатозадачних верстатів з ЧПК для лазерного адитивного виробництва шляхом розробки компактних головок для направлено осадження металу та методів їх інтеграції, які б не вимагали модифікації конструктивних частин верстату з ЧПК, а також відзначається метод осадження спрямованої енергії DED, як такий, що ілюструє на порядок більшу продуктивність у порівнянні з методом плавлення у порошковому шарі PBF (Powder bed fusion).

Огляд гібридних адитивних систем і процесів та переваги гібридного адитивного виробництва, а також практичні приклади застосування гібридних процесів надаються у [11]. У огляді компаній, що зосереджені на виробництві гібридного обладнання, описується остання версія системи AMBIT-AMBIT Series 7. Основою нової системи серії 7, крім серії лазерних головок, є універсальна док-станція у комплекті із вбудованим термічним та оптичним моніторингом процесів та контролем для гарантованої якості під час осадження, в якій використовується змінна вихрострумова головка, оптимізована для виявлення поверхневих і підповерхневих тріщин і порожнеч на кілька шарів у глибину за допомогою діапазону зондів, що працюють при частоті до 5МГц [12].

У документі «Глобальний звіт ринку гібридних адитивних машин для виробництва 2021 року» компанії Cognitive Market Research вказується, що регіонально цей ринок зосереджений у Північній Америці (США, Канада та Мексика), Європі (Великобританія, Німеччина, Франція, Італія, Іспанія та деякі інші); у Азіатсько-Тихоокеанському регіоні (Китай, Індія, Японія, Південна Корея, Австралія, Південно-Східна Азія); Пів-

денній Америці (Бразилія, Аргентина, Колумбія); Близькому сході та Африці (Саудівська Аравія, Південна Африка, Туреччина, Нігерія, ОАЕ). У звіті наведено компанії, що лідирують на цьому ринку [13].

Процеси розробки гібридних адитивних машин та інтеграція технологій адитивного виробництва з чистовою обробкою на оброблюваних центрах з ЧПК, а також технічні характеристики сучасних машин представлені у статтях та на сайтах виробників [14-18].

Постановка завдання. Зважаючи на швидкі темпи розвитку у світі гібридного адитивного виробництва та актуальність його впровадження на підприємствах України, є потреба в окресленні переваг гібридизації, проведенні порівняльного аналізу технічних характеристик гібридних адитивних машин провідних світових компаній та технологій, які в них використовуються. Отримані результати досліджень можуть бути корисними для правильного вибору підприємствами сучасного обладнання для конкретного типу виробів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Гібридні верстати почали серійно випускати з 2013 року, після заснування британської компанії Hybrid Manufacturing Technologies, яка розробила систему AMBIT, що включає в себе серію лазерних коаксіальних головок для прямого осадження металевого порошку за методом DED (Direct Energy Deposition) та док-систему. Система дозволяє практично на будь-якій машині з ЧПК виконувати адитивні операції разом з фрезерними, токарними, шліфувальними та іншими в одній установці. Кожна головка повністю сумісна із стандартним пристроєм зміни інструменту та будь-яким стандартним шпинделем верстату. Першою комерційною машиною, яка застосувала систему AMBIT, була машина HSTM 1000 HYBRID німецької фірми Hamuel Maschinenbau, що призначалася для відновлення пошкоджених лопатей авіаційних двигунів.

Перевагами гібридизації, у порівнянні з пост-обробкою, є:

- забезпечення більш жорстких допусків завдяки тому, що адитивний процес і механічна обробка відбуваються в одній і тій самій системі координат;

- можливість переходів між операціями AM та SM в залежності від технології виготовлення деталі без її переустановлення;

- можливість підвищення продуктивності AM за рахунок збільшення товщини кожного нанесеного шару і, відповідно, зменшення точ-

ності розмірів, яка врешті рещт забезпечується вже SM процесами;

- можливість виготовлення різних частин деталі з різних матеріалів, що утруднено навіть в адитивному процесі; скорочення матеріальних витрат за рахунок виконання невідповідальної частини деталі з дешевшого матеріалу, або нанесення на деталі зі звичайного сплаву високоякісного покриття з метою підвищення її довговічності;

- забезпечення ремонту (відновлення) деталей на одній платформі шляхом видалення пошкоджених ділянок, сканування деталей з метою порівняння з їх цифровими моделями і подальшим осадженням металевого порошку та чистовою обробкою;

- виконання на одній машині обох процесів замість придбання двох окремих систем.

Світовими лідерами у верстатобудівній промисловості з гібридними пропозиціями є: DMG Mori – німецько-японська компанія; Matsuura, Mazak, Sodick – японські компанії; ELB-Schliff – німецька компанія; Mitsui Seiki, Optomec, Fabrisonic – американські компанії; Okuma – американський підрозділ японської компанії.

Основними адитивними методами, які використовуються у гібридному адитивному обладнанні, є пряме осадження енергії (DED) та плавлення у порошковому шарі (PBF). За методом DED найрозповсюдженішою є технологія DMD (Direct Metal Deposition – пряме осадження металу) та аналогічні їй – технології LENS (laser Engineered Net Shaping), LMD (laser Metal Deposition). Найважливіше призначення цих технологій – ремонт дорогих деталей, таких, наприклад, як лопаті турбін.

За більшістю технологій DED друк здійснюється коаксіальною лазерною головкою з сфокусованим лазерним променем, що утворює басейн розплаву на цільовій ділянці деталі, в яку подається металевий порошок, захищений шаром інертного газу для захисту металу від кисню (рис. 1).

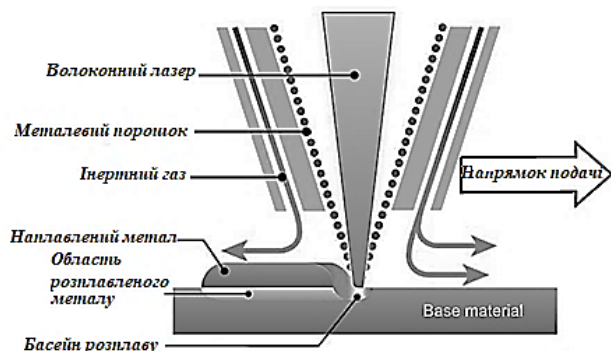


Рис. 1. Принцип функціонування коаксіальної лазерної головки для нанесення металу [10]

Друкуюча головка рухається по 3 або 5 осях, крім того, сама деталь знаходиться на поворотній платформі, що дає можливість металу осідати точно, під різними кутами для отримання складної геометрії за допомогою програмного забезпечення DMDCAM, яке генерує шляхи осадження порошку. Високошвидкісні датчики системи зворотного зв'язку збирають інформацію про пул розплаву, що безпосередньо надходить у спеціальний контролер, який регулює вхідні дані процесу, такі як потужність лазера для підтримки розмірів деталей.

Основною технологією за методом PBF є SLM (Selective laser melting – селективне лазерне плавлення), за якою відбувається розплавлення металевого порошку в попередньо сформованому шарі. У гібридному виробництві вона так широко не застосовується, оскільки, як вже було сказано, її продуктивність на порядок менша за технології DED. Але першою у світі гібридною адитивною машиною, випущеною у 2002 році, була машина Matsuura LUMEX Avance-25, компанії Matsuura, яка застосувала саме SLM. Найновішою з серії машин компанії є система LUMEX Avance-60 (рис. 2). Максимальний розмір виробу – $3160\text{ мм} \times 660\text{ мм} \times 500\text{ мм}$; максимальна робоча вага – 1300 кг.

Ця гібридна технологія особливо вигідна для виготовлення прес-форм та штампів, оскільки виробничі витрати на їх виготовлення знижуються удвічі порівняно зі звичайними методами.

Компанією DMG Mori випускається серія машин для гібридного адитивного виробництва на основі технології лазерного осадження металу (LMD). Лазерна головка є власною розробкою

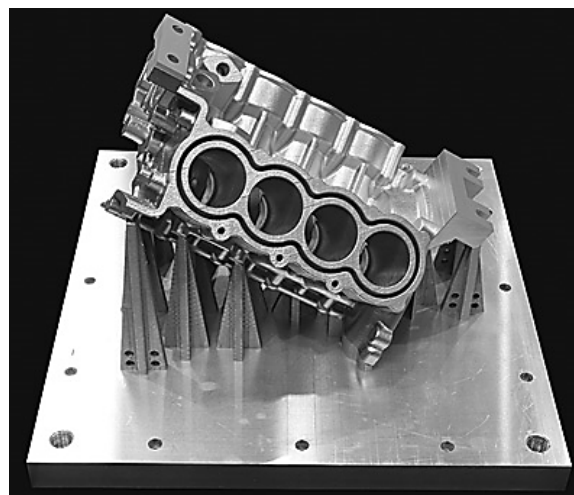
компанії. У машинах застосовується програмне забезпечення Siemens NX: Complete Hybrid CAD/CAM – модуль для адитивного та субтрактивного програмування, а також CELOS DMG Mori – система контролю процесу нарощування лазером та автоматичного регулювання потужності лазера в режимі реального часу. Машини DMG Mori призначені для виготовлення широкої номенклатури виробів, навіть дуже великих розмірів, та ремонтних робіт. Наприклад, на машині LASERTEC 6600 DED Hybrid, представленої на рис. 3, виготовляються деталі ракетних двигунів, труби для нафтових свердловин для енергетичної промисловості, вали для транспортних літаків та ін. Деякі характеристики гібридних машин компанії DMG Mori наведені у табл. 1.

Компанією Mazak розроблено декілька гібридних машин. Першою у 2014 році була розроблена машина INTEGRIX i-400AM на базі багатозадачного 5-осевого токарно-фрезерного центру INTEGRIX (рис. 4) з двома типами лазерних головок LMD: високоточної головки (Fine LMD), призначеної для більш тонкої подачі порошку (товщина шару 0,5-1,0мм), та високошвидкісної головки (High Speed LMD) зі швидкістю осадження 1кг/год (товщина шару 1,0-3,0 мм). При виборі технології LMD її суттєвою перевагою була відзначена можливість комбінування різноманітних металів та сплавів, а не створення 3D-об'єктів.

Ілюстрація гібридного процесу на машині INTEGRIX i-400AM представлена на рис. 5. Заготовкою є труба, виготовлена з нержавіючої сталі 316S31, на якій розміщуються елементи з металевого порошку (сплав на основі нікелю Inconel 718),



а)



б)

Рис. 2. Машина LUMEX Avance-60 компанії Matsuura та зразок виробу [14]
а) машина LUMEX Avance-60; б) блок циліндрів двигуна (розміри $316\text{ мм} \times 660\text{ мм} \times 500\text{ мм}$; матеріал – алюміній AlSi10Mg; час циклу – 95 годин (спікання 90год, фрезерування 5 год.))



Рис. 3. Машина LASERTEC 6600 DED Hybrid компанії DMG Mori



Рис. 4. Машина INTEGREX i-400AM [16]

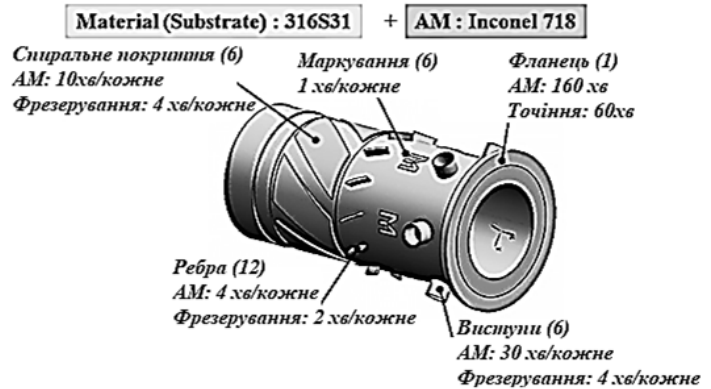


Рис. 5. Ілюстрація гібридного процесу та загального часу його циклу [16]

Таблиця 1

Характеристики машин DMG Mori [15]

Модель машини, рік випуску	Розміри по осях X;Y;Z, мм	Максимальна маса заготовки, кг	Найбільший розмір заготовки, мм	Тип верстата з ЧПУ
LASERTEC 65 DED Hybrid (2014р.)	750×650×560	600	Ø600	5-осевий вертикально-фрезерний центр
LASERTEC 125 DED Hybrid (2019р.)	1335×1250×900	2000	1251×1250×745	5-осевий вертикально-фрезерний центр
LASERTEC 4300 DED Hybrid (2020р.)	660×660×1500	1700	660×660×1500	5-осевий токарно-фрезерний центр
LASERTEC 6600 DED Hybrid (2021р.)	1400×330×3890	7000	Ø1010×3702	5-осевий токарно-фрезерний центр

стійкого до корозії, окислення, повзучості та високих температур.

Розробники процесу провели випробування зразків на механічну міцність та визначили мікро-

структуру перехідної ділянки між матеріалом підкладки (сплав 316S31) та осадженим матеріалом (Inconel 718). Результати свідчать про те, що міцність ділянки, отриманої осадженням сплаву

Inconel 718, майже еквівалентна гарячекатаному сплаву Inconel 718. Розрив зразка відбувається на стороні сплаву 316S31, а по мікроструктурі Inconel718 матеріал нанесений щільно, і ніяких дефектів не спостерігається.

На базі 5-осевого токарно-фрезерного центру INTEGREX були випущені ще такі машини: INTEGREX i-200S AM (2016р.); INTEGREX i-300S AM (2017р.); INTEGREX i-400S AM (всі – з двома токарними шпинделями), а також машини на базі вертикально-фрезерного центру: VC-500 AM (2016р.), яка була уперше оснащена системою головок AMBIT компанії Hybrid Manufacturing Technologies, VC-500A/5X AM HWD та VARIAXIS j-600AM.

В VC-500A/5X AM HWD застосована інноваційна адитивна технологія наплавлення гарячим дротом (HWD, Hot Wire Deposition), розроблена Mazak у співпраці з компанією Lincoln Electric. На відміну від звичайного зварювання, головка HWD використовує як дугову горілку, так і лазер для точного розплавлення металевго дроту безпосе-

редньо на матеріалі основи та/або деталі зі швидкістю від 1,36 до 1,8 кг/год (деякі характеристики машин – див. табл. 2).

У машині VARIAXIS j-600AM застосовується стандартна дугова головка Wire-Arc AM (WAAM – адитивне виробництво методом дугового зварювання) для зварювання дротом. Завдяки використанню у якості матеріалу металевго дроту продуктивність процесу значно вище, ніж при використанні порошку.

З 2014 року німецька компанія ELB-Schliff почала випускати шліфувальні гібридні адитивні машини MillGrind. На машині, представленої на рис. 6, крім шліфування, виконуються свердління, фрезерування та лазерне осадження порошку з використанням системи AMBIT. В машині застосовуються шліфувальні круги із звичайних абразивних матеріалів. Шліфування забезпечує точність обробки (роздільна здатність по осях XYZ – 0,1мкм), і є особливо ефективним для важко оброблюваних сплавів, таких, як суперсплави на основі нікелю.

Таблиця 2

Характеристики деяких машин компанії Mazak [17]

Модель машини	Розміри по осях X;Y;Z,W, мм	Найбільший розмір заготовки, мм	Тип верстата з ЧПУ
INTEGREX i-400 AM	525×206×1077×726	Ø500×1011	5-осевий токарно-фрезерний центр
INTEGREX i-400S AM	615×730(X2)×260×1585×1423(Z2)×1574	Ø658×1519	
VC-500 AM	505×505×510	Ø600×306	5-осевий вертикально-фрезерний центр
VC-500A/5X AM HWD	555×505×510	Ø600×306	
VARIAXIS j-600AM	860×560×610	Ø730×460	



Рис. 6. Шліфувальна гібридна машина з серії MillGrind [18]

Таблиця 3
Технічні характеристики машини
MillGrind [18]

Ширина шліфування – 700 мм	Відстань від центру шпинделя до стола – 900 мм
Довжина шліфування – 1000 мм	Максимальні розміри шліфувального круга – 300×65 мм
Робочі розміри заготовки: 400×400×350мм [L×W×H]	

Висновки. Зазначено, що в останні роки гібридне адитивне виробництво стрімко розвивається. В процесі проведених досліджень відзначено його переваги у порівнянні з адитивним виробництвом, що передбачає подальшу пост-обробку. Проведена порівняльна характеристика основних адитивних технологій,

використовуваних у сучасних гібридних адитивних машинах і визначено, що технології за методом DED мають ширше застосування у порівнянні з технологіями PBF за рахунок на порядок більшої їх продуктивності. Найважливіше призначення технологій за методом DED – це ремонт дорогих деталей, таких, наприклад, як лопаті турбін. Розглянуто технічні характеристики гібридних адитивних машин та надано рекомендації щодо їх вибору в залежності від типу оброблюваних деталей. Практична значущість отриманих результатів полягає в тому, що вони можуть допомогти підприємствам переосмислити роль інновацій та технологій у своїй конкурентоспроможності, оцінити їх переваги і ретельніше підходити до придбання гібридного адитивного обладнання, щоб робити правильний вибір.

Список літератури:

1. Tyrrell M. Mitsui Seiki launches hybrid 3D additive and machining centre. URL: <https://www.aero-mag.com/mitsui-seiki-hybrid-3d-additive-vertical-machining-centre-2d-cnc/> (дата звернення 11.08.2016).
2. Писаренко Т.В., Кваша Т.К., Рожкова Л.В., Коваленко О.В. Інноваційна діяльність в Україні у 2019 році: науково-аналітична доповідь. К.: УкрІНТЕІ, 2020. – 45 с.
3. Українське держпідприємство друкуватиме деталі для ракет на 3D-принтері. URL: <https://www.epravda.com.ua/news/2019/05/13/647722/> (дата звернення 13.05.2019).
4. ДП «Антонов» використовує адитивні технології для зниження витрат та поліпшення характеристик (відео) URL: <https://uprom.info/news/avia/dp-antonov-vykorystovuye-adytyvni-tehnologiyi-dlya-znyzhennya-vytrat-ta-polipshennya-harakterystyk-video/> (дата звернення 19.08.2019).
5. Шаповалов В.О. Наукові основи дугових адитивних технологій у спецелектрометалургії та електрозварюванні. *Вісник НАН України*. 2018. № 7. С.33-39.
6. Науковці Академії розробили нове обладнання для виробництва комплектуючих до турбін та авіадвигунів. URL: <https://www.nas.gov.ua/UA/Messages/Pages/View.aspx?MessageID=8027&fbclid=IwAR118vkhOLB79VhQ-j5aeJvdBIsZMjGuqZU-3IVYECzTcGtJ5BBMgONaYcG> (дата звернення 16.07.2021).
7. Twi orders new electron beam system from Chervona hvilya. URL: <https://www.twi-global.com/media-and-events/press-releases/2019/twi-orders-new-electron-beam-system-from-chervona-hvilya> (дата звернення 21.05.2019).
8. Рубах М. Зворотній інжиніринг і адитивне виробництво. Світовий тренд імпортозаміщення та локалізації для забезпечення сталого розвитку. *Баланс Енергетики України*. 2018. №1(01). С. 24-26.
9. Неежмаков П.И., Скляр В.В., Прокопов А.В. Анализ возможностей национальных эталонов Украины для обеспечения прослеживаемости измерений в сфере аддитивного производства. *Український метрологічний журнал*. 2018. №1. С. 22-29.
10. Jones B. J. Repurposing mainstream CNC machine tools for laser-based additive manufacturing: SPIE Conference proceedings, Vol. 9738. *Laser 3D Manufacturing III* (San Francisco, 13-18 february 2016). San Francisco, 2016. <https://doi.org/10.1117/12.2217901>.
11. Wit Grzesik. Hybrid additive and subtractive manufacturing processes and systems: A review. *Journal of Machine Engineering*. 2018. Vol.18, 4. С.5-24. DOI:10.5604/01.3001.0012.7629.
12. Davide Sher. 10 top hybrid manufacturing companies. URL: <https://www.3dprintingmedia.network/the-top-ten-hybrid-manufacturing-companies/> (дата звернення 1.03.2019).
13. Global Hybrid Additive Manufacturing Machines Sales Market Report 2021. URL: <https://www.24marketreports.com/manufacturing-and-construction/global-hybrid-additive-manufacturing-machines-2021-660> (дата звернення 28.05.2021).
14. LUMEX Avance-60. URL: <https://www.lumex-matsuura.com/english/lumex-avance-60>
15. DMG Mori LASERTEC 6600 3D. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/dmg-mori-lasertec-6600-3d/>
16. Taku Yamazaki. Development of a Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining: Procedia CIRP 42:81-86. 18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM XVIII). DOI:10.1016/j.procir.2016.02.193.
17. Mazak. URL: <https://www.mazakusa.com/machines/>
18. ELB-Schliff millGrind overview. URL: <https://www.aniwaa.com/product/3d-printers/elb-schliff-millgrind/>

Habovda O.V. ANALYSIS OF THE CURRENT STATE OF HYBRID ADDITIVE PRODUCTION AND PROSPECTS OF ITS IMPLEMENTATION IN UKRAINE

The article discusses the advantages of hybrid additive manufacturing, reviews modern hybrid additive machines of the world's leading companies, provides a comparative analysis of their technical characteristics and additive technologies on the basis of which they are built, gives recommendations for products that are more appropriate to manufacture on these machines. The relevance of the article is due to the continuous development of hybrid additive systems, which combine additive and subtractive processes at one production platform which usually includes a multi-axis machining center and laser coaxial heads, for direct deposition of metal powder or wire, depending on the additive technology used.

The system enables almost any CNC machine to perform additive operations in sync with milling, turning, grinding and others in one installation, when cutting tools and laser heads are located in one tool set and supplied from it in accordance with the sequence of the technological process of processing parts, thanks to machines' equipping with integrated programming systems. The experience of Ukrainian enterprises, which have a lot of outdated equipment, in operations with additive technologies is quite limited, especially when it comes to the implementation of hybrid additive processes. The article describes the achievements of Ukrainian companies that develop new original additive technologies and equipment. In a state of war, the situation at production in Ukraine is deteriorating.

But in the future, a radical transformation of Ukrainian production is inevitable. The aim of study is a comparative analysis into technical characteristics and technologies of the latest hybrid additive machines which might be a basis for a more efficient approach of enterprise to the implementation of a hybrid additive manufacturing, double-checking the role of innovations and technologies in their competitiveness.

Key words: *hybridization, additive technologies, subtractive processes, hybrid additive machines, innovations, competitiveness.*

Рудасьов В.Б.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Якубовський О.М.

ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки»

Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Головіна О.В.

Філія Класичного приватного університету у місті Кременчук

ЗУСИЛЛЯ ПРИТИСКУ ПРИ ШТАМПУВАННІ ТОНКОЛИСТОВОГО ПРОКАТУ ІЗ СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ

У статті розглянуто технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготовки та інструменту, спрямовані на підвищення штампування сталей підвищеної міцності, які використовуються для виготовлення кузовних деталей для автомобілів. У роботі запропоновано аналізувати напружено-деформований стан заготовки при зміні зусилля притиску під час процесу листового штампування. Дослідження проводилися із заготовками з маловуглецевих сталей (08Ю, 08кп) та низьколегованих сталей типу 08ГСЮТ(Ф). Для кожної заготовки було визначено граничні значення коефіцієнта граничної деформації. Результати експерименту були оброблені за допомогою вторинного методу математико-статистичного аналізу, в ході якого визначено здатність сталі підвищеної міцності до штампування, що характеризується коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску. Для цього при обробці результатів вимірювань були встановлені залежності між коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску, між коефіцієнтом граничної деформації та тиском притиску для різних сталей. На підставі отриманих залежностей проаналізовано вплив тиску притиску на гофроутворення та величину коефіцієнта граничної деформації та встановлена область можливого штампування, тобто область значень тиску притиску, де процес штампування заготовок різних сталей проходить без гофроутворення та руйнування. Практичним висновком отриманої залежності між коефіцієнтом граничної деформації і тиску притиску є рекомендація про вибір при штампуванні мінімального значення тиску притиску. Залежність між коефіцієнтом граничної деформації та зусиллям притиску дозволила встановити граничні значення зусилля притиску заготовки у процесі листового штампування для трьох областей: області якісних виробів, області гофроутворення, області руйнування. Запропонований метод аналізу напружено-деформованого стану матеріалу під час процесу штампування листової сталі при різних значеннях зусилля притиску дозволяє досягти необхідного рівня штампування листових сталей підвищеної міцності.

Ключові слова: листові сталі підвищеної міцності, автомобілебудування, напружено-деформований стан, зусилля притиску при штампуванні.

Постановка проблеми. Розвиток автомобілебудування неможливий без подальшого вдосконалення технологічних процесів металообробки та методів, що визначають можливість отримання кузовних деталей з набором необхідних властивостей.

У роботі [1] встановлено, що використання сталей підвищеної міцності (СПП) дозволить вирішувати проблеми, пов'язані з безпекою, екологічністю та матеріаломісткістю у автовиробників. Авторами зазначено, що СПП, мають дещо меншу здатність до штампування в порівнянні з маловуглецевими сталями вищих категорій витяжки. На сьогодніш-

ньому етапі розвитку виробництва кузовних деталей автомобілів штампуванням поєднувати високу пластичність сталі з підвищенням міцності навряд чи можливо. Тому, подальші дослідження було запропоновано направити на розробку технологічних заходів, які дадуть можливість підвищити штампування цих сталей.

Здатність матеріалу деформуватися без руйнування при формозмінних операціях листового штампування залежить від багатьох факторів: технологічності конструкції виробу; механічних та технологічних властивостей матеріалу; показників технологічного процесу (точності, стабіль-

ності, продуктивності, економічності); сили тертя у процесі витяжки, зусилля притиску, температури інструменту та металу, форми інструменту; конструкції штампкової оснастки. Така багатofакторність пропонує багато шляхів підвищення здатності сталей до штампування. В першу чергу це технологічні заходи, не пов'язані зі зміною форми заготівлі та інструменту, що безпосередньо впливають на напругу в металі.

Підвищення штампування сталей підвищеної міцності є комплексною проблемою, що охоплює металургійне і листопрокатне виробництво, роботу пресових цехів автомобільних заводів і конструкторських бюро.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Під час виконання листового штампування оцінка штампування пов'язана з труднощами встановлення локальних деформацій, що призводять до порушення процесу формозміни в цілому. Важливе значення при цьому набувають як експериментальні так і теоретичні методи дослідження.

Теоретичні методи дослідження впливу зусилля притиску при операціях штампування-витягу розглядалися багаторазово [2-8].

У конкретних умовах штампування для визначення можливостей формозмін заготівлі використовують технологічні випробування, які дозволяють проводити експериментальні дослідження здатності матеріалу до штампування. Під час проведення формозмінювальних операцій не допускається нерівномірне збільшення розмірів у різних напрямках (фестонів), утворення надривів та тріщин, розкриття дефектів металургійного походження (пор, раковин тощо). При випробуванні важливою умовою є мінімізація пружного пружиніння.

Однак у сучасній літературі недостатньо представлено досліджень впливу притиску при штампуванні-витягу тонколистового прокату підвищеної міцності.

Так, наприклад, у джерелі [9] розглядалося питання удосконалення способу листового штампування, а саме операції витягу, при здійсненні якої можна плавно, в процесі витягування регулювати зусилля притиску фланця плоскої заготовки в залежності від поточного значення ходу повзуна. При цьому була запропонована конструкція механічного преса для штампування, в якому з'єднання притискного повзуна з повзуном, що та витягує здійснюється за допомогою гідравлічних циліндрів. У цьому випадку необхідно перебудувати вже існуюче штампове обладнання в пресових цехах автомобільних заводів, що є економічно недоцільним.

Аналіз показує, що проблема підвищення штампування сталей підвищеної міцності при

виготовленні кузовних деталей автомобілів досі залишається актуальною.

Постановка завдання. Розробка комплексу заходів з метою підвищення здатності сталей підвищеної міцності до штампування за рахунок зміни зусилля притиску в процесі листового штампування з подальшим аналізом напружено-деформованого стану заготівлі.

Виклад основного матеріалу дослідження. Під час витягу деталі з листової заготівлі змінюються геометричні розміри і напружено-деформований стан фланця [10,11], що призводить до зміни величини тиску притиску q , МПа, яке можна визначити за формулою

$$q = Q_{\text{пр}} / F, \quad (1)$$

де $Q_{\text{пр}}$ – зусилля притиску, Н;
 F – площа кільця між притиском і матрицею в цей період часу, мм².

Розрахункове зусилля притиску заготівлі до поверхні матриці доки ще не може бути проконтрольоване у виробничих умовах (принаймні, в пресових виробництвах Кременчуцького і Запорізького автозаводів) через відсутність контрольних приладів на витяжних пресах. Тому оптимальне зусилля притиску встановлюється безпосередньо перед витягом експериментально по відсутності складок або розривів металу. Зусилля притиску, що забезпечує стійкість фланця, зазвичай у виробничих умовах є дещо завищеним. Зменшення (збільшення) його до величини, визначуваної з умови стійкого фланця, понизить напругу в небезпечному перерізі і розширить можливості процесу витягу.

Визначити граничну деформацію, яка характеризує здатність до штампування листових сталей при штампуванні-витягу, можна, встановивши взаємозв'язок між граничною напругою, що викликає руйнування металу, з одного боку, і формою інструменту, властивостями металу і умовами тертя, з іншою. На практиці для цього застосовуються різні методи модельного штампування виробів простої форми [10, 13].

У теорії листового штампування [12, 15], при визначенні загальної напруги втягування заготівлі в матрицю, визначувана формулою

$$\sigma_{\text{заг}} = \sigma_{\rho} + \sigma_{\text{изг}} + \sigma_{\text{тр.ф}} + \sigma_{\text{тр.м}}, \quad (2)$$

де σ_{ρ} – нормальна розтягуюча напруга, діюча в радіальному напрямі фланця, затиснутого між притиском і матрицею, МПа;
 $\sigma_{\text{виг}}$ – напруга вигину на матриці на вході і виході, МПа;
 $\sigma_{\text{тр.ф}}$ – напруга тертя у фланці, МПа;
 $\sigma_{\text{тр.м}}$ – напруга тертя на закругленні матриці, МПа,

одним з доданків цієї напруги є напруга, викликана тертям між заготівлею, притиском і матрицею на плоскій його частині (рис. 1), тобто $\sigma_{тр,ф}$.

Величина $\sigma_{тр,ф}$ в загальній напрузі складає приблизно 15% [3], що говорить про важливість обліку його при операціях штампування-витягу і припускає ретельну наладку штампового устаткування, в плані тиску притиску.

Найдемо напругу, викликану тертям у фланці під дією зусилля притиску. Розглянемо переріз 1-1 (рис. 1).

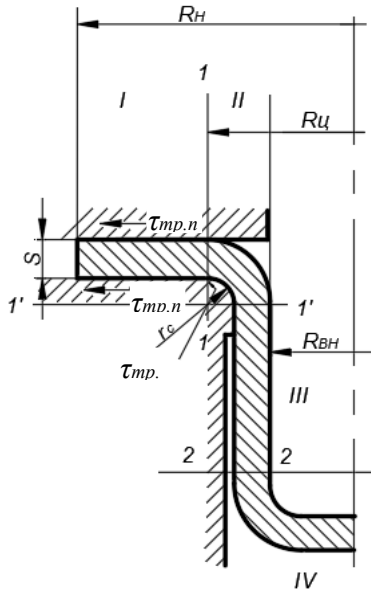


Рис. 1. Схема розподілу зон деформації і напруги у стакані при витягу:

- I – зона пластичної деформації;
- II – зона пластичного вигину; III – зона пружної деформації; IV – зона руйнування

З визначення напруги можна записати

$$\sigma_{тр,ф} = P_{тр} / F_{1-1}, \quad (3)$$

де $P_{тр}$ – сила тертя, Н;
 F_{1-1} – площа заготівлі в перерізі 1-1, мм².

$$F_{1-1} = 2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S, \quad (4)$$

де $R_{ц}$ – відстань (радіус) від центру стакана до перерізу 1-1, мм;
 r_c – радіус матриці, мм;
 S – товщина заготівлі, мм.

У свою чергу, повна сила тертя, діюча на поверхні фланця, може бути визначена за формулою:

$$P_{тр} = \tau_{тр} \cdot F_k, \quad (5)$$

де $\tau_{тр}$ – дотична напруга тертя на контактній поверхні, МПа;

$$F_k = \pi \cdot R_n^2 - \pi \cdot R_{ц}^2 = \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2). \quad (6)$$

Слід звернути увагу на те, що контактні умови тертя у фланці і на згині матриці (див. рис. 1) істотно

різні за величиною тиску, що зумовлює їх опис різними функціями. Як було встановлено [14], при тисках 40-50 МПа, а між притиском і матрицею при штампуванні-витягу встановлюється тиск в цих межах, досить точно виконується закон Амонтона

$$\tau_{тр} = f_{тр} \cdot q, \quad (7)$$

де $f_{тр}$ – коефіцієнт тертя;
 q – тиск притиску, МПа.

Підставивши формули (6) і (7) у формулу (5) отримаємо повну силу тертя, діючу на поверхні фланця

$$P_{тр} = f_{тр} \cdot q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2). \quad (8)$$

Підставляючи формули (8), (4) у формулу (3) і враховуючи, що заготівля затиснута з двох сторін, отримаємо

$$\sigma_{тр,ф} = \frac{f_{тр} \cdot q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2)}{2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S} \cdot 2. \quad (9)$$

У вираженні (9) $q \cdot \pi \cdot (R_n^2 - R_{ц}^2)$ є постійним зусиллям притиску – $Q_{пр}$ і формула (9) набере вигляду

$$\sigma_{тр,ф} = \frac{f_{тр} \cdot Q_{пр}}{2 \cdot \pi \cdot (R_{ц} + r_c) \cdot S}. \quad (10)$$

З отриманої формули (10) витікає, що на граничну деформацію при глибокому витягу впливають і умови тертя, враховані коефіцієнтом тертя $f_{тр}$, викликане силою притиску $Q_{пр}$ між заготівлею, притиском і площиною матриці.

Вище представлені міркування були потрібні для розгляду питання і проведення досліджень впливу зусилля притиску на штампування сталей підвищеної міцності.

Визначення значень усіх доданків, що входять в рівняння (2), не входило в завдання цієї статті.

Проведені дослідження властивостей тонколистової низьколегованої сталі типу 08ГСЮТ (Ф) з метою підвищення її здатності до штампування.

Досліджувалися вплив тиску притиску q на гофроутворювання і величину коефіцієнта граничної деформації $K_{г,д}$ [16], $K_{г,д} = f(q)$, а отже і зусилля притиску $Q_{пр}$, для мало вуглецевих сталей 08Ю, 08кп та низьколегованих типу 08ГСЮТ (Ф).

Декілька слів про коефіцієнт граничної деформації $K_{г,д}$.

Для оцінки штампування пропонується застосовувати відношення D_3 / D_{ϕ}

$$K_{г,д} = D_3 / D_{\phi}, \quad (11)$$

де D_3 – діаметр заготівлі, мм;

D_{ϕ} – середній діаметр фланця,

що утворився в результаті неповного витягу (до розриву) циліндричного стакана.

Випробування для визначення $K_{гд}$ проводяться на тому ж устаткуванні, що і для визначення K по Свифту [11, 13], наприклад на машині фірми «Эриксен» або на витяжній машині іншої конструкції із спеціальним оснащенням що є пресом подвійної дії. Для визначення $K_{гд}$ заготовлі повині бути одного максимального діаметру, що забезпечить руйнування в усіх випадках за наявності фланця (рекомендується $D_3 / d_n \geq 2,3$, де d_n – діаметр пуансона, мм). В результаті вийде порваний стакан з фланцем (рис. 2, 3), вимірявши який отримаємо середній діаметр фланця, D_ϕ , рівний

$$D_\phi = 1/4 \cdot (L_1 + L_2 + L_3 + L_4). \quad (12)$$

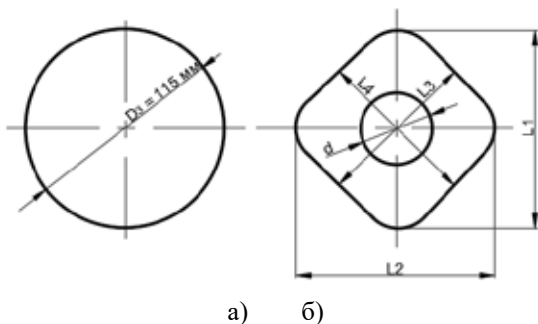


Рис. 2. Заготовля (а) для випробування на машині фірми «Эриксен» 140-12Мр і стакан, що вийшов після випробування, з фланцем (б)



Рис. 3. Зразок після випробування

Знаючи D_3 і D_ϕ , можна за формулою (11) знайти коефіцієнт граничної деформації $K_{гд}$.

Технологічні випробування даних сталей на здатність до штампування проводилися в умовах ЦЗЛ заводу Запоріжсталь на випробувальній машині 140-12Мр. Здійснювався витяг досліджуваних сталей товщиною 0,7 мм в циліндричний стакан пуансоном діаметром 50 мм з плоским дном. Властивості досліджуваних сталей представлена в таблиці 1, де σ_T – межа текучості, МПа; σ_y – тимчасовий опір (межа міцності), МПа; σ_4 – відносне подовження %; R – коефіцієнт нормальної пластичної анізотропії; n – показник зміцнення.

На рисунку 4 штрихуванням показані області можливого штампування. При зменшенні тиску притиску, ліворуч від неї (області можливого

штампування), витяг можливий, але з істотним гофруванням. Вправо від вказаної області подальше збільшення притиску призводить до відсутності ковзання фланця відносно поверхні притиску і обриву донної частини. Отже граничні значення $K_{гд}$, визначені при q_{min} , будуть для сталі 08Ю – 1,086, для сталі 08кп – 1,050, для сталі 08ГСЮТ – 1,056 (рис. 4, табл. 1). Зірочкою на рис. 4 позначені оптимальні значення $K_{гд}$.

Таблиця 1

Властивості тонколистових сталей, використовуваних в експерименті впливу тиску притиску q на коефіцієнт $K_{гд}$

Сталь	σ_T , МПа	σ_y , МПа	σ_4 , %	R	n	$K_{гд}$
08Ю	190	295	37,0	1,54	0,210	1,086
08кп	215	280	29,5	1,12	0,160	1,050
08ГСЮТ	308	430	32,0	1,21	1,176	1,056

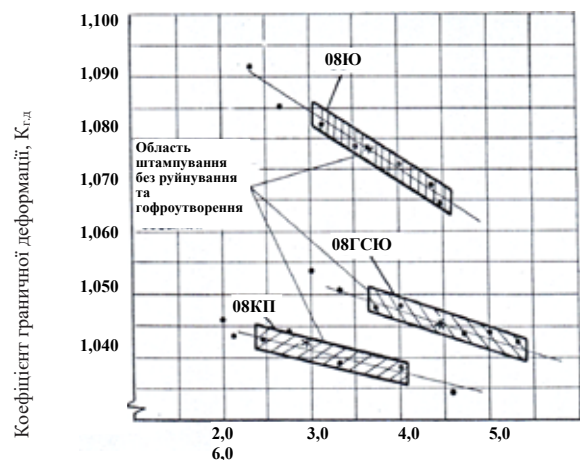


Рис. 4. Залежність коефіцієнта граничної деформації $K_{гд}$ від тиску притиску q для різних сталей

Якщо узяти відношення мінімального тиску притиску на початку процесу до межі текучості відповідної сталі (q_{min} / σ_T) (рис. 4), то отримаємо точки: для сталі 08Ю – 0,016, для сталі 08кп – 0,011, для сталі 08ГСЮТ – 0,012. Таким чином, хоча мінімальне значення тиску в притиску для сталі 08ГСЮТ і є найбільшим, рівним 3,6 МПа, тобто майже рівне q_{min} для сталі 08Ю (приблизно 3,0 МПа), його відносне значення істотно нижче, ніж для сталі 08Ю і лише ненабагато перевищує таке значення для сталі 08кп.

Як впливає з порівняння мінімального відносного тиску у притиску з механічними властивостями металу (q_{min} / σ_T) ця величина щонайближче корелює з показником нормальної пластичної анізотропії і межею текучості. Практичним висновком з отриманих результатів є рекомендація про вибір

при штампуванні мінімального значення тиску притиску. При цьому, слід звернути увагу на те, що його відносне значення (по відношенню до межі текучості сталі) для низьколегованої сталі підвищеної міцності істотно нижче, ніж для сталі 08Ю. Практика штампування тонколистового прокату із сталей підвищеної міцності з товщиною, зменшеною на 10...15% в порівнянні із сталями типу 08, показує, що іноді абсолютне значення тиску притиску при цьому для низьколегованих сталей навіть дещо нижче, ніж для мало вуглецевих сталей більшої товщини.

Формула, рекомендована В. П. Романовським [10] для розрахунку тиску притиску

$$q = 2 \cdot (D / d - 1,2) \cdot [D / (S \cdot 100)] \quad (13)$$

де D – граничний діаметр заготівлі, мм;
 d – діаметр циліндра, що утворився при витягу, (діаметр пуансона) мм;
 S – товщина заготівлі, мм,

показує для сталі 08Ю дещо завищене, на 20...25% значення мінімально допустимого тиску притиску q в порівнянні з виробничим досвідом. Такий надлишок виправданий при епізодичному налаштуванні пресів і, вказану формулу, можна рекомендувати для застосування при штампуванні сталі 08Ю.

Явище гофроутворення у фланці при штампуванні порівняно явищу втрати подовжньої стійкості високого зразка при стискуванні. При цьому прикладення додаткових сил в площині протилежної до площини листа, перешкоджатиме втраті стійкості. Також, очевидно, на втрату стійкості впливатиме анізотропія властивостей в подовжньому і поперечному напрямках самого зразка. У даному випадку гофроутворення у фланці роль сил, що перешкоджають втраті подовжньої стійкості, виконує тиск притиску. Тому доцільне визначення величини цього зусилля зв'язати з анізотропією властивостей матеріалу, оцінюваної показником анізотропії R . Крім того, абсолютне значення тиску притиску, перешкоджає гофроутворенню, залежить ще і від межі текучості сталі σ_T , оскільки втрата подовжньої стійкості при штампуванні має місце не при пружному, а при пластичному формоутворенні.

З урахуванням отриманих нами експериментальних результатів формула (13) може бути видозмінена в цілях її використання і для інших сталей і набере наступного вигляду

$$q = 2 \cdot (\sigma_T / 190)^{0,9} \cdot (D / d - 1,2) \cdot [D / (S \cdot 100)] \cdot R / 1,54 \quad (14)$$

де σ_T – межа текучості випробовуваної сталі, МПа;
 R – коефіцієнт пластичної анізотропії.

У формулі (14) додатково врахована необхідна зміна тиску притиску q за рахунок зміни межі текучості σ_T і показника анізотропії R .

При підстановці значень σ_T і R для сталі 08Ю з експерименту (табл. 1) формула (14) тотожна якій запропонована Романовським В. П. [10]. На рисунку 1 зірочкою вказані розрахункові значення тиску притиску для сталей 08Ю, 08кп і 08ГСЮТ. Якщо по формулі (14) визначити тиск притиску для сталі 08Ю більшої товщини, яка імовірно застосовувалася до сталі 08ГСЮТ (сталь 08Ю – $S = 0,8$ мм; сталь 08ГСЮТ – $S = 0,7$ мм), то отримаємо значення $q = 3,6$ МПа. Це менше, ніж рекомендоване значення тиску притиску по формулі (14) для сталі 08ГСЮТ меншої товщини ($S = 0,7$ мм), рівне 4,4 МПа. Надлишок тиску притиску для сталі 08ГСЮТ складає більше 18%.

Таким чином, при штампуванні сталі 08ГСЮТ меншої товщини на 10...15% в порівнянні із сталлю 08Ю відповідно до розрахунку тиску притиску необхідно дещо збільшувати. Слід зазначити, що вживані в практиці налаштування пресів при штампуванні тиск притиску істотно перевищені проти необхідних для запобігання гофроутворення.

Був проведений статистичний аналіз результатів експерименту $K_{пл} = f(Q_{пр})$. Нижче представлена обробка результатів вимірів залежності штампування, яка характеризуватиметься коефіцієнтом граничної деформації – $K_{пл}$, і зусиллям притиску – $Q_{пр}$ сталі підвищеної міцності типу 08ГСЮТ, товщиною 0,7...1,2 мм.

При обробці результатів вимірів користувалися наступним порядком операцій:

1. Результати кожного виміру записували в таблицю.

2. Обчислювали середнє значення з n вимірів

$$a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n a_i \quad (14)$$

3. Знаходили погрішності окремих вимірів

$$\Delta a_i = \bar{a} - a_i \quad (15)$$

4. Обчислювали квадрати погрішностей окремих вимірів $(\Delta a_i)^2$.

5. Якщо одне або декілька вимірів різко відрізнялися один від одного за своїм значенням від інших вимірів, то перевіряли, чи не є воно промахом.

6. Визначали середню квадратичну погрішність результату серії вимірів

$$\Delta S_{\bar{a}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (a_i)^2}{n(n-1)}} \quad (16)$$

7. Задавалися значенням надійності α .

8. Визначався коефіцієнт Стьюдента $t_{\alpha} \cdot (n)$ для заданої надійності α і числа зроблених вимірів n .

9. Знаходили межі довірчого інтервалу (погрішність результату вимірів)

$$\Delta a = t_{\alpha} \cdot (n) \cdot \Delta S_a. \quad (17)$$

10. Застосували метод найменших квадратів, отримували два рівняння регресії в результаті мінімізації суми квадратів відхилень уздовж однієї осі координат, потім уздовж іншої.

11. Для виміру тісноти зв'язку між шуканими величинами використали коефіцієнт кореляції r , що характеризує, як близько лежать експериментальні точки до лінії регресії.

Проводили обробку вимірів коефіцієнта граничної деформації $K_{г.д}$ для значень надійності $\alpha = 0,95$ і $\alpha = 0,99$. Двадцять значень $K_{г.д}$ приведені в таблиці 2.

Знаходили середнє значення $K_{г.д}$ і межі довірчого інтервалу з цих вимірів. Вибирали довільне число $K_{г.д}^0$, зручне для розрахунків – $K_{г.д}^0 = 1,05$

$$K'_{г.д} = K_{г.д.0} + \sum (K_{г.д.i} - K_{г.д.0}) = 1,0553,$$

$$K'_{г.д} - K_{г.д.0} = 0,0053.$$

$K'_{г.д} = 1,0553$ – середнє значення з виміряних величин.

Середній квадрат погрішності серії з 20 вимірів або, те ж саме, середнє квадратичне відхилення середнього значення з виміряних величин буде рівне

$$\Delta S^2 K'_{г.д} = \left[\sum_{i=1}^n (K_{г.д.i} - K_{г.д.0}) - n(K'_{г.д} - K_{г.д.0})^2 \right] \frac{1}{n(n-1)} = 3,6 \cdot 10^{-6},$$

$$\Delta S^2 K'_{г.д} = 1,897 \cdot 10^{-5}.$$

Для надійності $\alpha = 0,95$ і $n = 20$ з таблиці VII [17] знаходили значення коефіцієнта Стьюдента ($t_{\alpha} = 2,09$) і обчислювали абсолютну погрішність результату вимірів

$$\Delta K_{г.д} = t_{\alpha} \cdot \Delta S K'_{г.д} = 3,965 \cdot 10^{-5}.$$

Результат можна представити у виді

$$(1,0553 - 3,965 \cdot 10^{-5}) \leq K_{г.д} \leq (1,0553 + 3,965 \cdot 10^{-5})$$

або

$$1,05526 \leq K_{г.д} \leq 1,05534.$$

Для надійності $\alpha = 0,99$, $t_{\alpha} = 2,85$

$$\Delta K_{г.д} = 2,85 \cdot 0,1897 \cdot 10^{-4} = 0,54 \cdot 10^{-4}.$$

$$1,0552 \leq K_{г.д} \leq 1,0554.$$

Для надійності $\alpha = 0,99$, $t_{\alpha} = 2,85$

$$\Delta K_{г.д} = 2,85 \cdot 0,1897 \cdot 10^{-4} = 0,54 \cdot 10^{-4}.$$

$$1,0552 \leq K_{г.д} \leq 1,0554.$$

Функціональну залежність між двома величинами – $K_{г.д}$ і $Q_{пр}$ визначали для сталі 08ГСЮТ товщиною 0,7...1,2 мм.

В результаті експерименту отримали ряд значень $K_{г.д}$, що відповідають значенням іншої вели-

Підставляли значення a_0 і a_1 у формулу (18) і отримали

$$K_{г.д} - 1,053 = -9,7 \cdot 10^{-5} + 2,13 \cdot 10^{-3} (Q_{пр} - 14,00).$$

$$K_{г.д} = 1,0827 - 0,00213 \cdot Q_{пр}. \quad (19)$$

Рівняння регресії (19) отримане в результаті мінімізації суми квадратних відхилень уздовж осі $K_{г.д}$.

Аналогічно отримували рівняння регресії в результаті мінімізації суми квадратів відхилень уздовж осі $Q_{пр}$. Вирішували рівняння

$$a_0 N + a_1 \Sigma(K_{г.д} - 1,053) = \Sigma(Q_{пр} - 14,00)$$

$$a_0 \Sigma(K_{г.д} - 1,053) + a'_1 \Sigma(K_{г.д} - 1,053)^2 =$$

$$= \Sigma(K_{г.д} - 1,053) (Q_{пр} - 14,00)$$

знаходили

$$a'_0 = -0,0665 \cdot 10^{-5}; \quad a'_1 = 518,44.$$

Рівняння регресії прикмет вид

$$Q_{пр} = 559,85 - 518,44 \cdot K_{г.д}. \quad (20)$$

Знаходили коефіцієнт парної кореляції, r , за формулою

$$r = \frac{n \sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i} \cdot Q_{пр.i} - \sum_{i=1}^{20} K_{г.д} \cdot \sum_{i=1}^{20} Q_{пр}}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^{20} Q_{пр.i}^2 - (\sum_{i=1}^{20} Q_{пр.i})^2] \cdot [n \sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i}^2 - (\sum_{i=1}^{20} K_{г.д.i})^2]}}$$

Для цього склали таблицю 3.

Таблиця 3

Експериментальні значення зусилля притиску і коефіцієнта граничної деформації

$Q_{пр}, \text{кН}$	$K_{г.д}$
5,00	1,072
6,50	1,071
8,00	1,068
9,00	1,064
9,50	1,061
10,00	1,058
11,00	1,059
12,00	1,057
12,50	1,056
13,00	1,055
13,50	1,054
14,00	1,053
15,00	1,050
15,50	1,049
16,00	1,048
16,50	1,047
17,00	1,047
17,50	1,046
18,00	1,045
18,50	1,045

чини $Q_{пр}$ (табл. 3). Знаходили функцію $K_{г.д} = f(Q_{пр})$, значення якої при $K_{г.д} = K_{г.д.1} = K_{г.д.2} \dots = K_{г.д.n}$ можливо менше відрізнялися від емпіричних значень $Q_{пр.1}, Q_{пр.2}, \dots, Q_{пр.n}$.

Таблиця 4

Дані для вирішення рівняння (18)

Обробка	вмір	коefficient	деформації	граничної	$(Q_{пр} - 14,00)^2$	$(Q_{пр} - 14,00) \times \times$ $(K_{г.д} - 1,053)$	$(K_{г.д} - 1,053)^2$
	5,00	-9,0	0,019		81,00	-0,171	0,000361
	6,50	-7,5	0,018		56,25	-0,1350	0,000324
1,072	8,00	-6,0	0,015	$(K_{г.д} - K_{г.д.0})^2$	36,00	-0,0900	0,000225
1,071	9,00	-5,0	0,011		25,00	-0,0550	0,000121
1,068	9,50	-4,5	0,008		20,25	-0,0360	0,000064
1,064	10,00	-4,0	0,005		16,00	-0,0200	0,000025
1,061	11,00	-3,0	0,006		9,00	-0,0180	0,000036
1,058	12,00	-2,0	0,004		4,00	-0,0080	0,000016
1,059	12,50	-1,5	0,003		2,25	-0,0045	0,000009
1,057	13,00	-1,0	0,002		1,00	-0,0020	0,000004
1,056	13,50	-0,5	0,001		0,25	-0,0005	0,000001
1,055	14,00	0	0		0	0	0
1,054	15,00	1,0	0,003		1,00	-0,0030	0,000009
1,053	15,50	1,5	0,004		2,25	-0,0060	0,000016
1,050	16,00	2,0	0		4,00	-0,0100	0,000025
1,049	16,50	2,5	0,006		6,25	-0,0150	0,000036
1,048	17,00	3,0	0,006		9,00	-0,0180	0,000036
1,047	17,50	3,5	0,007		12,25	-0,0245	0,000049
1,047	18,00	4,0	0,008		16,00	-0,0320	0,000064
1,046	18,50	4,5	0,008		20,25	-0,0360	0,000064
1,045	При $n = 20$	$\Sigma = -22$	$\Sigma = 0,045$		$\Sigma = 322,00$	$\Sigma = -0,685$	$\Sigma = 0,001485$
1,045		$\Sigma = -22$	$\Sigma = 0,045$				
$\Sigma K_{г.д} = 21,105$	$\Sigma (K_{г.д} - K_{г.д.0}) = 0,105$		$\Sigma (K_{г.д} - K_{г.д.0})^2 = 19,36 \cdot 10^{-4}$				

Криву залежності $K_{г.д} = f(Q_{пр})$, що проходить поблизу експериментальних точок ($K_{г.д} - Q_{пр}$)

Значення зусилля притиску і коефіцієнта граничної деформації для визначення коефіцієнта парної кореляції

$Q_{пр}$	$K_{гд}$	$Q_{пр,i}^2$	$Q_{пр,i} \cdot K_{гд,i}$	$K_{гд,i}^2$
5,00	1,072	25,00	5,3600	1,1492
6,50	1,071	42,25	6,9615	1,1470
8,00	1,068	64,00	8,5440	1,1406
9,00	1,064	81,00	9,5760	1,1321
9,50	1,061	90,25	10,0795	1,1257
10,00	1,058	100,00	10,5800	1,1194
11,00	1,059	121,00	11,6490	1,1215
12,00	1,057	144,00	12,6840	1,1172
12,50	1,056	156,00	13,2000	1,1151
13,00	1,055	169,00	13,7150	1,1130
13,50	1,054	182,25	14,2290	1,1109
14,00	1,053	196,00	14,7420	1,1088
15,00	1,050	225,00	15,7500	1,1025
15,50	1,049	240,25	16,2595	1,1004
16,00	1,048	256,00	16,7680	1,0983
16,50	1,047	272,25	17,2755	1,0962
17,00	1,047	289,00	17,7990	1,0962
17,50	1,046	306,25	18,3050	1,0941
18,00	1,045	324,00	18,8100	1,0920
18,50	1,045	342,24	19,3325	1,0920
$\Sigma 258$	$\Sigma 21,105$	$\Sigma 3625,25$	$\Sigma 271,6195$	$\Sigma 22,2722$

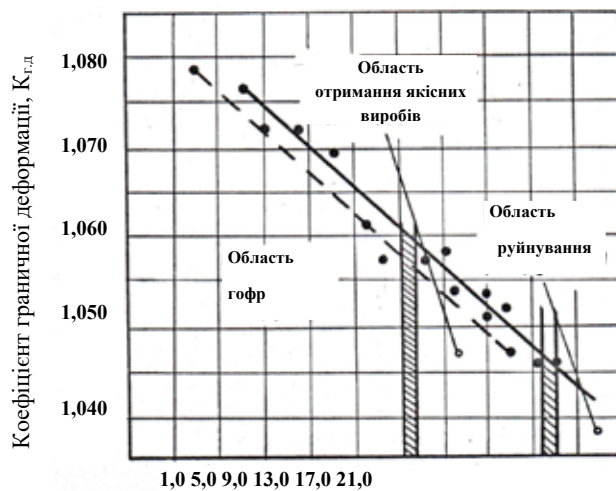


Рис. 5. Кореляційна залежність між коефіцієнтом граничної деформації ($K_{гд}$) і зусиллям притиску ($Q_{пр}$)

Підставляючи данні таблиці 5 у вище приведену формулу, отримали коефіцієнт парної кореляції $r = -0,97$.

Отримане значення коефіцієнта парної кореляції $r = -0,97$ говорить про лінійну функціональну залежність між величинами $K_{гд}$ і $Q_{пр}$ (рис. 5).

Його негативне значення показує, що зв'язок між змінними негативний, тобто з ростом значень $Q_{пр}$ величина $K_{гд}$ зменшується.

Висновки. На підставі дослідження заготовок з маловуглецевих 08Ю, 08кп та низьколегованих типу 08ГСЮТ(Ф) сталей було встановлено:

- вплив тиску притиску q та зусилля притиску $Q_{пр}$ на гофроутворення та величину коефіцієнта граничної деформації $K_{гд}$;
- лінійна функціональна залежність між величинами коефіцієнтом граничної деформації $K_{гд}$ та зусиллям притиску $Q_{пр}$;
- напруга тертя у фланці під час операції штампування-витяжки склала приблизно 15% у загальній напрузі $\sigma_{заг}$;
- тиск притиску необхідно дещо збільшувати при штампуванні сталі 08ГСЮТ меншої товщини на 10 ... 15% в порівнянні зі сталлю 08Ю.

Запропонований метод аналізу напружено-деформованого стану матеріалу при різних значеннях зусилля притиску під час процесу штампування листової сталі дозволяє досягти необхідного рівня штампування листових сталей підвищеної міцності.

Список літератури:

1. Рудасьов В.Б., Якубовський О.М., Головіна О.В. Сучасні тенденції застосування сталей підвищеної міцності в автомобілебудуванні. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: технічні науки*, 2022. Том 33 (72) № 1. С. 12–18.
2. Зубцов М.Е. Листовая штамповка. Ленинград, 1980. 432 с.
3. Катаков М.П. Расчёт усилия прижима, предотвращающего складкообразование при вытяжке круглых изделий. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1973. № 12. С. 24-26.
4. Аргат Р.Г., Пузырь Р. Г., Долгих О.Н. Увеличение степени деформации при вытяжке цилиндрических деталей без прижима фланца. *Ресурсозбереження та енергоефективність процесів і обладнання обробки тиском у машинобудуванні та металургії: матеріали ІХ міжнар. наук.-техн. конф. (м. Харків, 22–24 листопада 2017 р.)*. НТУ «ХП», 2017. С. 17.
5. Аргат Р. Г., Пузырь Р. Г., Долгих О. Н. Оценка приемов, увеличивающих степень деформации при вытяжке цилиндрических деталей без складкодержателя. *Вісник НТУ «ХП». Збірник наукових праць. Серія «Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії»*. 2017. № 36 (1258). С. 5–9.
6. Феофанова А.Е. Экспериментальные исследования предельного формоизменения при листовой штамповке. *Заготовительные производства в машиностроении*, 2004. № 6. С. 19-22.
7. Аверкиев А.Ю. Предельное формоизменение при штамповке листового металла. *Кузнечно-штамповочное производство*, 1995. № 10. С. 17-20.
8. В. Д. Обдул, В. В. Широкобоков, А. Ю. Матюхін. Диференційоване притискування фланцю заготовки під час витягування. *Вісник НТУ «ХП». Серія: Інноваційні технології та обладнання обробки матеріалів у машинобудуванні та металургії*, 2018, № 41(1317). С. 36-38.
9. Романовский В.П. Справочник по холодной штамповке. Ленинград, 1979. 520 с.
10. Ковка и штамповка. Листовая штамповка: в 4 т. / под ред. А.Д. Матвеева. Москва. 1985-1987. Т.4. 544 с.
11. Попов Е.А. Основы теории листовой штамповки. Москва, 1977. 280 с.
12. Аверкиев А.Ю. Методы оценки штампуемости листового металла. М Москва, 1985. 76 с.
13. Белосевич В.К. Анализ условий трения и напряжений трения при листовой штамповке-вытяжки со смазкой. Трение и износ / В.К. Белосевич, В.Б. Рудасёв, Л.А. Апостолов. 1989. Т. 10. № 5. С. 879-885.
14. Громов Н.П. Теория обработки металлов давлением. Москва, 1978. 360 с.
15. В.Б. Рудасёв, В.К. Белосевич, Л.А. Апостолов, И.А. Бухбиндер Новый способ определения штампуемости листовых материалов. *Известия вузов. Серия: Чёрная металлургия*, 1983, № 9. С. 76-79.
16. Касандрова О.Н., Лебедев В.В. Обработка результатов наблюдений. Москва, 1970. 104 с.

Rudasov V.B., Yakubovskiy O.M., Holovina O.V. THE HOLDDOWN PRESSURE IN THE PROCESS OF SHEET-METAL STAMPING OF HIGH-STRENGTH STEELS

This paper considers technological measures not related to changes in the shape of the workpiece and the tool, aimed at improving the compressibility of high-strength steels used for the manufacture of body parts for cars. The paper proposes to analyze the stress and strain state of the workpiece when changing the holddown pressure during the process of sheet-metal stamping. The studies were carried out with workpieces made of low-carbon steels (08Ю, 08кп) (08Yu, 08kp) and low-alloy steels of 08ГСЮТ(Ф) (08GSYuT(F) type. The boundary values of the coefficient of limiting deformation have been determined for each workpiece.

The results of the experiment were processed using a secondary method of mathematical-statistical analysis (correlation analysis), in which the compressibility of high-strength steel, characterized by the coefficient of limiting deformation and holddown pressure, was determined. For this purpose, the relationships between the coefficient of limiting deformation and the holddown pressure, between the coefficient of limiting deformation and the down pressure were determined for different steels when processing the measurement results.

On the basis of the received dependences, the influence of the down pressure on the buffing and the value of the coefficient of limiting deformation were analyzed, and the area of possible stamping was established, that is, the area of values of the down pressure, where the stamping process of workpieces of various steels will take place without buffing and destruction.

A practical conclusion from the obtained dependence between the coefficient of limiting deformation and the down pressure is the recommendation to select the minimum value of the down pressure when stamping. The dependence between the coefficient of limiting deformation and the holddown pressure made it possible to establish the boundary values of the holddown pressure of the workpiece in the process of sheet-metal stamping for three areas: the area of quality products, the area of buffing, and the area of destruction.

Key words: High Strength Steels, automobile industry, the stress and strain state, stamping processing, the holddown pressure.

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 519.7, 629.051, 621.398, 681.5, 681.3
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/03>

Гуриненко С.О.

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

КОНЦЕПТ УНІВЕРСАЛЬНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ІНФОРМАЦІЇ ЯК ЕЛЕМЕНТА ЦИФРОВОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ

Досягнення науки та техніки в галузі цифрового та інтелектуального керування поступово впроваджуються в усі галузі промисловості. Для забезпечення інтелектуального керування в таких галузях, як авіація, аеронавтика та космонавтика, вихідні сигнали від різних систем та датчиків повинні бути представлені у вигляді цифрових кодових послідовностей. Однак, у більшості випадків вихідна інформація в цифровій послідовності від різних систем та датчиків, які використовуються в авіації та космонавтиці, не завжди можлива, а заміна відповідних систем та датчиків на аналогічні, з можливістю видачі вихідного сигналу у цифровій послідовності, є, у більшості випадків, трудомістким та складним завданням, яке не завжди є раціональним та економічно обґрунтованим. У зв'язку із цим виникає необхідність розробки та створення спеціального пристрою, здатного перетворювати вихідну аналогову інформацію, яка отримана від значної кількості систем та датчиків, що використовуються на об'єкті керування, у цифрову кодову послідовність. Проектування та реалізація такого пристрою дає можливість для реалізації цифрового, адаптивного та інтелектуального керування.

У роботі пропонується концепція універсального перетворювача інформації, призначеного для впровадження в цифрову систему керування. Універсальний інформаційний перетворювач дозволяє конвертувати аналогові значення, отримані від датчиків, які встановлені на борту об'єкта. Універсальний інформаційний перетворювач реалізує концепцію моноблока з багатоканальними входами, які дозволяють вимірювати та перетворювати різні типи величин.

Запропонований пристрій може відстежувати вхідні значення та перетворювати їх із заданим бажаним допуском.

У запропонованій статті продемонстровано основні властивості універсального інформаційного перетворювача, зображено структурну блок-схему інформаційного перетворювача та представлено підхід до перетворення сигналу отриманого від селесина.

Ключові слова: Універсальний перетворювач інформації (UIT), аналого-цифрове перетворення (АЦП (ADC)), система керування, цифрова система керування.

Постановка проблеми. Цифрове автоматичне керування поступово витісняє аналогове автоматичне керування у всіх галузях промисловості. Для забезпечення цифрового керування системі можуть знадобитися датчики з цифровим вихідним сигналом. Однак, значна кількість систем керування, які використовуються на даний момент, мають датчики з аналоговим вихідним сигналом. Крім того, заміна датчиків з аналогової вихідної інформації на цифрову вихідну інформацію може спричинити труднощі для подальшої модернізації та ускладнити розробку системи керування, також поширеною проблемою, яка виникає протягом терміну служби, є застарілість датчиків та їх відсутність або відсутність запас-

тин через припинення виробництва цих датчиків. Для зниження трудомісткості та зниження витрат на модернізацію аналогової системи керування до цифрової системи керування пропонується використовувати універсальний перетворювач інформації (УІІ, англ. Universal Information Transducer (UIT)) [1].

Існуючі рішення для програми перетворення інформації засновані на використанні міні-перетворювачів та їх інтеграції в конструкцію датчика. Такий підхід зумовлює трудомісткість процесу технічного обслуговування та сервісних робіт. Більше того, у випадку, якщо подібний перетворювач буде потребувати певного налаштування, такий підхід призведе до труднощів зняття із датчика.

Пропонований перетворювач виготовляється як моноблок і має переваги перед існуючими перетворювачами. Існують спеціальні пристрої – Data Concentrator Unit (DCU), розроблені та представлені компанією North Atlantic Industries рисунок 1 [2].

Ці блоки подібні до пропонованої концепції, однак недолік цих блоків – необхідність попередньої модульної конфігурації блоків та знання входів і виходів, які використовуються на об'єкті. Запропонований описаний підхід дозволить проектувати та створювати гнучкі, адаптовані, допускаючи можливість зміни конфігурації та модульно-розширювані пристрої. Пристрій забезпечує підключення датчиків з аналоговим виходом і видає необхідну перетворену інформацію в цифровому коді. Перетворювач також має функцію програмування коефіцієнтів масштабування для виведення цифрової інформації в обчислювальний блок цифрової системи керування. Функція програмування масштабних коефіцієнтів також може використовуватися для лінеаризації аналогової вхідної інформації та подальшої видачі перетвореної інформації на обчислювальні пристрої системи керування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Значна кількість робіт описують перетворення лише окремих значень величин без подальшого практичного застосування.

Наведений нижче аналіз досліджень та розробок показує різноманітні підходи до розробки та проектування перетворювачів інформації.

У роботі [3] демонструється спеціальний пристрій, призначений для калібрування датчиків тиску. У дослідженні описуються розробки деталей універсального калібрувального пристрою датчика тиску, розробленого шляхом модифікації традиційного тривісного апарату. Автори [3] описують модифікації конструкції датчика, а також зображують схему процедури калібрування. Результати дослідження, які наведені у данній

роботі можуть бути корисними і використовуватися для реалізації при розробці процедури калібрування та обробки значень, отриманих із датчиків тиску. Однак, у дослідженні не зазначено, який датчик та який тип вихідної інформації (аналоговий чи цифровий) розглядається.

Дослідження [4] є фундаментальним дослідженням для розробки та проектування даного типу перетворювача. Запропоновані методи та підходи можуть бути повністю реалізовані в нашому дослідженні, особливо для вихідних інтерфейсів таких елементів, як платинові резистори, термістори, резистивні мости та потенціометри, дані яких зчитуються та оброблюються мікроконтролером. Однак дослідження [4] не описує принципів зчитування та перетворення даних, отриманих від селсін датчика чи обертового трансформатора. Крім того, у цьому дослідженні не розглядається процедура калібрування та масштабування вихідних даних.

Дослідження, які описані у роботі [5] розглядають високочастотний перетворювач для відеосигналів, який можна використовувати у радіотелескопах. У статті [5] надано опис розробки апаратного забезпечення, що базується на використанні ПЛІС (FPGA). Результати використання та впровадження FPGA, які описані у дослідженні (Гренков С.А. та ін. 2009), можуть бути корисні щодо оцінки переваг використання ПЛІС при виборі та проектуванні процесорного вузла, у якому виконуються математичні операції, у розроблюваному пристрої універсального перетворювача інформації. Однак, автори описали та навели приклад використання лише одного конкретного типу FPGA без порівняння з іншими типами FPGA.

Робота [7] – представляє собою опис винаходу універсального аналого-цифрового перетворювача. Цей опис відображає логіку конвертора у вигляді блок-схеми. Перетворювач заснований



Рис. 1. Data Concentrator Unit (DCU) розроблені та представлені North Atlantic Industries

на роботі операційних підсилювачів, які включені та працюють у компараторному режимі з подальшою обробкою вихідного сигналу за допомогою мікросхем логіки, в результаті чого вихідний сигнал перетворюється на цифровий. Однак, недоліком пристрою, описаного у [7] полягає в тому, що підходи, які реалізовані для перетворення інформації, можуть бути застосовані лише для перетворення сигналів змінної та постійної напруги.

Постановка завдання. Більшість систем керування, особливо системи керування динамічними об'єктами, застосовують датчики з аналоговим вихідним сигналом. Завдяки тому, що ці датчики надійні та ефективні, їх використання продовжується і в наш час. Але, при проектуванні таких систем керування, як Fly-by-wire [8, 9] або створення функціоналу, такого як «Скляна кабіна» [10], необхідно враховувати особливості використовуваних датчиків і вбудовувати додаткове обладнання, яке може перетворювати аналоговий сигнал в цифровий, у конструкції датчиків або повністю змінювати датчики на аналогічні, які мають цифровий вихідний сигнал. Таке положення речей спонукає розробників систем керування шукати нові підходи до проектування та розробки систем керування [1, 11, 12]. У зв'язку з цим пропонується дослідити та розробити спеціальний монолітний блок – універсальний перетворювач інформації, здатний приймати аналогові сигнали, налаштувати вихідні характеристики до потрібних та використовувати отримані вихідні дані у розроблених рівняннях та законах керування.

Концептуально пристрій може складатися з каналів введення живлення для забезпечення живлення пристрою, каналів для прийому загально відомих входних величин, таких як опір, напруга тощо, а також каналів для прийому спеціальних сигналів, таких як сигнали від обертових трансформаторів та сигналів від селсін датчиків,

та каналів виходу кодованих ліній, через які передаються перетворені дані використовуючи відомі протоколи обміну інформацією (наприклад, Arinc 429, RS 232, RS 485 та ін.) [1].

Здійснення конвертації у цифрове значення відомих аналогових величин, таких як:

- Опір;
- Напруга постійного струму;
- Напруга змінного струму;
- Постійний і змінний струм;
- Частота;
- Ємність;

добре відомі та детально описані у дослідженні [13-17].

Дослідження включатиме спосіб перетворення синхронного сигналу, отриманий від синхрогенератора/селсін-генератора:

1) Створення прототипу вхідного інтерфейсу селсін -датчиків та подальша передача їх значень у цифровому коді.

Спосіб реалізації та застосування перетворення сигналу із селсина представлений у дослідженні [18].

Розробка універсального перетворювача інформації

У дослідженні розроблена та представлена концепція універсального перетворювача інформації. Концепція конструкції пристрою перетворювача базується на структурній схемі, показаній на рисунку 2 [1].

Згідно зі схемою, яка зображена на рис. 2, перетворювач працює наступним чином:

1) Аналогові сигнали надходять на електронний ключ (мультиплексор – MUX). Використання електронного ключа зменшує загальну кількість провідників;

2) Центральним процесором (ЦП) керує мультиплексором, що дозволяє опитувати електронний ключ з певною частотою. Із мультиплексора

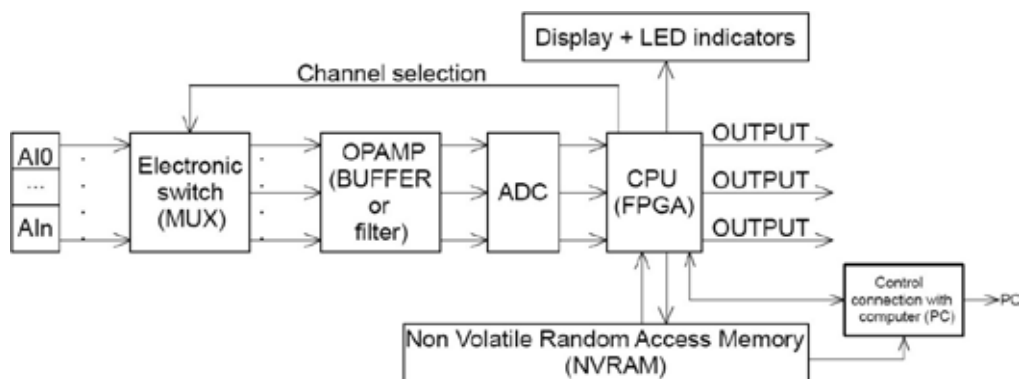


Рис. 2. Структурна схема концепта УПІ

сигнали надходять до операційного підсилювача (ОРАМР), який може або посилювати сигнал, якщо цей сигнал має низький рівень, або підсилювач включений як буфер або включений як фільтр для проведення первинної фільтрації вхідного сигналу; буферна схема дозволяє передавати сигнали з коефіцієнтом підсилення, рівним одиниці, також буферна схема дозволяє нам забезпечити ізоляцію навантаження, відокремивши будь-яке сильнострумове навантаження від вхідного підсилювача та забезпечити ізоляцію навантаження джерела тепла від чутливого прецизійного контуру;

3) З операційного підсилювача сигнали надходять на входи мікросхем аналого-цифрового перетворення (АЦП);

4) Із виходів АЦП оцифровані сигнали надходять на центральний процесор, в якому відбувається обробка отриманої інформації, а також математичне масштабування вихідної інформації. ЦП також виконує керування (проводить опитування) мультиплексором, див. пункт 2;

5) Енергонезалежна пам'ять (NVRAM) забезпечує резервне зберігання вихідної інформації для зчитування та подальшого дистанційного аналізу та обробки у разі виявлення несправності перетворювача або видачі ложної інформації.

6) Світлодіодні індикатори та дисплей мають відображати стан готовності пристрою та коди помилок, які можуть з'явитися в процесі налаштування та експлуатації, для кращого розуміння стану пристрою. Наприклад, світлодіодні індикатори можуть надати нам статус пристрою, використовуючи наступну кольорову схему: синій світлодіод – живлення увімкнено, зелений світлодіод – пристрій готовий і працює правильно, жовтий світлодіод – пристрій працює, але в інформаційних каналах є деякі попередження, червоний світлодіод – помилка (канали активні, але мають певний збій або (та) відсутні прийом/передача). Оскільки світлодіодні індикатори відображають загальний стан пристрою, на дисплеї відображається більш детальна інформація: коди помилок з описом проблеми та стан інформаційних каналів. Також дисплей має (або може мати) сенсорну функцію та керуватися, наприклад, за допомогою стилуса. Така функція дозволяє прокручувати відображуваний список із зазначеною інформацією, із метою щоб дізнатися, скільки, у загальній кількості, помилок має пристрій і скільки каналів працює неправильним чином.

7) Підключення до ПК дозволяє зконфігурувати та налаштувати пристрій у потрібний спосіб, або відповідно до завдання, за допомоги

спеціального програмного забезпечення. Крім того, підключення до ПК дозволяє зчитувати дані з NVRAM для подальшого аналізу цих даних.

Синхро сигнали (синусно-косинусні сигнали), в основному генеруються із виходів обертових трансформаторів, де синусоїдальне вхідне опорне значення модулюється амплітудно, у вихідні сигнали. Для сигналів, наприклад, що передаються від обертових трансформаторів, запропоновано метод перетворення цих сигналів у цифровий код, який наведено у дослідженні [18], де розглядається впровадження цифрового перетворення синхро сигналів для ядерного дослідницького реактора IEA R1. Однак метод, наведений та описаний у дослідженні [18] не розглядає передачу даних через будь-який протокол для обміну інформацією, а також дослідження не розглядає спосіб калібрування та масштабування вихідних даних.

У запропонованій концепції УПІ для перетворення синхро сигналу використовується трифазне перетворення сигналу, яке отримується від синхроногенератора (селсин датчик), який використовується в базових або основних системах керування рухомими об'єктами (літаками, суднами тощо). Сучасні досягнення наукових знань та електронних технологій розробили та створили достатню кількість спеціалізованих інтегральних мікросхем, здатних перетворювати двофазні сигнали (синус і косинус). Проте перетворення трифазного сигналу, що виробляється генератором сельсина за допомогою таких мікросхем, неможливо.

Перетворення у цифровий код синхро сигналу може бути реалізовано у спосіб, який зображено на рисунку 3.

Перетворення трифазного сигналу від сельсин датчика в двофазний сигнал синуса та косинуса здійснюється за допомогою діаграми Скотта [19]. Представлена схема містить номінали опорів R1, R2, R3 і R4, які вибираються за максимальним значенням вихідної напруги. Потім вихідні сигнали синуса і косинуса подаються на спеціалізовану мікросхему АЦП і після перетворення у цифровий код сигнали надходять на процесорний пристрій, на якому сигнали математично обробляються (наприклад, масштабується) і видається у потік даних.

Математичне програмне забезпечення буде побудовано таким чином, що вихідні дані будуть представлятися у вигляді лінійних функцій. Також програмне забезпечення дозволить масштабувати вихідні значення, це означає, що користувач зможе вибрати та встановити необхідні кількість

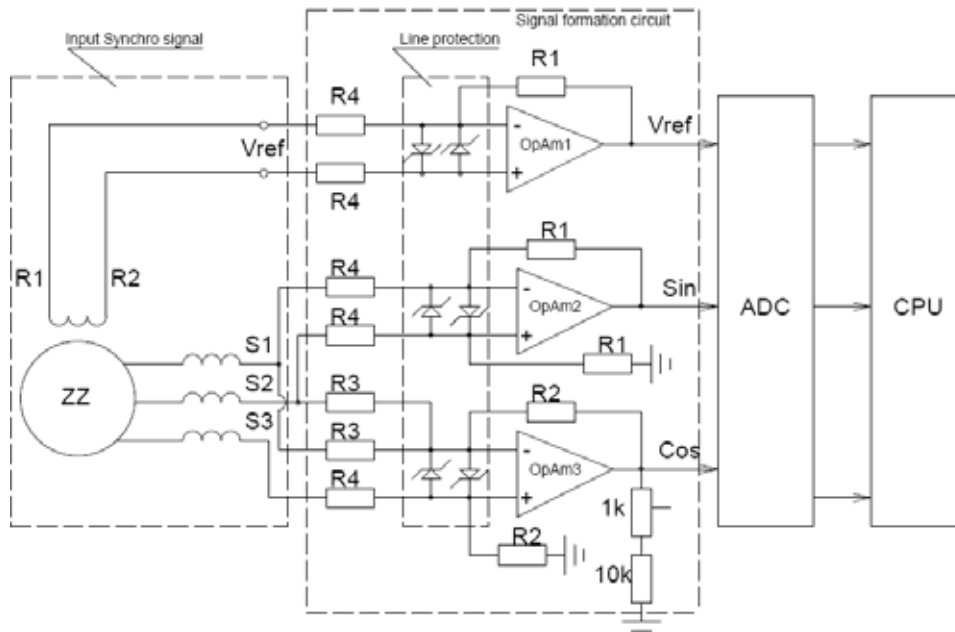


Рис. 3. Схема перетворення у цифровий код синхро сигналу

та значення коефіцієнтів лінійних функцій для отримання потрібної форми вихідного сигналу.

Крім того, програмне забезпечення може дозволити встановити, за яким протоколом обміну інформацією (наприклад, Arinc 429, Arinc 708, RS-232 тощо) перетворена інформація буде передаватися.

Огляд результатів

Основна більшість аналого-цифрових перетворювачів може працювати лише з певною кількістю однотипних вхідних значень. У зв'язку із такою ситуацією виникає питання про перетворення не тільки певних типів вхідних величини, а і одночасного перетворення інших відомих вхідних та найбільш використовуваних величин. Такі питання частково вирішені наукових та комерційних розробках фірми NAI [2].

Дослідники та розробники [2] пропонують продукти «під ключ», це означає, що складові частини пристрою налаштовані та встановлені, у готовий виріб, на виробництві і лише для заздалегідь визначених функцій та вхідних величин, а користувачі можуть налаштувати пристрій лише з програмною платформою у встановлених межах функціонування прилада.

Запропонована концепція універсального перетворювача інформації реалізує функції аналого-цифрового перетворення таких поширених величин, як напруга, струм, опір, зміна ємність тощо. Крім того, перетворювач має функцію перетворення сигналів отриманих від сельсин датчиків. Запропонований перетворювач може приймати

широкий діапазон вхідних значень, перетворення яких здійснюється в одному блоці. Якщо система керування приймає значення від різних датчиків з різним типом вихідного сигналу, то для перетворення не потрібно використовувати безліч допоміжних блоків, достатньо буде використовувати один блок УПІ. Програмне забезпечення дає змогу не тільки передавати перетворені значення, а і проводити математичне калібрування та масштабування отриманої інформації та передавати цю інформацію за встановленим та визначеним протоколом обміну інформацією. Істотною відмінністю даного перетворювача є можливість установки і налаштування видачі інформації не тільки для одного конкретного протоколу, але і для кількох протоколів обміну інформацією. Одна і та ж сама інформація може одночасно передаватися в кілька систем керування, в яких протокол обміну інформацією відрізняється один від одного. Крім того, у порівнянні з аналогічним пристроєм виробництва [2], запропонований перетворювач має світлодіодні та дисплейні індикатори, що розширюють функціональні можливості пристрою. Наявність такої функції полегшує процес налаштування, виявлення та усунення несправностей.

Дане дослідження не розглядає питання точності перетворення. Питання оцінки точності первинного аналого-цифрового перетворення та оцінки точності вихідної інформації після математичних операцій, які виконуються в процесорному блоці будуть розглядатися у подальших дослідженнях. Також, подальші дослідження

будуть спрямовані на більш глибоке вивчення відповідних схем реалізації каналів перетворення та методів і способів проектування вбудованої системи самотестування.

Висновки. Розроблений пристрій являє собою універсальний настроюваний перетворювач, що дозволяє реалізувати цифрове автоматичне керування в механізмах і пристроях, що використовують датчики з аналоговою вихідною інформацією. Пристрій можна використовувати як в галузях промисловості, так і в спеціалізованих галузях, таких як авіація, аерокосмічна і морська галузі. Відмінною особливістю універсального інформаційного перетворювача є наявність енергонезалежної пам'яті, яка дозволяє записувати дані про стан пристрою під час його роботи, записувати вихідні параметри пристрою та зчитувати зібрані дані з інформацією про роботу пристрою для подальшого аналізу працездатності приладу без підключення основного джерела живлення. А також, мож-

ливість, без заміни або встановлення додаткових модульних блоків, підключати та відключати входи та виходи приладу, які раніше не використовувалися, здійснювати програмування та калібрування кожного вимірювального каналу. Також, у дослідницькій роботі показано, що світлодіод і дисплей стали як додаткова, необхідна і зручна функціональність особливості, що дозволяє користувачам забезпечити швидке виявлення помилок і провести термінове обслуговування пристрою, та, при необхідності, провести обслуговування об'єкта. Крім того, програмне забезпечення пристрою дозволяє здійснювати фоновий вбудований тест-контроль (built-in-test – BIT) та надає зворотній зв'язок результатів цього тесту в потоці даних, а також натисканням кнопки на передній панелі пристрою, на дисплеї, у вигляді коду та короткого опису відображається статус та інформація щодо збою чи помилки, що корисно для тестування та швидкого виявлення присутніх дефектів.

Список літератури:

1. Gurynenko S.O. Universal information transducer as part of multi-purpose control system. Proceedings of the 2nd International scientific and practical conference. CPN Publishing Group. Tokyo, Japan. 2021. Pp. 21-27. URL: <https://sci-conf.com.ua/ii-mezhdunarodnaya-nauchno-prakticheskaya-konferentsiya-science-innovations-and-education-problems-and-prospects-15-17-sentyabrya-2021-goda-tokio-yaponiya-arhiv/>.
2. North Atlantic Industries (NAI, 1955). URL: <https://www.naii.com/Model/SIU36-DCUARM-01>
3. Dave T. N., Murty D. S., Rane, H. D. (2011). Universal Calibration Device for Pressure Transducer Calibration. In *Geo-Frontiers 2011: Advances in Geotechnical Engineering* (pp. 2605-2610).
4. Van Der Goes F. M., Meijer G. C. (1997). A universal transducer interface for capacitive and resistive sensor elements. *Analog Integrated Circuits and Signal Processing*, 14(3), 249-260, <https://doi.org/10.1023/A:1008246103915>.
5. Grenkov S. A. and et al. (2009). A digital signal converter for radio astronomical systems. *Instruments and Experimental Techniques*, 52(5), 686-694.
6. Lundberg K. H. (2002). Analog-to-digital converter testing. A High speed, Low power Analog-to-Digital Converter Testing in Fully Depleted Silicon-on-Insulator. *Technology*, 97-109.
7. Shkolin V. P. and et al. (1980) – Universalnii analogo-cifrovoi preobrazovatel (USSR Patent No 752793).
8. Hamel P. G. (Ed.). (2017). *In-Flight Simulators and Fly-by-Wire/Light Demonstrators: A Historical Account of International Aeronautical Research*. Springer.
9. Nicolin I., Nicolin B. A. (2019). The fly-by-wire system. *INCAS Bulletin*, 11(4), 217-222.
10. Socha V., Socha L., Hanakova L., Valenta V., Kusmirek S., Lalis, A. (2020). Pilots' Performance and Workload Assessment: Transition From Analogue to Glass-Cockpit. *Applied Sciences*, 10(15), 5211.
11. С. О. Гуриненко, «Організація систем керування сучасних безпілотних підводних апаратів», на XIV Всеукр. наук.-практ. конф. студентів, аспірантів та молодих вчених «ПОГЛЯД У МАЙБУТНЄ ПРИЛАДОБУДУВАННЯ», Київ, 2021, с. 34-37.
12. С. О. Гуриненко, «Система автоматичного керування автономним безпілотним підводним апаратом на основі мікроелектромеханічних систем», на Чотирнадцята міжнар. наук.-практ. конф. Інтегровані інтелектуальні робототехнічні комплекси (ІРТК-2021), Київ, 2021, с. 19-21.
13. Sheingold D. H. (Ed.). (1980). *Transducer interfacing handbook: a guide to analog signal conditioning* (Vol. 9). Analog Devices Incorporated.
14. Pelgrom M. J. (2013). Analog-to-digital conversion. In *Analog-to-Digital Conversion* (pp. 325-418). Springer, New York, NY.
15. Jiang H., Li W., Huang S., Cosemans S., Cathoor F., Yu S. (2021). Analog-to-Digital Converter Design Exploration for Compute-in-Memory Accelerators. *IEEE Design & Test*.

16. Yang G., Zou W., Yu L., Wu K., Chen J. (2016). Compensation of multi-channel mismatches in high-speed high-resolution photonic analog-to-digital converter. *Optics express*, 24(21), 24061-24074.
17. Palermo S., Hoyos S., Cai S., Kiran S., Zhu Y. (2018). Analog-to-digital converter-based serial links: an overview. *IEEE Solid-State Circuits Magazine*, 10(3), 35-47.
18. Toledo F. D., Brancaccio F., Cárdenas J. P. N. (2015). Proposal of a synchro panel meter instrument to replace the obsolete Synchro/Resolver reading device used as position indicator of safety rods assembly of the Brazilian IEA-R1 Nuclear Research Reactor.
19. Boyes G. (1980). *Synchro and Resolver Conversion*; Analog Devices. Memory Devices Ltd.: Surrey, UK.

Gurylenko S.O. THE CONCEPT OF UNIVERSAL INFORMATION TRANSDUCER AS AN ELEMENT OF DIGITAL CONTROL SYSTEMS

Achievements of science and technology in the field of digital and intelligent control are gradually being implemented into all industries branches. To provide intelligent control in such industries as aviation, aeronautics and astronautics, the output signals from various systems and sensors must be presented in the digital code sequences. However, in most cases output information in digital sequence from various systems and sensors that are used in aviation and astronautics is not always possible, and replacing the corresponding systems and sensors with similar ones, with the ability to provide output signal in digital sequence, is, in most cases, a laborious and challenge task and it is not always rational and economically sound. In this regard, becomes necessary to design and create a special device capable of transducing output analog information, which is obtained from a significant number of systems and sensors used at the controllable object, into a digital code sequence. The design and implementation of such a device will provide an opportunity for the implementation of digital, adaptive and intelligent control.

This paper proposes a concept of a universal information transducer intended for implementation in digital control system. The universal information transducer allows converting analog values gathering from sensors that are installed on board of the facility. The universal information transducer implements the monoblock concept with multichannel inputs that allow measuring and converting various types of quantities.

The proposed device can monitor incoming values and convert them with a predetermined desired tolerance.

Proposed article demonstrate concept main properties of the universal information transducer, the information transducer block-diagram is depicted and approach for the synchro signal conversion is presented.

Key words: *Universal information transducer (UIT), analog to digital conversion (ADC), control system, digital control system, adaptive and intelligent control.*

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.311.23

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/04>**Бунько В.Я.**Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЖЕРЕЛА АВТОНОМНОГО ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

У статті розглянуто питання електропостачання побутових споживачів електричної енергії від автономного джерела живлення. Проведено обґрунтування та дослідження якості електричної енергії, яке включає в себе вимірювання напруги, частоти, синусоїдальності напруги, а також досліджено роботу окремих побутових споживачів, котрі працюють від джерела автономного електропостачання. В якості джерела живлення використовується однофазний генератор потужністю 3,1кВт номінальною напругою 220 В. Первинним перетворювачем являється бензиновий 4-х тактний двигун внутрішнього згорання. Метою даного дослідження являється проведення вимірювання за відповідною методикою для визначення якості електричної енергії джерела автономного живлення, а також дослідження роботи окремих споживачів від даного джерела. В роботі показано та обґрунтовано залежності електричних параметрів мережі від реального часу. Наведено графічні залежності, які характеризують роботу електричної мережі та відповідно якість електричної енергії, яка визначається основними показниками – відхиленням напруги, частоти, синусоїдальності напруги та її параметрів. Методологія даного дослідження полягає у прийнятті технічного рішення з метою удосконалення режиму роботи окремих споживачів, які працюють з певним відхиленням показників якості електричної енергії. Основною проблемою, яка зустрічається в роботі джерела автономного живлення на базі бензинового генератора полягає у виробництві електричної енергії, зокрема напруги, яка має неправильну форму синусоїдальності, а від так, робота окремих пристроїв призводить до виходу з ладу його функціональних елементів, або ж такий режим призводить до надмірного нагрівання, коли мова йде про електричні двигуни, насоси тощо. В роботі використовується аналізатор якості електричної енергії AFLEX-6300, який дає можливість виміряти та проаналізувати параметри електричної мережі.

Ключові слова: показники якості, джерело автономного електропостачання, електрична енергія, відхилення, напруга, частота, навантаження, електрична мережа.

Постановка проблеми. Сьогодні, в період воєнного стану, при знищенні російським агресором майже 50 відсотків енергетичної інфраструктури нашої країни, споживачі електричної енергії опинились в дуже незручному становищі щодо виробництва, передачі та споживання електричної енергії. Ситуація, яка склалась на сьогоднішній день, полягає у вирішенні інженерно-технічного завдання, яке має на меті не тільки забезпечення споживачів електричною енергією, але і її якістю від джерела автономного електропостачання. Варто зазначити, що з частими перервами в постачанні електричної енергії від основних джерел живлення – обласних підприємств чи районів електричних мереж, споживачі масово використовують портативні, або ж мобільні джерела автономного електроживлення, які дозволяють забез-

печувати електричною енергією їхні потреби. Проте, виробництво електричної енергії від таких резервних джерел електропостачання слід визначати як кількісно, так і якісно.

Кількісний показник полягає у виробництві електричної енергії, зокрема активної потужності, витраті палива, кількості мотогодин роботи такого джерела тощо. А ось якість електричної енергії, яку необхідно забезпечити для правильної та надійної роботи споживачів оцінюється окремими критеріями, які і будуть враховуватись при функціонуванні електричних пристроїв та електронних елементів будь-якої електротехнічної системи.

Метою даного дослідження являється проведення вимірювання за відповідною методикою для визначення якості електричної енергії дже-

рела автономного живлення, а також дослідження роботи окремих споживачів від даного джерела. В роботі показано та обґрунтовано залежності електричних параметрів електричної мережі в режимі реального часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Допустиме відхилення напруги в Україні становить $\pm 5\%$, а гранично допустиме її відхилення $\pm 10\%$. Допустиме відхилення частоти струму $\pm 0,2\%$, а гранично допустиме відхилення $\pm 0,4\%$ [1]. З даного питання дослідження проводили В.М. Ванько, П.Г. Столярчук, В.Г. Кузнецов, О.Г. Шполянський, Н.А. Яремчук, А.К. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін та ін., де основна увага зосереджена на дослідженні узагальнюючого показника якості енергії в електричних мережах і системах, контролю показників та наведена методика оцінки якості електроенергії [2]. Наукові праці А.К. Шидловського присвячені загальній теорії пристроїв для стабілізації параметрів електроенергії і забезпечення електромагнітної сумісності в електричних мережах та системах стосовно вирішення проблеми підвищення якості енергії, ефективного її перетворення і використання [3].

Виклад основного матеріалу. Для дослідження системи електрозабезпечення споживачів від джерела резервного живлення використовується однофазний генератор, який приводиться в рух 4-х тактним двигуном внутрішнього згоряння потужністю 7 к.с. Основна робота такої системи полягає у забезпеченні електричною енергією споживачів чутливих до її якості. Для побутового використання такої системи в якості споживання електроенергії це стосується сучасних газових котлів, електродвигунів, насосів,

компресорів, а також мікропроцесорних пристроїв та схем електроніки.

В ході дослідження виявилось, що при живленні звичайного газового котла, система запалювання не спрацьовує, і навіть «видає» помилку на дисплеї котла F13 «Помилка основної плати». При використанні джерела автономного електропостачання виявилось, що в генераторі присутня напруга на обох затискачах номіналом 110 В, тобто відсутня нульова шина. Варто зауважити, що такий режим роботи не сприяє нормальній роботі таких пристроїв. Даний режим стосується живлення ламп розжарення, люмінесцентних та світлодіодних ламп, нечутливих електроприймачів та інших споживачів. Проте, у світлодіодних лампах спостерігається відповідна пульсація напруги, яка свідчить про якість електричної енергії на вході живлення таких пристроїв.

Очевидним є те, що потрібно вирішити питання нульової шини на генераторі. В першу чергу це потрібно зробити за допомогою контуру заземлення генератора (рис. 1).

Для порівняння зобразимо практично ідеальну синусоїдальність напруги, яка показана на рис. 2 та відображає параметри із загальної електричної мережі 220 В ТП 10/0,4 кВ. Напруга мережі в 1-й гармоніці становить 217,6 В, пікова напруга складає 298,7 В. Аналогічні дослідження проводились у 50-ти гармоніках, адже такі функціональні можливості забезпечує аналізатор якості електричної енергії AFLEX 6300 [5, 6]. За допомогою програмного забезпечення AFLEX Graphic Power Quality Analyzer зобразимо криву напруги, а також покажемо параметри даної електричної мережі (рис. 2).

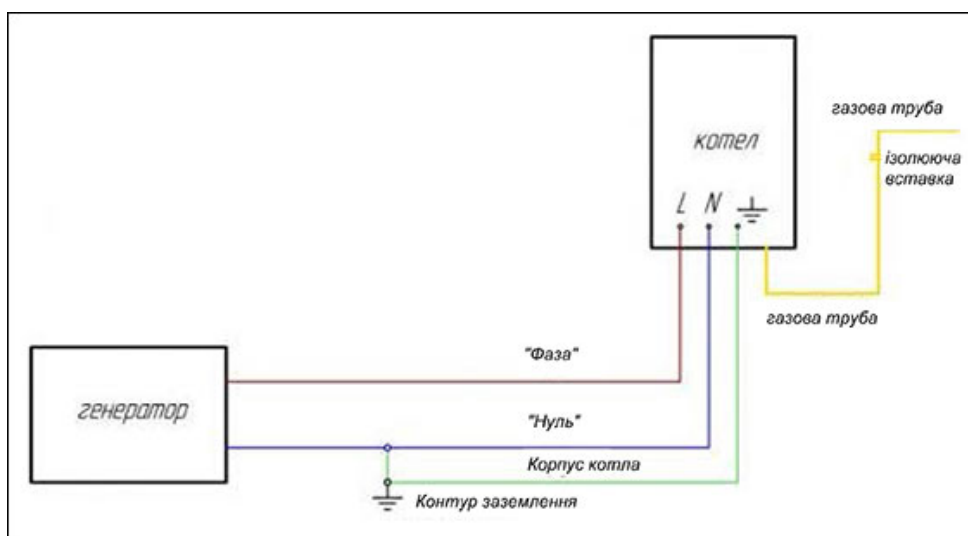


Рис. 1. Схема приєднання генератора до котла із заземлюючим пристроєм

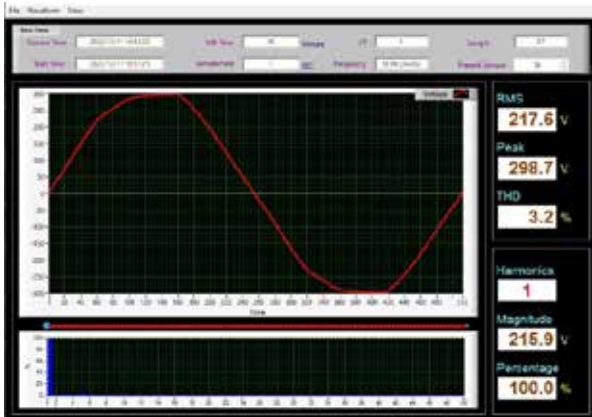


Рис. 2. Графічне зображення кривої напруги в загальній мережі від ТП10/0,4кВ

На рис. 3 показано графік, який дозволяє спостерігати та аналізувати криву напруги від автономного джерела електропостачання.

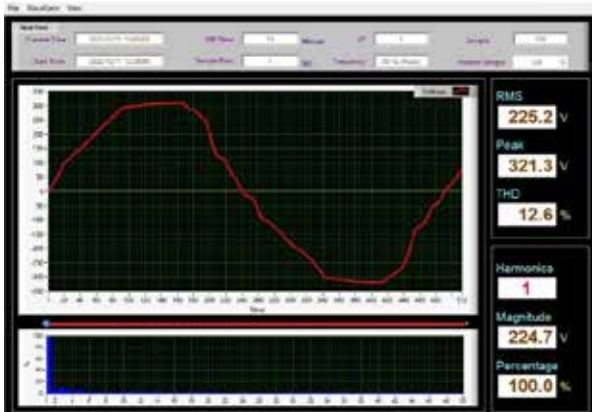


Рис. 3. Графічне зображення кривої напруги від бензинового генератора

За даним графіком номінальна напруга становить 225,2 В, а пікова – 321,3 В. Слід відзначити, що параметри електричної енергії повинні знаходитись в межах допустимих значень відповідно до [1, 4, 8], і відповідно до [1, 4, 8] відхилення напруги не повинно перевищувати $\pm 5\%$ від номінальної напруги. У збільшеному форматі така крива має наступний вигляд (рис. 4).

Проте, за даною кривою напруги можна охарактеризувати ступінь несинусоїдальності кривизни такого значення. Зокрема, спостерігається викривлення амплітуди кожних 15 секунд, яка негативно впливає на роботу окремих споживачів: вентиляторів, насосів, компресорів тощо (рис. 5). На даному рисунку спостерігається підвищення номінальної напруги, за рахунок вимикання окремих споживачів. Показник напруги, який складає 235,2 В не відповідає встановленим вимогам стандарту [1, 4, 8], адже номінальна напруга пови-

нна знаходиться в межах $\pm 5\%$ від $U_{\text{ном.мережі}}$, тобто (209÷231) В [5, 6, 8].



Рис. 4. Збільшений вигляд кривої напруги



Рис. 5. Графічне зображення кривої напруги в режимі реального часу

Зведені дані відхилення напруги слід аналізувати за допомогою графіка, який показано на рис. 6. та фіксує дані показники з періодичністю 25 секунд в реальному часі [5, 6].



Рис. 6. Графічне зображення відхилення напруги з врахуванням n-гармонік

Варто зауважити, що розвиток сучасних технологій напівпровідників веде до все більш зростаючої кількості споживачів, керованих тиристо-

рами і перетворювачами. На жаль, перетворювачі збільшують значення індуктивної реактивної потужності і погіршують несинусоїдальну форму струмової кривої. Ці перешкоди, які містяться в електричній мережі ведуть до пошкоджень і помилкових спрацьовувань обладнання та приладів. Типовий струм перетворювача являє собою накладення різних синусоїдальних складових струму, тобто основну мережеву частоту і певного числа так званих вищих гармонік (в електричній мережі в першу чергу гармоніки 5-го, 7-го і 11-го порядків). Зміст вищих гармонік веде до підвищення струму в конденсаторах, тому що реактивний опір конденсаторів зі зростанням частоти зменшується. Паралельно зі зростанням струму в конденсаторах, який можна регулювати за допомогою конструктивних заходів, в несприятливих випадках в мережах можуть виникнути резонансні явища [7, 9].

Компенсаційні конденсатори й індуктивності трансформатора та мережі являють собою резонансний контур. Якщо власна частота такого контуру співпадає з частотою вищих гармонік, то можливе виникнення коливань зі значними надструми і перенапруги. Це веде до перевантажень та пошкоджень в електричних установках і може привести до таких наслідків [9]:

- зниження терміну служби конденсаторів;
- передчасне спрацьовування контакторів та інших запобіжників;
- вихід з ладу або помилкова робота комп'ютерів, приводів електродвигунів, пристроїв освітлення та інших чутливих споживачів.

Метою підключення дроселя (реактора) до конденсатора служить зниження резонансної частоти мережі до такого значення, величина якого нижча за значення найменшої вищої гармоніки даної мережі. Цим запобігається резонанс між

конденсаторами і мережею, а значить і зростання струмів вищих гармонік. Крім того, таке вмикання має ефект фільтра, при якому зменшується ступінь спотворення напруги. Це рекомендується в тих випадках, коли частка споживачів, що забруднюють мережу вищими гармоніками, становить понад 20% усіх споживачів мережі. Резонансна частота конденсатора, ввімкненого послідовно з дроселем, завжди лежить нижче частоти 5-ої гармоніки. Для струмів вищих гармонік коло фільтра являє собою дуже низький повний опір, тому велика частина таких струмів направляється в цей контур [7, 9].

В результаті проведення даного дослідження використовувались окремі фільтри для згладжування кривизни синусоїдальності напруги.

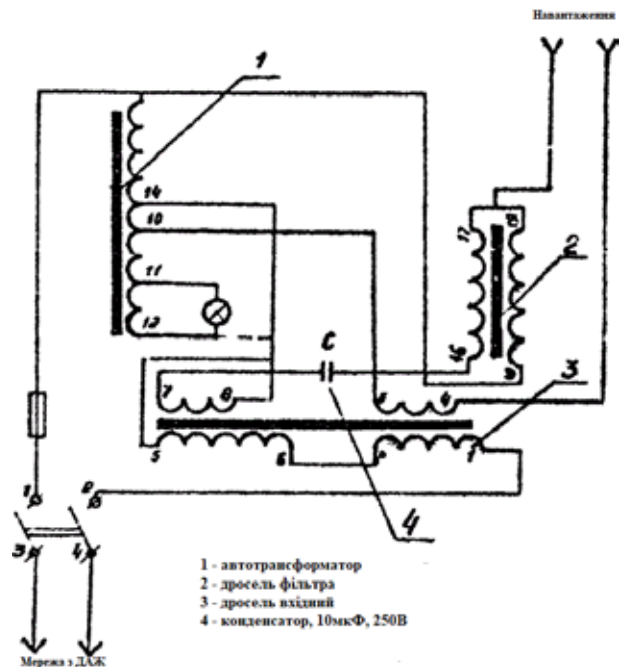


Рис. 7. Схема ввімкнення ферорезонансного фільтра



Рис. 8. Криві напруги з використанням ферорезонансних фільтрів

З даних графіків можна зробити висновок, що амплітуда синусоїдальності напруги значно покращилась, а відповідно і покращується робота споживачів, які приєднані до даної системи електроживлення.

При використанні даної методики дослідження спостерігається, що частота при цьому залишається стабільною – 50 Гц, проте в автономних джерелах живлення частота генератора як правило становить 52–53 Гц. Це пов'язано з тим, що заводом-виготівником на початковій стадії виробництва таких генераторів встановлюється значення частоти з врахуванням режиму роботи генератора при певному навантаженні.

У бензинових чи дизельних електростанціях регулювання частоти обертання двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) (об/хв) та регулювання частоти генератора (Гц) змінного струму безпосередньо пов'язані.

Частота обертання двигунів електрогенераторів для резервного електропостачання у нормальному режимі становить 3000÷3500 об/хв, при таких обертах двигуна частота генератора – 50÷52 Гц.

В ідеалі частота повинна бути 50 Гц, з тих простих причин, що електрогенератор не може забезпечити частоту, яка точно дорівнюватиме 50 Гц через зміни частоти обертання двигуна.

Висновки. Вимірювання параметрів та визначення якості електричної енергії джерела автономного живлення за відповідною методикою, а також проведення дослідження роботи окремих електричних споживачів від даного джерела являється актуальним питанням на сьогоднішній день в період масового використання різних типів електрогенераторів.

В роботі показано та обґрунтовано залежності електричних параметрів мережі від реального часу. В даному експериментальному дослідженні використовується джерело автономного живлення – однофазний генератор, який живить споживачів електричної енергії, зокрема чутливих до синусоїдальності напруги в мережі 0,22кВ.

В результаті проведених досліджень було визначено параметри електричної енергії: складові напруги та частоти. В окремих випадках спостерігається підвищення напруги, а також її несинусоїдальність, що в певній мірі негативно впливає на роботу окремих електричних приладів та пристроїв. При використанні в електричних схемах згладжувальних фільтрів спостерігається вирівнювання синусоїди напруги та струму, що дає можливість покращити роботу як побутового, так і промислового електроустаткування.

Список літератури:

1. СОУ НЕК 03.120.4-14:2021 Норми якості електричної енергії в магістральних та міждержавних електричних мережах НЕК Укренерго.
2. Кузнєцов В.Г., Шполянський О.Г., Яремчук Н.А. Узагальнений показник якості енергії в електричних мережах і системах. *Технічна електродинаміка*. 2011. № 3. С. 46-52.
3. А.К. Шидловський, В.О. Новський, А.Ф. Жаркін. Стабілізація параметрів електричної енергії в трифазних системах напівпровідниковими коригуючими пристроями. Київ, Інститут електродинаміки НАН України. 2013. 378с.
4. ГОСТ 13109-97 Електрична енергія. Сумісність технічних засобів електромагнітна. Норми якості електричної енергії в системах електропостачання загального призначення. http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=25837 (дата звернення 27.11.2022)
5. Бунько В. Я. Аналіз впливу відхилень показників якості електричної енергії на функціонування електроспоживачів. *Електромеханічні та енергетичні системи. Методи моделювання та оптимізації*. Збірник наукових праць XVI Міжнародної науково-технічної конференції молодих учених і спеціалістів у місті Кременчук 12–13 квітня 2018 р. Кременчук, КрНУ, 2018. С. 134– 135.
6. Бунько В.Я. Питання якості електричної енергії в розподільних пристроях систем електропостачання. *Науковий журнал «Молодий вчений»*. 2016. № 1. Ч. 3. С. 99-103.
7. ДСТУ ІЕС 61000-4-7:2012 (ІЕС 61000-4-7:2009, ІДТ) Електромагнітна сумісність. Частина 4-7. Методики випробування та вимірювання. Загальна настанова щодо вимірювання гармонік та інтергармонік від електропостачальних систем загальної призначеності й допоміжного устаткування.
8. Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності: ДСТУ EN 50160:2014 (EN 50160:2010, ІДТ). [Чинний з 1.10.2014]. К.: Держстандарт України, 2014. 27 с.
9. Вплив вищих гармонік і їх фільтрація. <https://electrocontrol.com.ua/ua/stati-sxemy-i-spravochnaya-informaciya/1846.html> (дата звернення 10.01.2023)

Bunko V.Ya. RESEARCH OF THE QUALITY OF THE ELECTRIC ENERGY OF THE SOURCE OF AUTONOMOUS ELECTRICITY SUPPLY

The article deals with the issue of electricity supply to household consumers of electricity from an autonomous power source. A substantiation and study of the quality of electrical energy was carried out,

which includes measurement of voltage, frequency, sinusoidal voltage, as well as the work of individual household consumers, which work from an autonomous power supply source, was investigated. A single-phase generator with a capacity of 3.1 kW with a nominal voltage of 220 V is used as a power source. The primary converter is a gasoline 4-stroke internal combustion engine. The purpose of this study is to measure according to the appropriate method to determine the quality of electric energy of an autonomous power source, as well as to study the operation of individual consumers from this source. The paper shows and substantiates the dependence of electrical parameters of the network on real time. Graphical dependences are presented that characterize the operation of the electrical network and, accordingly, the quality of electrical energy, which is determined by the main indicators – voltage deviation, frequency, voltage sinusoidality and its parameters. The methodology of this study consists in making a technical decision with the aim of improving the mode of operation of individual consumers who work with a certain deviation of the indicators of the quality of electric energy. The main problem encountered in the operation of an autonomous power source based on a gasoline generator is the production of electrical energy, in particular, a voltage that has an irregular sinusoidal shape, and the operation of individual devices leads to the failure of its functional elements, or such a mode leads to excessive heating when it comes to electric motors, pumps, etc. The work uses the AFLEX-6300 power quality analyzer, which makes it possible to analyze and measure the parameters of the electrical network.

Key words: *quality indicators, source of autonomous power supply, electric energy, deviation, voltage, frequency, load, electric network.*

ПРИЛАДИ

УДК 535.232.6

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/05>

Романюк В.А.

Національна академія Національної гвардії України

Стародубцев С.О.

Національна академія Національної гвардії України

ОЦІНКА ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛАЗЕРНИХ СИСТЕМ ПРОТИДІЇ СНАЙПЕРАМ

Стаття присвячена визначенню способів протидії снайперам противника. З розвитком технологій у сучасних конфліктах стало дедалі більшу роль відігравати зброя нелетального впливу. Тобто, що не призводить до смерті суперника, але на деякий час позбавляє його можливості вести активні дії. Один із таких засобів – лазерна зброя. Бойові лазерні комплекси різного призначення застосовують у провідних арміях світу. Бойові лазери є в арміях США, Німеччини, Великобританії, Франції, Ізраїлю, Китаю, Індії, Японії, Туреччини.

Досліджено, що одним з можливих застосувань лазерних комплексів – боротьба зі спостерігачами та снайперами. Відповідні системи вже розроблені, але ще не виробляються масово та не застосовуються. Експерти очікують на прорив у цій збройній області приблизно через кілька років. Інша сфера застосування – пригнічення оптичних та оптико-електронних засобів, таких як тепловізори, біноклі, приціли, головки самонаведення.

Зв'язано, що нині дедалі більше уваги приділяється можливості вивести з ладу живу силу противника, не знищуючи її. Тим більше, що вражений значно сильніше знижує боєздатність свого підрозділу, ніж убитий. Детектори оптичних систем працюють в інфрачервоному діапазоні, і ловлять відблеск зондуючого променя від лінзи оптичного прицілу чи іншого оптичного приладу. Вони бувають досить різні: найкомпактніші моделі за габаритами нагадують бінокль чи лазерний далекомір, і сканування ними відбувається у ручному режимі. Більш складні мобільні лазерні радары мають систему розгортки променя, і здатні автоматично сканувати заданий сектор простору – приблизно так само, як і звичайний радар.

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

Розглянуто дію лазерів на організм людини, яка залежить від параметрів випромінювання (потужності) і енергії опромінення на одиницю поверхні, довжини хвилі, тривалості імпульсу, частоти імпульсів, часу опромінення, площини поверхні, що опромінюється), локалізації впливу і анатомо-фізіологічних особливостей об'єкта, що опромінюється.

Визначено енергію потоку лазерного променя, що потрапляє на біологічні тканини і може спричинити серйозні ураження. Лазерне випромінювання впливає на живий організм шляхом теплової механічної та електричної дії. Опромінення лазерними променями може викликати функціональні порушення у діяльності центральної нервової системи, серцево-судинної системи, ендокринних залоз. Опромінення може призвести до згортання або розпаду крові, пошкодження очей, шкіри, спричинити генетичні зміни, головний біль, розлади сну, слабкість тощо.

Ключові слова: лазерна зброя, лазерне випромінювання, оптико-електронні прилади, параметри випромінювання, органи зору.

Постановка проблеми. Останнім часом через позиційний характер боїв лівша частина наших незворотних втрат є жертвами снайперів ворога. Але від їхніх куль вберегтися можна. Для цього насамперед слід навчитися вираховувати, як і де

вони можуть працювати. А потім – запровадити власну систему протидії їх вогню.

Снайпери, як правило, діють у складі групи, в якій може бути кілька стрільців і прикриття – кулеметник чи гранатометник. Вирішивши знищити

виявленого стрільця, ви ризикуєте загинути від кулі його напарника. Вони навіть за наявності приладів безшумної стрільби прагнуть стріляти переважно під прикриттям вогню зі стрілецької зброї своїх спільників. Пояснення просте: на поодинокі влучання кулі поряд не обов'язково звертають увагу, а за масованого обстрілу «спишуть» його на випадковість. Отже, безпідставний спалах неприцільної стрілянини бажано сприймати і як початок роботи по наших позиціях снайперів [1, с. 4].

Бойові лазерні комплекси різного призначення дедалі ширше застосовують у провідних арміях світу. Нові конструкторські рішення та поява потужних та компактних акумуляторів дали можливість створити переносні бойові лазери, що використовуються безпосередньо на полі бою.

Бойові лазери застосовуються проти безпілотників, високоточних ракет, а також проти спостерігачів та снайперів. Мобільні лазерні комплекси поки що масово не виробляються і не застосовуються, потужний прорив у цьому напрямку експертами очікується через 2-5 років. Лазер може засвічувати апаратуру оптичної розвідки та прицільні засоби, порушувати роботу систем управління та зв'язку. Оскільки важливим елементом перемоги над противником стає не вбивство солдата супротивника, а виведення його з ладу, актуальним стає завдання створення лазерної зброї нелетальної дії [2, с. 1-2].

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

Потенційно висока бойова ефективність при прийнятних вартісних характеристиках є визначальним фактором для переходу до реалізації програм розробки комплексів лазерної зброї різного призначення з метою подальшого прийняття на озброєння [3, с. 30].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні проблеми розробки сучасної зброї на нових фізичних принципах та засобів ближнього бою досліджувались у працях вітчизняних (Г.М. Доля, А.М. Катунін, В.І. Карпенко, С.М. Шостко, І.С. Шостко та ін.) так і зарубіжних дослідників (С. Колотушкін, Н. Фомкін та ін.).

Зарубіжними фахівцями досить добре вивчені особливості вражаючої дії лазерного випромінювання видимого та інфрачервоного діапазонів на людину: "яке осліплює" (тимчасова втрата або спотворення зорового сприйняття) та "опікового"

(зворотнє збудження больових рецепторів шкірного покриву) відповідно. При впливі лазерного випромінювання на органи зору людини забезпечується тимчасова втрата світлочутливості сітківки ока (фотоофтальмія) і, як наслідок, дезорієнтація людини у просторі [5, с. 46].

Основні зусилля при вдосконаленні оптоелектронних приладів направлені на їх функціонування незалежно від часу доби та погоди (дощ, туман, тощо), наявності завад природного та штучного походження, застосування засобів маскування. Забезпечити виконання бойової задачі в таких умовах можливо тільки при об'єднанні в одній схемі каналів, які працюють в різних спектральних діапазонах [5, с. 63; 3, с. 32].

Основна небезпека, яку лазери представляють для людського ока, випливає з того, що око само по собі є високоточним і ефективним фокусуючим оптичним пристроєм для світла в певному діапазоні. Об'єднання лазерів з оптикою оптичних прицілів тільки збільшує потенційну небезпеку ураження очей лазерним випромінюванням [6, с. 1; 4, с. 80].

Метою роботи є оцінка технічних характеристик оптоелектронних засобів ведення контрснайперської боротьби як одного з напрямків удосконалення озброєння для підрозділів Національної гвардії України.

Виклад основного матеріалу. Аналіз розвитку оптоелектронних приладів розвідки та прицілювання вказує на високу актуальність задачі розробки системи протидії таким засобам.

Основними вимогами до систем чи комплексів, які розробляються, відносяться: висока оперативність виявлення цілей; система повинна забезпечувати виконання бойової задачі в любий час доби, незалежно від умов спостереження; всі операції в роботі системи не повинні демаскувати її місце дислокації [3, с. 32].

Відповідно до заданих вимог проведемо дослідження щодо вибору параметрів лазерного пристрою.

Дуже важливим є вибір довжини хвилі випромінювання, на якій буде здійснюватись лоціювання снайпера. Лазерне випромінювання подібно сонячному світлу, в тому сенсі, що воно теж падає на око паралельними променями, які дуже ефективно фокусуються на сітківці, внутрішній оболонці ока, чутливої до світла. Потенційна небезпека для очей залежить від довжини хвилі лазерного випромінювання, інтенсивності пучка, відстані від випромінювача до ока і потужності лазера (як середнього значення потужності при безперервній генерації імпульсів, так і пікової потужності при імпульсному випромінюванні) [6, с. 2].

Довжина хвилі має дуже велике значення, тому що тільки випромінювання в діапазоні приблизно від 400 до 1400 нанометрів може потрапити в очі і значно пошкодити сітківку. Світло в ближньому УФ-діапазоні може пошкодити шари, близькі до поверхні ока і привести до розвитку катаракти, особливо у молодих людей, очна тканина яких більш прозора для світла цих довжин хвиль. Світло у ближній ІЧ-області також може пошкодити поверхню ока, хоча і з більш високим порогом пошкодження (променевої стійкості), ніж ультрафіолет.

Реакція людського ока на різні довжини хвиль неоднакова, і це визначає, поряд з іншими факторами, потенційну шкоду очам. Вплив імпульсних лазерів відрізняється від впливу лазерів з безперервним випромінюванням. На практиці лазери, що працюють в імпульсному режимі, мають велику потужність, і одиничний мікросекундний імпульс достатньої потужності може нанести серйозні пошкодження при попаданні в око, тоді як менш потужне безперервне випромінювання може пошкодити око тільки при тривалому опроміненні.

Основна небезпека, яку лазери представляють для людського ока, випливає з того, що око само по собі є високоточним і ефективним фокусуючим оптичним пристроєм для світла в певному діапазоні. Об'єднання лазерів з оптикою оптичних прицілів тільки збільшує потенційну небезпеку ураження очей лазерним випромінюванням.

Ймовірність ушкодження різних структур очей лазерним випромінюванням залежить від типу цих структур. Чи буде пошкоджена рогівка, кришталик або сітківка, залежить від характеристик поглинання різних очних тканин, а також довжини хвилі і інтенсивності лазерного випромінювання. Довжина хвилі випромінювання, що потрапляє на сітківку, внутрішню поверхню очей, визначається сумарними характеристиками пропускання очей.

На рисунку 1 представлена залежність пропускання лазерного променя очима від довжини хвилі випромінювання у відповідному спектральному діапазоні.

Оптичне посилення розслабленого людського ока при попаданні колімованим пучком променів, яке виражається як відношення площі зіниці до площі (сфокусованого) зображення на сітківці, становить величину близько 100000. Це відповідає збільшенню опромінення (щільності потоку випромінювання) при проходженні світла від рогівки до сітківки в п'ять разів. З урахуванням аберації в системі кришталик – рогівка і дифракції на райдужній оболонці ока, нормальне око здатне фокусувати на сітківці пляму розміром 20 мікрометрів.

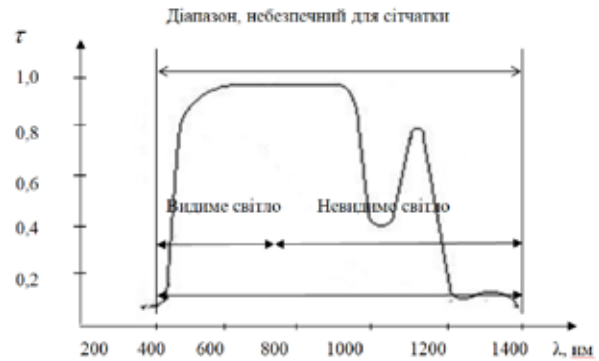


Рис. 1. Залежність пропускання лазерного променя очима від довжини хвилі випромінювання

Така ефективність очей призводить до того, що навіть малопотужний лазерний промінь при попаданні в очі може бути сфокусований на сітківці і майже миттєво пропалити в ній отвір, безнадійно пошкодивши при цьому зорові нерви. Удавана мала потужність лазерів може бути дуже оманлива, з огляду на небезпечну ступінь концентрації енергії випромінювання при фокусуванні променів пучка.

Вибираючи довжину хвилі, необхідно враховувати, що все зорове сприйняття в очах здійснюється за допомогою паличок та колбочок, при цьому найбільш відповідальним елементом ока є невеличка ділянка, яка розташована на оптичній вісі хрусталика, яка називається жовтою плямою, в центрі якої знаходиться центральна ямка – фовена, де розташовані тісно прижаті один до одного колбочки. Вони то і визначають розрізняльну здатність ока – гостроту зору та розрізнення кольорів. Розрізняльна здатність ока при сонячному світлі забезпечується колбочками і складає 0,5 – 1 кут. хв., а в сутінках вона падає, передаючи свої функції апарату паличок. При цьому спектральна чутливість збільшується в бік більш коротких довжин хвиль, а її максимум з довжини хвилі 0,55 мкм (1), переходить на довжину хвилі 0,51 мкм (2). (графік на рисунку 2) [7, с. 1].

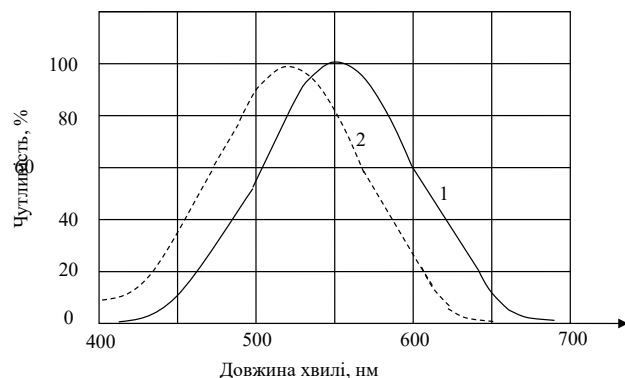


Рис. 2. Відносна спектральна світлова ефективність для денного (1) і нічного (2) зору

Відповідно до вищезазначеного, робимо висновок, що для лоціювання необхідно вибирати довжину хвилі, яка знаходиться за межами чутливості ока, тим самим виключаючи можливість виявлення снайпером процесу виявлення.

Але вибір довжини хвилі за межами чутливості ока не завжди дає позитивний ефект. Атмосфера по різному впливає на ту чи іншу довжину хвилі оптичного діапазону. Загальне послаблення випромінювання в атмосфері обумовлено двома основними процесами:

- поглинання газовими компонентами, внаслідок чого виникає перетворення енергії в інші її види;
- молекулярним та аерозольним послабленням чи розсіюванням, внаслідок чого змінюється напрямок випромінювання.

Загальне послаблення лазерного випромінювання в оптично однорідному середовищі описується експоненціальним законом Бугера:

$$I_L = I_0 \exp(-\alpha L), \quad (1)$$

- де: I_L – інтенсивність випромінювання, яке пройшло шлях L ;
 I_0 – інтенсивність випромінювання на початку траси;
 α – показник послаблення.

Спектральне пропускання шару середовища розраховується за формулою

$$\tau(\lambda) = \frac{I_1(\lambda)}{I_0(\lambda)}. \quad (2)$$

З урахуванням двох основних факторів послаблення – поглинання та розсіювання – вираз для $\tau(\lambda)$ можна представити у вигляді:

$$\tau(\lambda) = \tau_n(\lambda)\tau_A(\lambda), \quad (3)$$

- де: $\tau_n(\lambda) = \exp[k_n(\lambda)L]$ $\tau_A(\lambda) = \exp[\alpha_A(\lambda)L]$;
 k_n – спектральний монохроматичний коефіцієнт поглинання;
 α_A – спектральний монохроматичний коефіцієнт аерозольного розсіювання.

Таким чином, для визначення загального пропускання атмосфери достатньо знайти величину коефіцієнтів k_n та α_A для метеокутів, які розглядаються.

Формула для розрахунків величини τ_n має вигляд

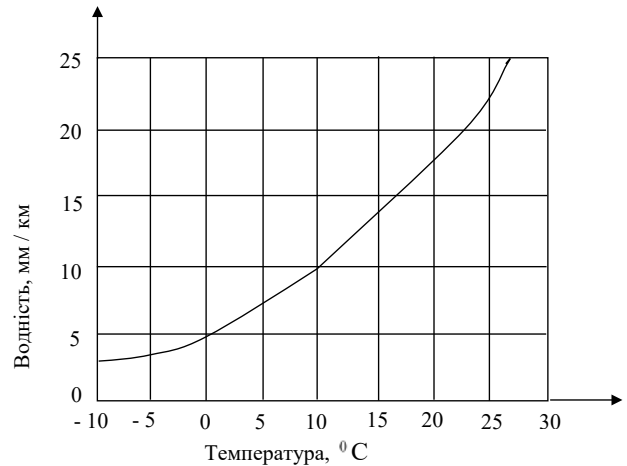
$$\tau_n = \tau_0 - K_L \lg \omega,$$

- де: t_0 і k_L – постійні для розглянутої ділянки спектра;
 $\omega = a_n L$ – водність, мм;
 L – шлях випромінювання, км;
 α_A – абсолютна вологість або концентрація водяного пару.

Графік залежності насиченості атмосфери вологою від температури повітря представлено на графіку, рисунок 3 [7, с. 67-68].

Знайшовши «вікно» пропускання атмосфери, необхідно врахувати послаблення випромінювання, яке виникає за рахунок розсіювання.

Для розрахунків величини деяких констант можна взяти з спеціалізованих таблиць (таблиця 1).



t0	106,3	106,3	96,3	81,0	72,5
k1	15,1	16,5	17,1	13,1	13,1
Δλ, мкм	0,70- 0,92	0,92- 1,10	1,10- 1,40	1,40- 1,90	1,90- 2,70

Рис. 3. Залежність водності від температури

Розсіювання молекулами і частинками можна пояснити за допомогою теорії. Якщо розмір молекули або частинки значно менше за довжину хвилі, то спостерігається Релеєвське розсіювання по закону λ^{-4} . Для частинок, розміри яких більше довжини хвилі, спостерігається неселективне розсіювання. Тому при розрахунках спектрального коефіцієнта пропускання використовують експериментальні дані по визначенню так званої метеорологічної дальності видимості d_v (таблиця 2).

Метеорологічна дальність видимості характеризує замутненість атмосфери і дорівнює найбільшій відстані видимості днем темних предметів з кутовими розмірами більше 30 град., розташованих на фоні неба біля горизонталі [8, с. 75].

Мінімальний контраст, який сприймає око (пороговий контраст), дорівнює 2 %. Тому метеорологічна дальність видимості d_v – це відстань, на якому об'єкт з одиничним контрастом після проходження атмосфери сприймається з контрастом 0,02 тобто

$$K_v(d_v) = K_v(0) \exp(-\alpha_A d_v), \quad (4)$$

де:

$$K_v(0) = 1; K_v(dv) = 0,02. \quad (5)$$

Звідси

$$\alpha_A = \frac{1}{d_v} \ln \frac{K_v(d_v)}{K_v(0)} = \frac{3,91}{d_v}, \quad (6)$$

де: d_v – вимірюється в км;

α_A – вимірюється в км⁻¹.

Таблиця 2

Характеристика видимостей	Метеорологічна дальність видимості, км.	Умови спостереження
Дуже погана	<0,05	Дуже сильний туман
	0,05..0,2	Сильний дощ, густий туман
	0,2 ... 0,5.	Помірний туман, сніг
Погана	0,5...1	Сильний туман, помірний сніг
	1...2	Дуже сильний дощ, помірна димка або сніг
Середня	2...4	Сильний дощ, слабка димка, або сніг
	4...10	Помірний дощ, дуже слабка димка
Добра	10...20	Без опадів, або слабкий дощ
Дуже добра	20...50	Без опадів
Виключна	>50	Дуже чисте повітря

За результатами натуральних вимірювань встановлено, що коефіцієнт послаблення за рахунок розсіювання становить $\alpha_A = \lambda^{-1,3}$ для діапазону 0,3...14 мкм. Тому спектральний коефіцієнт послаблення $\tau_A(\lambda)$ за рахунок розсіювання на атмосферних молекулах та частинках знаходиться за формулою:

$$\tau_A(\lambda) = \tau_A(\lambda_0) \left[\frac{\lambda_0}{\lambda} \right]^{1,3} = \frac{3,91}{d_v} \left[\frac{0,55}{\lambda} \right]^{1,3}, \quad (7)$$

де: $\lambda_0 = 0,55$ мкм;

λ – довжина інфрачервоного випромінювання.

Ще одним важливим фактором який впливає на вибір довжини хвилі є власне випромінювання атмосфери. Власне випромінювання атмосфери обумовлено наявністю в ній водяної пари та вуглекислого газу, на якому розсіюється випромінювання сонця. В діапазоні 3...4 мкм майже при любых умовах енергетичні яскравості власного та розсіяного випромінювання однакові. При довжинах хвиль, від 4 мкм та вище, велику

яскравість має власне випромінювання. Температура атмосфери, в залежності від пори року, знаходиться в межах 200...300 К, тому максимум інтенсивності випромінювання атмосфери знаходиться в межах 10 мкм. Максимальне значення спектральної енергетичної яскравості складає $10^{-3} \frac{Вт}{(см^2 \cdot ср \cdot мкм)}$.

Спектральна енергетична яскравість атмосфери має максимуми, які відповідають центрам смуг поглинання водяної пари (6,3 мкм), озону (9,6 мкм), вуглекислого газу (15 мкм). На рисунку 4 зображений графік спектра теплового випромінювання атмосфери.

Необхідно також визначити енергію в імпульсі W , випромінювану передавальним пристроєм, якої достатньо для тимчасового засліплення очей людини, що знаходиться на віддаленні R від випромінювача.

Вихідні дані:

– необхідна щільність енергії на вхідному зіниці ока становить $W_{пор} = 10-2 \text{ Дж/м}^2$;

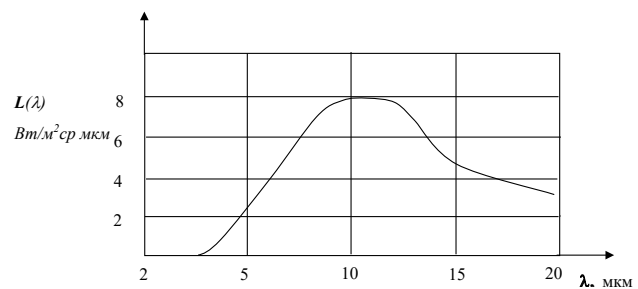


Рис. 4. Графік спектра теплового випромінювання атмосфери

– розходження випромінювання передавального каналу $I^\circ \times I^\circ$. Для розрахунків перетворимо задане розходження в тілесний кут

$$\Omega = \frac{1}{57,3} \cdot \frac{1}{57,3} = 3,05 \cdot 10^{-4} \text{ ср}. \quad (8)$$

Припускаємо, що випромінювач з розходженням Ω віддалений від ока по горизонталі на відстань R . Тоді прозорість траси, що з'єднає передавач і очі, визначимо у вигляді

$$T_\alpha = \exp(-\alpha R), \quad (9)$$

де α – показник ослаблення оптичного сигналу в атмосфері, його значення для середнього стану атмосфери можна прийняти рівним (0,2 – 0,4) 1/км. Випромінювач із заданим розходженням Ω на відстані R буде висвітлювати майданчик, розташований перпендикулярно до осі поширення променя, з розміром площі $S_{оп}$, яку визначимо через тілесний кут Ω і відстань R як:

$$S_{оп} = R^2 \cdot \Omega. \quad (10)$$

Тоді знайдемо щільність енергії випромінювання на вхідному зіниці ока через обрані параметри

$$W_{прим} = \frac{W \cdot T_a}{S_{опр}} = \frac{W \cdot \exp(-\alpha \cdot R)}{R^2 \cdot \Omega} \quad (11)$$

Для виведення з ладу очей треба, щоб щільність енергії на входній зіниці ока була не менш заданої $W_{пор}$, тобто треба

$$W_{оч} > W_{пор} = 10^{-2} \frac{дж}{м^2} \quad (12)$$

Формула для розрахунку потрібної енергії випромінювання буде мати вигляд:

$$W(R) = \frac{W_{пор} \cdot R^2 \cdot \Omega}{\exp(-\alpha \cdot R)} = W_{пор} \cdot R^2 \cdot \Omega \cdot \exp(\alpha \cdot R) \quad (13)$$

Визначимо розмірності і значення величин, які входять у формулу. $W_{пор} = 10^{-2} \text{ Дж/м}^2$, $R = 1000 \text{ м}$; $\alpha = 0,00031/\text{м}$. Підставимо ці значення у формулу для енергії вихідного випромінювання передавального каналу, отримаємо:

$$W = 10^{-3} (10^3)^2 \cdot 3 \cdot 10^{-4} e^{0,3} = 0,4 \text{ Дж}$$

Графік залежності випромінюваної енергії від дальності наведено на рисунку 5 [9, с. 168-169].

Висновки. Засоби контрснайперської боротьби, засновані на використанні оптичних квантових генераторів (лазерів) можуть значно підвищити живучість військ на полі бою. Необхідність застосування таких засобів у сучасному озброєнні обу-

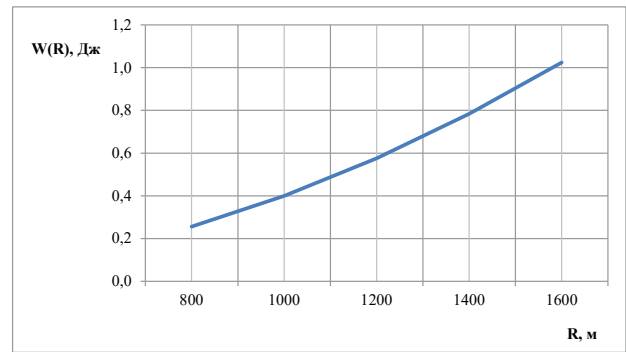


Рис. 5. Залежність випромінюваної енергії лазера від дальності до цілі

мовлене його малою вагою і розмірами, високою готовністю, інформативністю, мобільністю.

Реалізація технічних характеристик розглянутого обладнання призведе до значного зростання можливостей підрозділів, які будуть оснащені оптико-електронними системами, надати перевагу в перехопленні ініціативи на полі бою. Енергія випромінювання запропонованих лазерних засобів протидії повинна забезпечити ураження сітчатки ока снайпера чи приймальних елементів приймача наведення снайпера.

Список літератури:

1. Бойовий бюлетень центру морально-психологічного забезпечення Збройних Сил України. Протидія ворожим снайперам. URL: https://dovidnykmpz.info/wp-content/uploads/2020/06/BB_164_compressed. № 164 червень 2020 р. 4 с. (дата звернення: 07.01.2023).
2. Ученые назвали поражающие факторы боевых лазеров: кровь закипает. URL: <https://www.mk.ru/politics/2022/01/04/uchenye-nazvali-porazhayushhie-factory-boevykh-lazerov-krov-zakipает.html> (дата звернення: 05.01.2023).
3. Романюк В.А. Застосування лазерного та оптоелектронного озброєння у військових формуваннях Національної гвардії України. В.А. Романюк, С.О. Стародубцев, Ю.А. Драган, А.Г. Літвінов. Вчені записки Таврійського Національного університету ім. В.І.Вернадського. Технічні науки. Том 32(71) № 5. 2021. С. 30-35.
4. Танцюра А.Б. Аналіз та перспективи розвитку технічних засобів контрснайперської боротьби. А.Б. Танцюра, Я.Н. Кожушко, В.В. Радецкий, А.В. Шевчук Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2019. 4(62). С. 79-84.
5. Фомкин Н. Приоритетные направления развития лазерного оружия за рубежом. Зарубежное военное обозрение. №12, 2011г. С. 43-46.
6. Лазерная безопасность. URL: https://stormoff.ru/mediacenter/articles/article_66/ (дата звернення: 13.12.2022).
7. Спектральна світлова ефективність монохроматичного випромінювання. URL: <https://profilbaru.com/uk/> (дата звернення: 16.12.2022).
8. Ю.Г.Якушенков. Теория и расчет оптико-электронных приборов. Москва. Логос. 1999. 479 с.
9. Дозиметрия лазерного излучения / Под редакцией Н.Д. Устинова. Москва : Радио и связь, 1983. 192 с.

Romanyuk V.A., Starodubtsev S.O. EVALUATION OF TECHNICAL CHARACTERISTICS OF LASER ANTI-SNIPER SYSTEMS

The article is devoted to the definition of methods of countering enemy snipers. With the development of technology, non-lethal weapons have become increasingly important in modern conflicts. That is, which does not lead to the death of the opponent, but for some time deprives him of the opportunity to take active actions. One of these means is a laser weapon.

Combat laser complexes of various purposes are used in the world's leading armies. Combat lasers are in the armies of the USA, Germany, Great Britain, France, Israel, China, India, Japan, and Turkey.

It has been studied that one of the possible applications of laser complexes is the fight against observers and snipers. Appropriate systems have already been developed, but are not yet mass-produced or used. Experts expect a breakthrough in this weaponized area in about a few years. Another area of application is suppression of optical and opto-electronic means, such as thermal imagers, binoculars, sights, homing heads.

It has been revealed that nowadays more and more attention is paid to the possibility of disabling the enemy's manpower without destroying it. All the more so, as a hit man reduces the combat effectiveness of his unit much more than a killed one.

Detectors of optical systems work in the infrared range, and catch the reflection of the probing beam from the lens of an optical sight or other optical device. They are quite different: the most compact models resemble binoculars or a laser rangefinder in terms of dimensions, and they scan in manual mode. More sophisticated mobile laser radars have a beam scanning system and they are able to automatically scan a given sector of space – approximately the same as a conventional radar.

It was proved that the most powerful and most advanced laser weapon systems, in addition to the detector module, are equipped with a combat laser that is capable of blinding and disabling optical-electronic devices or the sniper after they are found by the laser detector radar.

The effect of lasers on the human body is considered, which depends on the radiation parameters (power) and irradiation energy per unit surface, wavelength, pulse duration, pulse frequency, irradiation time, the plane of the irradiated surface), the localization of the effect and the anatomical and physiological features of the irradiated object.

The energy of the laser beam flow, which falls on biological tissues and can cause serious damage, is determined. Laser radiation affects a living organism through thermal, mechanical and electrical action. Irradiation with laser rays can cause functional disturbances in the activity of the central nervous system, cardiovascular system, and endocrine glands. Radiation can cause blood to clot or break down, damage the eyes, skin, cause genetic changes, headaches, sleep disorders, weakness, etc.

Key words: *laser weapons, laser radiation, optical-electronic devices, radiation parameters, organs of vision.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

УДК 621.396

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/06>

Бараннік В.В.

Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна

Шульгін С.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Онищенко Р.С.

Харківський національний університет радіоелектроніки

Ігнат'єв О.О.

Харківський національний університет радіоелектроніки

МЕТОДОЛОГІЯ КОДУВАННЯ ТРАНСФОРМОВАНИХ ВІДЕОСЕГМЕНТІВ В УСІЧЕНО-ПОЗИЦІЙНОМУ ПРОСТОРІ

У статті досліджується стан розвитку сучасних інформаційних технологій. Обґрунтовується їх вплив на створення та реалізацію нових прикладних концепцій. Водночас практичне використання наведених концепцій виявила ряд проблемних аспектів. Показано, що вони перш за все стосуються потреби у обробці, аналізі та передачі надзвичайно великих масивів даних. Значну часту таких даних складають відеоінформаційні ресурси. Отже стверджується актуальність науково-прикладної проблеми. Вона стосується зменшення об'єму бітового опису відеоінформаційних ресурсів під час функціонування інтелектуально-інформаційних систем. В статті визначається ключовий напрямок вирішення проблеми. Він полягає у необхідності використання технологічних рішень щодо зменшення бітових об'ємів відеоданих. Показано, що найбільш ефективні з них базуються на використанні методів кодування в спектральному просторі. Досягається потенціал відносно скорочення надмірності. Це реалізується за допомогою використання технологій кодування. Однак найбільший рівень зменшення бітового об'єму досягається у разі скорочення кількості різних видів психовізуальної надмірності. Звідси виникають випадки наявності втрат інформації. Показано, що виключення недоліків стандартизованих платформ можливо у разі збільшення потужності технологічних процесів скорочення структурних видів надмірності. Одним з напрямків тут є встановлення структурних закономірностей за діагональним форматом трансформанти. Отже існує потреба у розробці методології кодування трансформованих відеосегментів за нерівномірно-діагональним форматом. Створюється теоретична база для побудови технології кодування трансформанти за нерівномірним діагональним форматом зі зваженням її комбінаторної конфігурації. В основі чого полягає система перетворень. Вона окреслюється, як двошарове стискаюче кодування трансформант в нерівномірно-діагональному спектральному просторі. Викладаються основні етапи розробки системи співвідношень для визначення інформативно-позиційної ваги усічено-позиційного числа.

Ключові слова: телекомунікаційні системи, кодування, відеозображення, надмірність, трансформанта, позиційні числа.

Постановка проблеми. Розвиток інформаційних технологій визначає стан економічного розвитку держави, її оборонний потенціал, рівень забезпечення національної безпеки та загальний розвиток суспільства [1]. Останнім часом з'являються проривні технологічні рішення щодо роботи технічних систем, інформаційних продук-

тив з використанням штучного інтелекту, технологій збільшення продуктивності обчислювальних систем (квантові технології) [2].

Це створює підґрунтя для створення й реалізації нових прикладних концепцій. Прикладами тут є концепції «Smart city», безпілотний транспорт наземного та повітряного базування. Такі концеп-

ції вимагають використання сучасних наукоємних технологій [3]. Водночас практичне використання наведених концептів виявила ряд проблемних аспектів. Вони перш за все стосуються потреби у обробці, аналізі та передачі надзвичайно великих масивів даних [4]. Значну часту таких даних складають відеоінформаційні ресурсу [5]. Отже актуальним є вирішення **науково-прикладної проблеми** стосовно зменшення об'ємів бітового опису відеоінформаційних ресурсів під час функціонування інтелектуально-інформаційних систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ключовими технологічними рішеннями, які дозволяють зменшити бітові об'єми відеоданих, є стандартизовані платформи компресійного кодування [6]. Найбільш ефективні з них базуються на використанні методів кодування в спектральному просторі [7]. Для цього початкові відеосегменти трансформуються за допомогою різних видів ортогональних [8] та вейвлет перетворень [9]. В результаті створюється можливість для виявлення множини закономірностей між компонентами трансформованого представлення відеосегментів. Досягнення потенціалу відносно скорочення надмірності реалізується за допомогою використання технологій кодування. В загальному випадку під кодуванням розуміється система S_{proc} функціональних перетворень. Вони дозволяють перетворити початкову послідовність $Y(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$ в кодову $C(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)}$. Однак найбільший рівень зменшення бітового об'єму досягається у разі скорочення кількості різних видів психовізуальної надмірності. Звідси виникають випадки наявності втрат інформації [10].

Постановка завдання. Виключення недоліків стандартизованих платформ можливо у разі збільшення потужності технологічних процесів скорочення структурних видів надмірності. Одним з напрямків тут є встановлення структурних закономірностей за діагональним форматом трансформанти [10]. Отже **мета статті** полягає у розробці методології кодування трансформованих відеосегментів за нерівномірно-діагональним форматом

Створення підходу для кодування нерівномірно-діагональних послідовностей в неоднорідному двовимірному спектральному просторі.

Пропонується систему функціональних перетворень між початковою послідовністю $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$ та вихідною кодограмою $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ будувати за двошаровою концепцією. Тут формується дві множини $\Omega(E)$ та відповідних ним два алфавіти с потужністю $P_{\tau, cod}^{(\ell, \xi)}$. Отже маємо наступні математичні перетворення:

1) послідовності $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$ з компонентами $y_\lambda^{(\ell, \xi)} \in \Omega(Y)$ до відповідності ставиться сукупність $S(E)_\tau^{(\ell, \xi)}: S(E)_\tau^{(\ell, \xi)} = \{E_{\tau, 1}^{(\ell, \xi)}; \dots; E_{\tau, \psi}^{(\ell, \xi)}; \dots; E_{\tau, \Psi}^{(\ell, \xi)}\}$ з компонентами $E_{\tau, \psi}^{(\ell, \xi)} \in \Omega(E)$;

2) сукупності $S(E)_\tau^{(\ell, \xi)}$ ставить до відповідності послідовність $C'(\alpha, \beta)_\tau^{(\ell, \xi)} = \{c'_1; \dots; c'_D\}$, тобто: $C_\tau^{(\ell, \xi)} = F_{encod}^{(2)}(S(E)_\tau^{(\ell, \xi)}; \Omega_{par}; \Omega_{pat})$, де $F_{encod}^{(2)}(S(E)_\tau^{(\ell, \xi)})$ – функціональне перетворення другого шару формування вихідної послідовності $C_\tau^{(\ell, \xi)}$; Ω_{par} – множина параметрів процесів F_{encod} прямого та F_{decod} зворотного перетворень; Ω_{pat} – множина закономірностей, які встановлюються для послідовностей $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$.

Тоді маємо загальне функціональне перетворення F_{encod} :

$$F_{encod} : C_\tau^{(\ell, \xi)} = F_{encod}^{(2)}(F_{encod}^{(1)}(Y_\tau^{(\ell, \xi)}); \Omega_{par}; \Omega_{pat}).$$

При цьому таке перетворення повинне мати наступні властивості:

1) бути взаємно однозначним, тобто має існувати зворотне перетворення F_{decod} , за допомогою якого для сукупності $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ реконструюється початкова послідовність $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$;

2) потужність $P_{\tau, cod}^{(\ell, \xi)}$ множини $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ має бути меншою за потужність $P_\tau^{(\ell, \xi)}$ компонент $y_\lambda^{(\ell, \xi)}$ послідовності $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$, тобто $P_{\tau, cod}^{(\ell, \xi)} < P_\tau^{(\ell, \xi)}$;

3) бітовий об'єм D вихідної послідовності $C_\tau^{(\ell, \xi)}$ не повинен перевищувати бітовий об'єм $D_\tau^{(\ell, \xi)}$ початкової послідовності $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$.

Розглянемо створення наукоємних основ кодування нерівномірно-діагональних послідовностей в неоднорідному спектральному просторі. Для цього необхідно визначитись з аспектами, що формують теоретичне підґрунтя створення процесу кодування даних. Найбільш ключовими серед них є наступні:

1. Типи надмірності, кількість якої потрібно скоротити з врахуванням відповідних особливостей вхідних послідовностей.

2. Структурно-топологічні характеристики сукупностей даних, які обираються в якості простіших об'єктів кодування.

3. Стратегія реалізації процесу кодування та формування кодових конструкцій синтаксичного опису формату компактного представлення початкових сукупностей даних.

Перший аспект. Враховуючи комбінаторну конфігурацію трансформанти в процесі скорочення надмірності потрібно зважати на такі їх характерні особливості: обмеженість діапазону зміни значень спектральних компонент діагоналі; наявність схильності значень спектральних компонент до утворення субмонотонних послідовностей за діагональним напрямком; присутність

додаткової умови щодо нерівності суміжних компонент діагоналі трансформанти;

Другий аспект. В якості *опорного об'єкту* кодування *пропонується* використовувати нерівномірні діагоналі $Y(\alpha, \beta)_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ в двовимірному спектральному просторі трансформанти. Це враховує діагональну структурованість комбінаторної конфігурації трансформанти. Відповідно створюються умови для зменшення діапазонів зміни значень компонент у разі їх визначення в межах окремих діагоналей.

Третій аспект. Найбільший потенціал відносно усунення надмірності в діагональних послідовностях досягається у разі врахування векторних залежностей. Тобто потрібно зважувати інформативність, яка присутня для всієї діагональної послідовності. Звідси для обробки нерівномірних діагональних послідовностей $Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ трансформанти потрібно застосовувати теоретичну базу блокового кодування. Відповідно побудову функціонального перетворення F_{encod} *пропонується* здійснювати в класі позиційних систем кодування.

Водночас позиційні числа не дозволяють врахувати в процесі кодування другу та третю властивості діагональних послідовностей трансформанти. Звідси необхідно здійснити подальший розвиток теорії позиційних систем в напрямку адаптування до властивостей нерівномірних діагоналей в двовимірному спектральному просторі трансформанти. Для цього *пропонується* в процесі побудови позиційних чисел додатково враховувати умову нерівності між значеннями $y_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$, $y_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ сусідніх компонент діагоналі $Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, $y_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq y_{\chi}^{(\ell, \xi)}$. При цьому можна стверджувати, що врахування такої умови приводить до усічення (зменшення) допустимої кількості позиційних чисел. В подальшому позиційні числа з врахуванням умови щодо їх нерівності будемо називати як *усічено-позиційні числа*.

Побудова двошарової концепції функціональних перетворень в процесі формування синтаксичного бітового опису діагоналей трансформанти.

В той же час кодове значення $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ діагоналі $Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ ще не є синтаксичним описом її компактного бітового представлення. Отже не вирішене питання щодо визначення кількості біт на синтаксичний двійковий опис величини $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Звідси можна заключити наступне:

1. Формування кодових значень $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ для діагональних послідовностей трансформанти є лише першим шаром загальних функціональних пере-

творень. Перетворення $F_{encod}^{(1)}(Y_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ першого шару має наступний вигляд:

$$E_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{encod}^{(1)}(Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}; w(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; w'(\tau)^{(\ell, \xi)}; n_{\xi}; \Omega_{pat}). \quad (1)$$

2. Для остаточного формування синтаксичного опису компактного бітового представлення діагоналі потрібно застосовувати другий шар функціональних перетворень. Тут початковою послідовністю буде послідовність кодових значень $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ діагоналей трансформанти. Функціональне перетворення $F_{encod}^{(2)}$ другого шару повинне забезпечувати взаємно однозначне формування для кодових значень $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ відповідної кодограми $C_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Ця кодограма представляє собою двійкову кодову послідовність $C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = \{c'_1; \dots; c'_{D_{\xi}}\}$. В загальному варіанті таке перетворення описується наступним чином:

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{encod}^{(2)}(E_{\tau}^{(\ell, \xi)}; w(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; w'(\tau)^{(\ell, \xi)}; n_{\xi}; \Omega_{pat}). \quad (2)$$

Пропонується двошарове функціональне перетворення F_{encod} :

$$C_{\tau}^{(\ell, \xi)} = F_{encod}^{(2)}(F_{encod}^{(1)}(Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}); w(\tau)_1^{(\ell, \xi)}; w'(\tau)^{(\ell, \xi)}; n_{\xi}; \Omega_{pat}), \quad (3)$$

будувати з використанням стратегії кодування за наступними класифікаційними ознаками:

- 1) двошарове мультізначно-двійкове перетворення алфавітів;
- 2) двошарове блоково-поелементний принцип формування кодових послідовностей;
- 3) принцип кодо-утворення кодограм синтаксичного опису відповідає варіанту «нерівномірна – нерівномірна».

Створення теоретичної бази щодо визначення інформативно-позиційної ваги для усічено-позиційної кодової системи.

Синтез функціонального перетворення $F_{encod}^{(1)}(Y_{\tau}^{(\ell, \xi)})$ першого шару будемо здійснювати з врахуванням властивостей усічено-позиційних чисел. Вони стосуються наступного:

- 1) вага $V(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ для χ -ї компоненти ξ -ї діагоналі не залежить від ваги $V(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ її попередньої $(\chi - 1)$ -ї компоненти;
- 2) значення вагових коефіцієнтів $V(\tau)_{\chi}^{(\ell, \xi)}$ елементів усічено-позиційних чисел має рівномірний зріст.

Кодове значення $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ для нерівномірної діагоналі $Y_{\tau}^{(\ell, \xi)}$, як усічено-позиційного числа є індексом, що визначає його позицію в допустимій множині $\Omega_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Звідси величина $E_{\tau}^{(\ell, \xi)}$ знаходиться за допомогою сумування нерівномірно-вагових складових $\Delta_{\chi} V_{\tau}^{(\ell, \xi)}$. Такі складові визначаються, як кількість допустимих усічено-позиційних чисел, що передують поточному УП-числу. Тому подалі нерівномірно-вагові складові кодового значення УПЧ будемо визначати, як *інформативно-пози-*

ційна вага $\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)}$. Отже маємо такий вираз, що визначає величину $E_\tau^{(\ell, \xi)}$: $E_\tau^{(\ell, \xi)} = \sum_{\chi} \Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)}$. Значення нерівномірно-вагової складової $\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)}$ кодового значення усічено-позиційного числа $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$ в умовах виконання наступних обмежень щодо їх значень:

$$y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \leq w(\tau)_1^{(\ell, \xi)} - 1; y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} \neq y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \quad (4)$$

знаходиться за допомогою такого співвідношення:

$$\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)} = y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} \cdot (w'(\tau)^{(\ell, \xi)})^{n_\xi - \chi} - (w'(\tau)^{(\ell, \xi)})^{n_\xi - \chi} \cdot \text{sign}(1 + \text{sign}(y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})), \quad (5)$$

де $w(\tau)_1^{(\ell, \xi)}$ – діапазон зміни значень спектральних компонент ξ -ї діагоналі $Y_\tau^{(\ell, \xi)}$ без врахування умови (4).

Вираз (5) для величини $\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)}$ через значення вагових коефіцієнтів $V(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ елементів $y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ УПЧ матиме наступного вигляду: $\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)} = (y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - \text{sign}(1 + \text{sign}(y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}))) \times V(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$.

Це встановлює взаємозв'язок між інформативно-позиційною вагою, як нерівномірно-вагової складової кодового значення $E_\tau^{(\ell, \xi)}$, та значенням вагового коефіцієнту відповідного елемента усічено-позиційного числа.

Подальше спрощення виразу щодо визначення нерівномірної вагової складової кодового значення стосується позначення співвідношення:

$$(y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - \text{sign}(1 + \text{sign}(y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})))$$

через використання функціоналу $\text{trunc}(y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})$. А саме:

$$\text{trunc}(y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) = \text{sign}(1 + \text{sign}(y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)})).$$

Даний функціонал в залежності від співвідношення між компонентами $y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}$ та $y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$ приймає наступні значення:

$$\text{trunc}(y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}) = \begin{cases} 0, & \rightarrow y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} > y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}; \\ 1, & \rightarrow y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)} < y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}. \end{cases}$$

Тоді маємо:

$$\Delta_\chi V_\tau^{(\ell, \xi)} = (y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)} - \text{trunc}(y(\tau)_{\chi-1}^{(\ell, \xi)}; y(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)})) V(\tau)_\chi^{(\ell, \xi)}$$

Отже розроблено система співвідношень для визначення інформативно-позиційної ваги усічено-позиційного числа. Вона визначається, як кількість допустимих послідовностей, які передують відповідній підпослідовності діагоналі та задовольняють обмеженням згідно особливостей комбінаторної конфігурації трансформанти в двовимірному нерівномірно-діагональному форматі.

Висновки.

1. Створена теоретична база для побудови технології кодування трансформанти за нерівномірним діагональним форматом зі зважанням її комбінаторної конфігурації.

2. Розроблено система співвідношень для визначення інформативно-позиційної ваги усічено-позиційного числа.

Наукова новизна. Вперше створено система співвідношень для визначення інформативно-позиційної ваги компонент діагональної послідовності трансформанти на основі врахування комбінаторних конфігурацій. Основні відмінності стосуються наступного. Кількість допустимих послідовностей визначається в усічено-позиційній кодовій системі з обліком: комбінаторної конфігурації трансформанти в нерівномірно-діагональному форматі двовимірно-спектрального простору; пірамідальної системи позиціонування діагоналей та їх компонент в трансформанті з прив'язкою до рівномірної системи координат. Це дозволяє створити умови для скорочення кількості видів надмірності, які зумовлені структурно-комбінаторними особливостями змісту відеосегменту.

Список літератури:

1. Kobayashi, H. and Kiya, H.: Bitstream-Based JPEG Image Encryption with File-Size Preserving. In.: IEEE 7th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE), pp. 1-4 (2018) DOI: 10.1109/gcce.2018.8574605.
2. Belikova T. Decoding Method of Information-Psychological Destructions in the Phonetic Space of Information Resources. Advanced Trends in Information Theory (ATIT): proceedings of the 2nd IEEE International Conference, 2020. P. 87–91. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9349300>.
3. JPEG image scrambling without expansion in bitstream size [Text] / K. Minemura, Z. Moayed, K. Wong, X. Qi, K. Tanaka // 19th IEEE International Conference on Image Processing. – 2012. – P. 261–264. DOI: 10.1109/ICIP.2012.6466845.
4. Kurihara K., Watanabe O., Kiya H. An encryption-then-compression system for JPEG XR standard. Broadband Multimedia Systems and Broadcasting (BMSB): proceedings of the IEEE International Symposium, 2016. P. 1–5. DOI: 10.1109/BMSB.2016.7521997.
5. Zhou J., Liu X., Au O. C., Tang Y. Y. Designing an Efficient Image Encryption-Then-Compression System via Prediction Error Clustering and Random Permutation. IEEE Transactions on Information Forensics and Security. 2014. Vol. 9, No. 1. P. 39–50. DOI: 10.1109/TIFS.2013.2291625.

6. Information technology – JPEG 2000 image coding system: Secure JPEG 2000 [Text]. – International Standard ISO/IEC 15444-8, ITU-T Recommendation T.807, 2007. 108 p.
7. Wong K. W. Image encryption using chaotic maps. *Intelligent Computing Based on Chaos*. 2009. Vol. 184. P. 333–354. DOI: 10.1007/978-3-540-95972-4_16.
8. Barannik V., Shulgin S., Krasnorutsky A. Methodological Fundamentals of Deciphering Coding of Aerophotography Segments on Special Equipment of Unmanned Complex. *IEEE Advanced Trends in Information Theory (IEEE ATIT 2020): proceedings IEEE 2nd International Conference*. 2020. P. 38–43. DOI: 10.1109/ATIT50783.2020.9349257.
9. Barannik V.V., Karpenko S. Method of the 3-D image processing. *Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Computer Science (IEEE TCSET 2008): proceedings of IEEE International Conference*, 2008. P. 378–380.
10. V. Barannik, S. Shulgin, V. Himenko, Method of Encoding Video Frames in Infocommunication Systems. *IEEE 16th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET 2022)*, 2022, pp. 521–524, doi: 10.1109/TCSET55632.2022.9767028.

Barannik V.V., Shulgin S.S., Onyshchenko R.S., Ignatyev O.O. CODING METHODOLOGY FOR TRANSFORMED VIDEO SEGMENTS IN TRUNCATED-POSITIONAL SPACE

The article explores the state of development of modern information technologies. Their influence on the creation and implementation of new applied concepts is substantiated. At the same time, the practical use of these concepts revealed a number of problematic aspects. It is shown that they primarily concern the need for processing, analyzing and transmitting extremely large amounts of data. A significant part of such data is made up of video information resources. So, the relevance of the scientific and applied problem is asserted. It concerns the reduction of the volume of bit description of video information resources during the functioning of intellectual information systems. The article defines the key direction of solving the problem. It consists in the need to use technological solutions to reduce bit volumes of video data. It is shown that the most effective of them are based on the use of encoding methods in spectral space. The potential for reducing redundancy is achieved. This is implemented through the use of coding technologies. However, the highest level of bit volume reduction is achieved in the case of a reduction in the number of different types of psychovisual redundancy. From here there are cases of loss of information. It is shown that the elimination of the shortcomings of standardized platforms is possible in the case of an increase in the power of technological processes to reduce the structural types of redundancy. One of the directions here is the establishment of structural patterns according to the diagonal format of the transformer. Therefore, there is a need to develop a methodology for encoding transformed video segments using an unevenly diagonal format. A theoretical basis is being created for building the technology of encoding transformants in an uneven diagonal format, taking into account its combinatorial configuration. It is based on a system of transformations. It is defined as a two-layer compressive encoding transformer in an uneven-diagonal spectral space. The main stages of the development of a system of ratios for determining the informative-positional weight of the truncated-positional number are outlined.

Key words: telecommunication systems, coding, video images, redundancy, transformer, positional numbers.

УДК 621.396.946 : 004.042

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/07>**Лисенко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Тачиніна О.М.**

Національний авіаційний університет

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

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Фуртат С.О.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

МЕТОД АЛГОРИТМІЧНОЇ МОДЕРНІЗАЦІЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ПРИВОДОМ СТЕНДУ НАПІВНАТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ МІНІДРОНУ

Стаття присвячена викладу результатів математичного моделювання руху вузла цілі, який імітує мінідрон і закріплений на каретці стенду напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи. Показано, що математичне моделювання дозволило передбачити можливість виникнення автоколивань при моделюванні захисних маневрів мінідронів і підтвердити ефективність алгоритмічного способу модернізації стенду.

Результати комп'ютерного моделювання роботи стенду показують, що при напівнатурному моделюванні як детермінованого так і стохастичного руху мінідрона можливе виникнення автоколивань і нестійкого режиму роботи гіпотетичного типового двовісного напівнатурного стенду. Ці автоколивання не виникали раніше при моделюванні руху інерційних об'єктів, оскільки перехресні зв'язки між каналами при напівнатурному моделюванні з малими прискореннями не були істотними. Результати моделювання показали існування науково-технічної проблеми, яка виникає при спробі використати наявні напівнатурні стенди для моделювання руху маневрених цілей. Для вирішення науково-технічної проблеми запропоновано виконати алгоритмічне доопрацювання стежучої системи управління приводом.

Запропонований в статті комплексний алгоритм роботи стежачих приводів складається з двох алгоритмів: алгоритму цифрового модального регулятора і алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора. Перший алгоритм коригує динамічні властивості електричного двигуна, а другою забезпечує квазіадаптивність управління по відношенню до обурюючої дії перехресних зв'язків.

Стенди напівнатурного моделювання, модернізовані викладеним в статті алгоритмічним способом, можуть бути використані для випробувань вузлів стеження за окремими мінідронами або кластерами мінідронів (розподіленими дронами). Ці вузли стеження можуть знайти застосування в інформаційно-керуючих системах, з людиною оператором або штучним інтелектом-оператором (ШІО) в контурі дистанційного керування засобами інспекції і знищення цілей охоронної інформаційно-керуючої системи.

Напрямою подальших досліджень слід вважати побудову математичної моделі руху вузла цілі, який буде встановлений на каретку тривісного стенду напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи.

Ключові слова: математичне моделювання руху, вузол цілі, стенд напівнатурного випробування, сенсорна мережа, літальні роботи, дрони, охоронна інформаційно-керуюча система.

Постановка проблеми. Нині наявність протидронної оборони є однією з найважливіших умов вирішення проблеми забезпечення безпеки (стійкого функціонування) об'єктів критичної інфраструктури держави [1]. Особливо актуаль-

ним є завдання захисту від несанкціонованого проникнення на територію зони окремих мінідронів, що охороняється, їх груп і «москітного» нальоту мінідронів. Одним із способів вирішення цієї задачі є використання охоронної інформа-

ційно – керуючої системи (ОІКС). Первинна інформація про ціль в таких системах поступає від стаціонарних, мобільних або квазімобільних сенсорних мереж. Ця інформація використовується в ОІКС для подальшої ідентифікації, інспекції, локалізації(перехоплення) і якщо знадобиться знищення мінідрона (наприклад, вузьконаправленим електромагнітним імпульсом) [2]. Критично важливими елементами сенсорних мереж ОІКС є сенсори цілі(СЦ). Саме від ефективності роботи СЦ залежить якість інформації, яка використовується для ухвалення рішення в ОІКС. СЦ можуть працювати на одному фізичному принципі (однорідні СЦ) або різних(мультисенсори цілі або різнорідні СЦ). Найважливішим елементом СЦ є вузол стеження за ціллю(ВСЦ). На етапі перевірки правильності прийнятих конструктивних рішень СЦ разом з ВСЦ направляють на напівнатурні випробування.

Для випробувань використовуються стенди напівнатурного моделювання плоского(двовимірного) або просторового(тривимірного) руху цілі. Маневри цілі моделюються рухом вузла цілі стенду (імітатором руху цілі – Target Motion Simulators(TMS)) за допомогою стежачих приводів, які діють уздовж двох або трьох взаємно перпендикулярних осей. Випробовуваний сенсор розміщують в спеціальному опорно-поворотному пристосуванні, яке просторово розташовується по відношенню до вузла цілі з урахуванням масштабу моделювання. ВСЦ із складу СЦ перевіряють на стійкість захоплення цілі і якість стеження за нею. Нині відповідні спеціалізовані підприємства мають в наявності двох- і трьох-осеві стенди напівнатурного моделювання (см. рис. 1, рис. 2) [3].

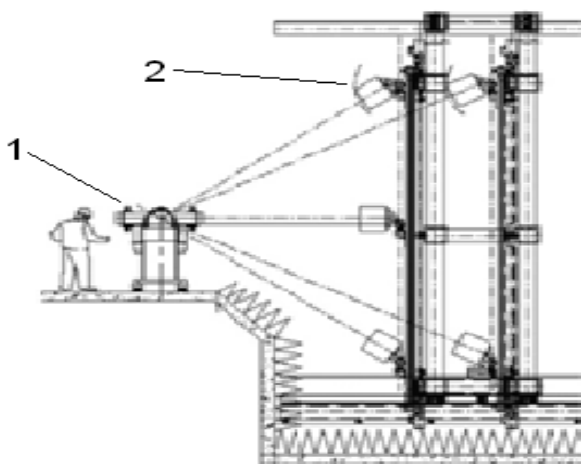


Рис. 1. Приклад гіпотетичного тривісного стенду напівнатурного моделювання:

1 – опорно-поворотне пристосування для установки сенсора цілі; 2 – Target Motion Simulators(TMS); три осі переміщення TMS взаємно перпендикулярні: показано можливі положення TMS по двох взаємно перпендикулярним осям, які лежать в площині малюнка; третя вісь перпендикулярна площині малюнка

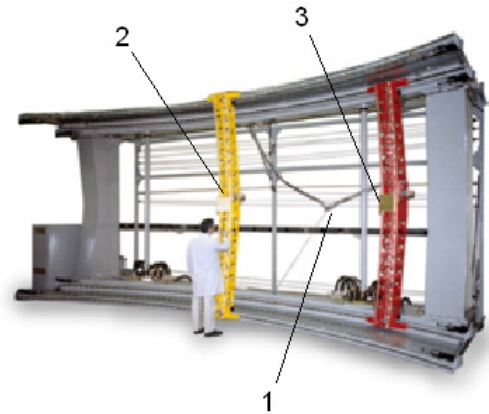


Рис. 2. Приклад суміщення двох двоосних гіпотетичних стендів напівнатурного моделювання на одній опорній рамі:

1 – опорно-поворотне пристосування для установки сенсора цілі; 2 – Target Motion Simulators(TMS) першого двоосного стенда; 3 – Target Motion Simulators(TMS) другого двоосного стенда

Постановка завдання. Існуючі стенди призначені для напівнатурного моделювання руху об'єктів, які менш рухливі в порівнянні з мінідронами. Це означає, що динамікою самих стендів при моделюванні руху мети можна нехтувати. Якщо моделювати рух надманеврених мінідронів за допомогою цих же стендів, то виникають істотні динамічні погрішності. Вирішити завдання моделювання руху мети, якою є маневрений мінідрон, можна двома способами. Перший – це створення спеціалізованих стендів з поліпшеними динамічними характеристиками і другий – це алгоритмічна модернізація існуючих стендів, що є більш економічним. Викладенню методу алгоритмічної модернізації існуючих двоосних стендів напівнатурного моделювання і присвячена ця стаття.

Вирішення проблеми. Розглядається двоосний стенд напівнатурного моделювання руху цілі. Приводи стенду дозволяють переміщати каретку із закріпленим на ній вузлом цілі. Переміщення каретки(вузла цілі) імітує маневри цілі по відношенню до сенсора мети ОІКС, який відстежує цей рух. Спеціально закріплене на каретці устаткування імітує розпізнавальні ознаки цілі(наприклад, що демаскує акустичне або теплове випромінювання, або відбиваючі властивості мінідрона при його опроміненні електромагнітним випромінюванням в радіочастотному діапазоні або в діапазоні світлових хвиль при опроміненні лазерним локатором). Припускаємо самий простий варіант закріплення сенсора цілі ОІКС – сенсор закріплений нерухомо. На певній відстані від сенсора цілі ОІКС, з урахуванням масштабу і ракурсу моделювання, розташовується площина спостереження руху цілі. Положення цієї площини задається осями руху вузла цілі напівнатурного стенду.

Вузлу цілі задають типові рухи мінідрона і експериментально перевіряють ефективність функціонування облаштування стеження за ціллю, яке входить до складу сенсора цілі ОІКС.

Вузол цілі стенду напівнатурного моделювання повинен адекватно реальності моделювати рух мінідрона відносно сенсора цілі ОІКС. Стенд напівнатурного моделювання не повинен вносити істотні помилки у вид траєкторії мінідрона і темп руху по ній. Це означає, що динамічні властивості стежачих приводів вузла цілі не повинні істотно впливати на типовий характер руху, який моделюється. Якщо цілі інерційна, то динамічними властивостями тих, що стежать приводів вузла цілі можна нехтувати. Проте сучасні мінідрони мають малу масу і головні моменти інерції і потужну енергетику. Це дозволяє їм виконувати швидкі і складні маневри. Такі маневри були недоступні для тих типів цілей, для яких проектувалися існуючі стенди напівнатурного моделювання. Перевіримо на комп'ютерній математичній моделі руху вузла цілі можливості існуючих двоосних стендів напівнатурного моделювання по адекватному відтворенню захисних маневрів мінідронів.

Усі розрахунки і побудову комп'ютерних математичних моделей виконано з використанням системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink.

Комп'ютерна математична модель типової динаміки руху мінідрона відносно сенсора цілі уздовж осей OX і OY площини спостереження руху цілі задається відповідно блоками Transfer Fon2 і Transfer Fon6 (див. рис.3) [4 – 7]. Осі OX і OY розташовані в площині спостереження руху цілі : вісь OY – це лінія перпендикулярна площині горизонту і що проходить через вузол цілі, а вісь OX – це лінія, що проходить через вузол цілі і паралельна лінії перетину площини спостереження руху цілі з площиною горизонту. На графічних пристроях XYGraph1 і XYGraph2 можна спостерігати відповідно траєкторії еталонного руху мінідрона і результат моделювання того руху за допомогою типового гіпотетичного двоосного стенду напівнатурного моделювання із стежачими приводами постійного струму. Еталонний рух мінідрона – цей тестовий рух, з використанням якого перевірятимуться (випробовується, тестується) сенсор цілі. Математична модель приводів, які діють уздовж осей OX і OY , приймається однаковою і задана на схемі моделювання (рис.1) блоками State Spase1 і State Spase2 (параметри моделі приведені на схемі).

Виконаємо моделювання руху мінідрона в площині спостереження руху цілі. Припускаємо, що уздовж кожної осі рухливості гіпотетичного стенду напівнатурного моделювання діє стежачий цифровий привід з цифровим пропорційно-інтегрально-диференціальним регулятором. Коефіцієнти передачі пропорційного, інтегрального і диференціального сигналів цифрового регулятора, який використовувався при моделюванні

роботи стенду-прототипу, були прийняті однаково для обох каналів і дорівнювали відповідно до 1, 0.08 і 1.47 (параметри цифрового пропорційно-інтегрально-диференціального розраховувалися за методикою Зиглера-Николса [4]).

Розглядалися три види еталонного руху мінідрона: «овал»; «фігура Лісажу»; «випадкове блукання» [4-7]. Результат моделювання цих еталонних рухів представлений на рис. 4 (а, в), рис. 5 (а, в), рис. 6 (а, в). Розмірність по осях OX і OY відповідає метрам.

Результати комп'ютерного моделювання показують, що при напівнатурному моделюванні як детермінованого, так і стохастичного рухів мінідрона можливе виникнення автоколивань і нестійкого режиму роботи гіпотетичного типового двоосного напівнатурного стенду. Ці автоколивання не виникали раніше при моделюванні руху інерційних об'єктів, оскільки перехресні зв'язки між каналами при напівнатурному моделюванні з малими прискореннями не були істотними. Результати моделювання показали існування науково-технічної проблеми, яка виникає при спробі використати наявні напівнатурні стенди для моделювання такого руху, на який ці стенди не були розраховані. Найбільш простий спосіб вирішення науково-технічної проблеми – це виконати алгоритмічне доопрацювання системи управління приводів. Покажемо, як це можливо зробити.

Для усунення автоколивань вузла цілі, які виникають при моделюванні захисних маневрів мінідронів, виконана алгоритмічна модернізація стежачих приводів, що діють по осях рухливості гіпотетичного напівнатурного стенду. Алгоритмічна модернізація полягала в застосуванні алгоритму модального регулювання для корекції динамічних властивостей стежачих приводів.

Синтез модального регулятора був здійснений за наступною методикою:

1. Ідентифікована безперервна математична модель приводу вузла цілі гіпотетичного типового двоосного напівнатурного стенду у вигляді МІМО ЛТІ – моделі. Ідентифікація виконана з використанням паспортних даних цих двигунів постійного струму [4-7]. За результатами ідентифікації прийнято, що МІМО ЛТІ – моделі приводів по каналах OX і OY практично співпадають і описуються рівняннями в двомірному просторі станів

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= A \cdot X(t) + B \cdot U(t); \\ Y(t) &= C \cdot X(t) + D \cdot U(t), \end{aligned}$$

де $X(t) = [x_1(t); x_2(t)]$, $x_1(t) = i(t)$ – струм в ланцюзі якоря двигуна постійного струму, $x_2(t) = w(t)$ – кутова швидкість обертання якоря; $U(t) = [u_1(t); u_2(t)]$, $u_1(t)$ – сигнал, що управляє, який подається на незалежну обмотку збудження, $u_2(t)$ – сигнал моделює дію перехресного зв'язку між каналами OX і OY ; $A = [-25 \ -7.5; 7.5 \ 0]$, $B = [5 \ 0; 0 \ -5]$, $C = [1 \ 0; 0 \ 1]$, $D = [0 \ 0; 0 \ 0]$.

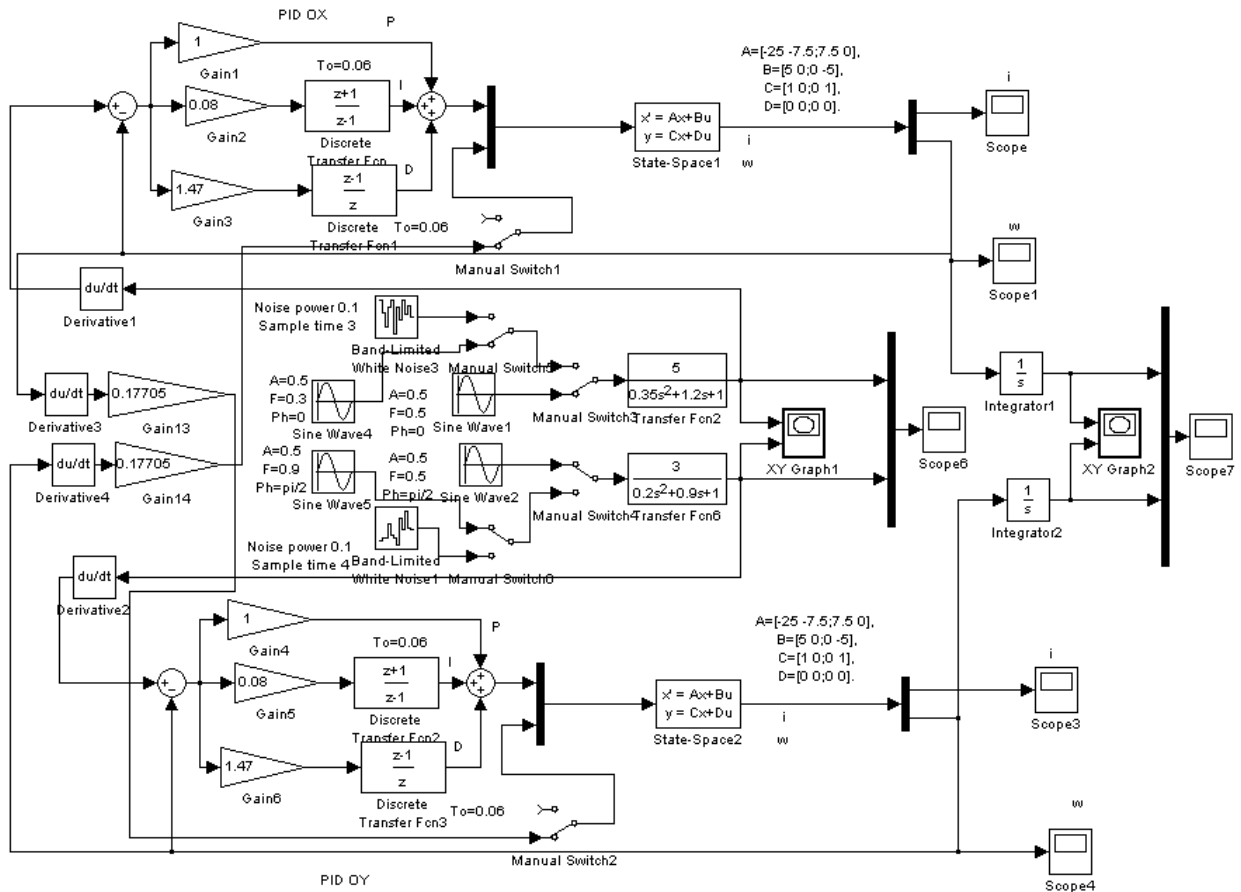


Рис. 3. Комп'ютерна математична модель руху вузла цілі гіпотетичного типового двовісного напівнатурного стенду, який призначений для випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи

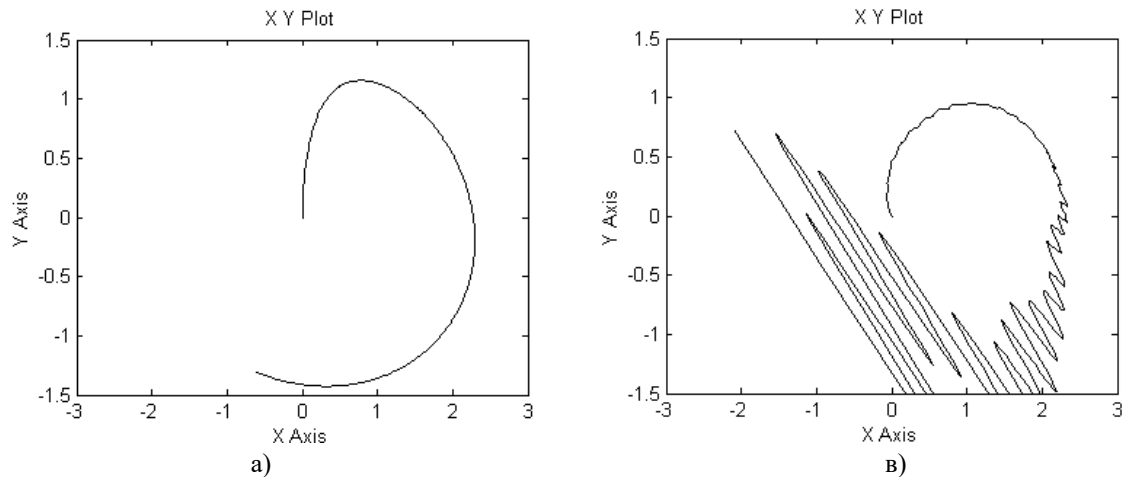


Рис. 4. Графічний образ еталонної траєкторії руху мінідрона «овал» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в): положення перемикачів (рис. 1) P1 і P2 відповідно «вниз» і «вгору»

2. Аналітично обчислені параметри дискретної математичної моделі приводу. Для обчислень були використані функції системи комп'ютерної математики MATLAB+Simulink «ss» і «c2d». При цьому період квантування в часі T_0 був розрахований на

підставі слідуючих міркувань. Прийнято, що на вході аналогово-цифрових перетворювачів, які входять до складу цифрових вимірників струму в ланцюзі якоря і кутової швидкості обертання якоря двигунів постійного струму приводів каналів OX і OY,

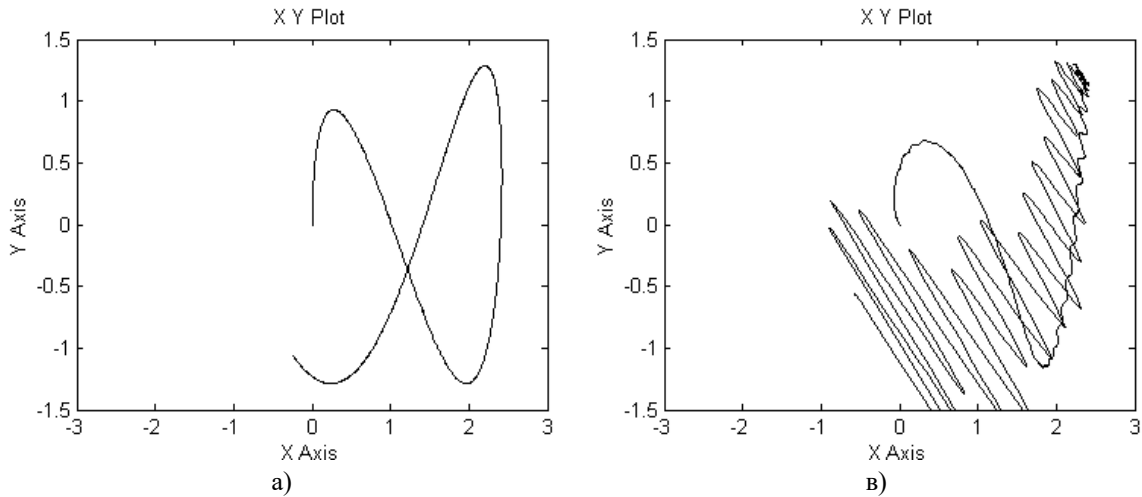


Рис. 5. Графічний образ еталонної траєкторії руху мінідрона «фігура Лісажу» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в) : положення перемикачів (рис. 1) P1 і P2 відповідно «вгору» і «вниз», а P3 і P4 відповідно «вниз» і «вгору»

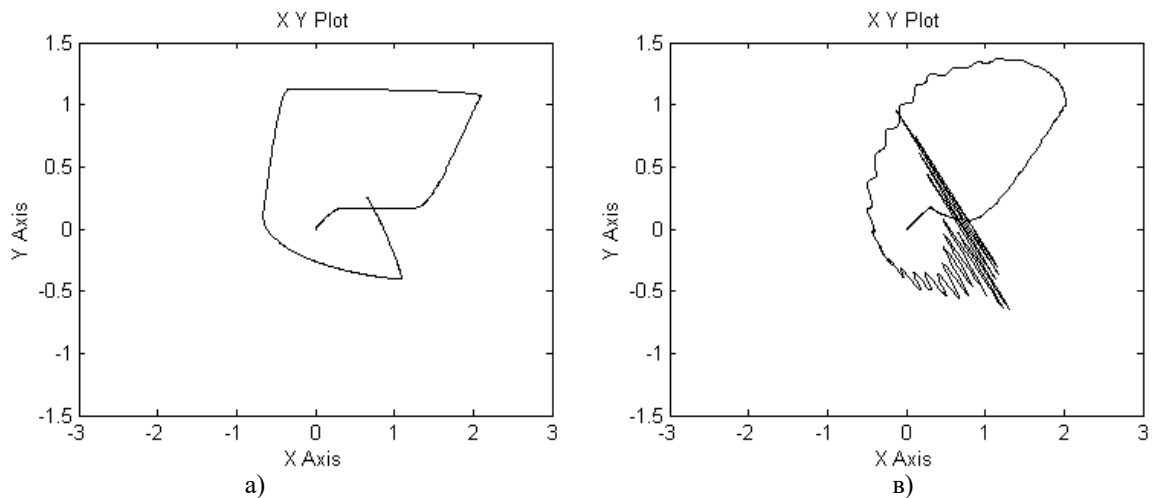


Рис. 6. Графічний образ еталонної траєкторії руху мінідрона «випадкове блукання» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в): положення перемикачів (рис. 1) P1, P3 і P2, P4 відповідно «вгору» і «вниз»

діють фільтри низьких частот. Їх верхня гранична частота співпадає з верхньою граничною частотою корисного сигналу і рівна для типового приводу 51,4 рад/с. По теоремі квантування знайдений період дискретизації за часом $T_0 \leq \pi / 51.4 = 0.0611 \text{ c}$. Було прийнято, що $T_0 = 0.06 \text{ c}$.

Дискретна математична модель приводів каналів ОХ і ОУ має наступний вигляд

$$X(n+1) = A_d \cdot X(n) + B_d \cdot U(n);$$

де $Y(n) = C \cdot X(n) + D \cdot U(n)$,

$$A_d = [0.1841 \quad -0.2256; 0.2256 \quad 0.9359],$$

$$B_d = [0.1504 \quad 0.04274; 0.04274 \quad -0.2928].$$

3. Виконаний розрахунок модального регулятора для корекції динамічних властивостей приводів каналів ОХ і ОУ [4]. Результати розрахунків дають значення матричних коефіцієнтів посилення Тонни, До, $\text{inv}(T \cdot B_d)$ відповідно для:

1) модальних аналізаторів Gain 7, Gain 10
 $T = [-1.1860 \quad -0.3955; -0.3955 \quad -1.1860]$ (рис. 5).

Кожен модальний аналізатор перетворить вихідні сигнали цифрових датчиків відповідно струму якоря двигуна приводу і кутової швидкості цього якоря у віртуальні координати в двовірному просторі;

2) модальних регуляторів Gain 8, Gain 11
 $K = [-0.2407 \quad 0; 0 \quad 0.3607]$ (рис. 5). Кожен модальний регулятор обчислює віртуальний вектор управління.

3) модальних синтезаторів Gain 9, Gain 12
 $\text{inv}(T \cdot B_d) = [-5.7616 \quad 1.1356; -1.9215 \quad 3.4057]$ (рис. 5). Кожен модальний синтезатор обчислює реальний вектор управління.

Після підключення модального регулятора було виконано перенастроювання цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора в стежачій системі приводів каналів ОХ і ОУ за методикою Зіглера-Ніколса.

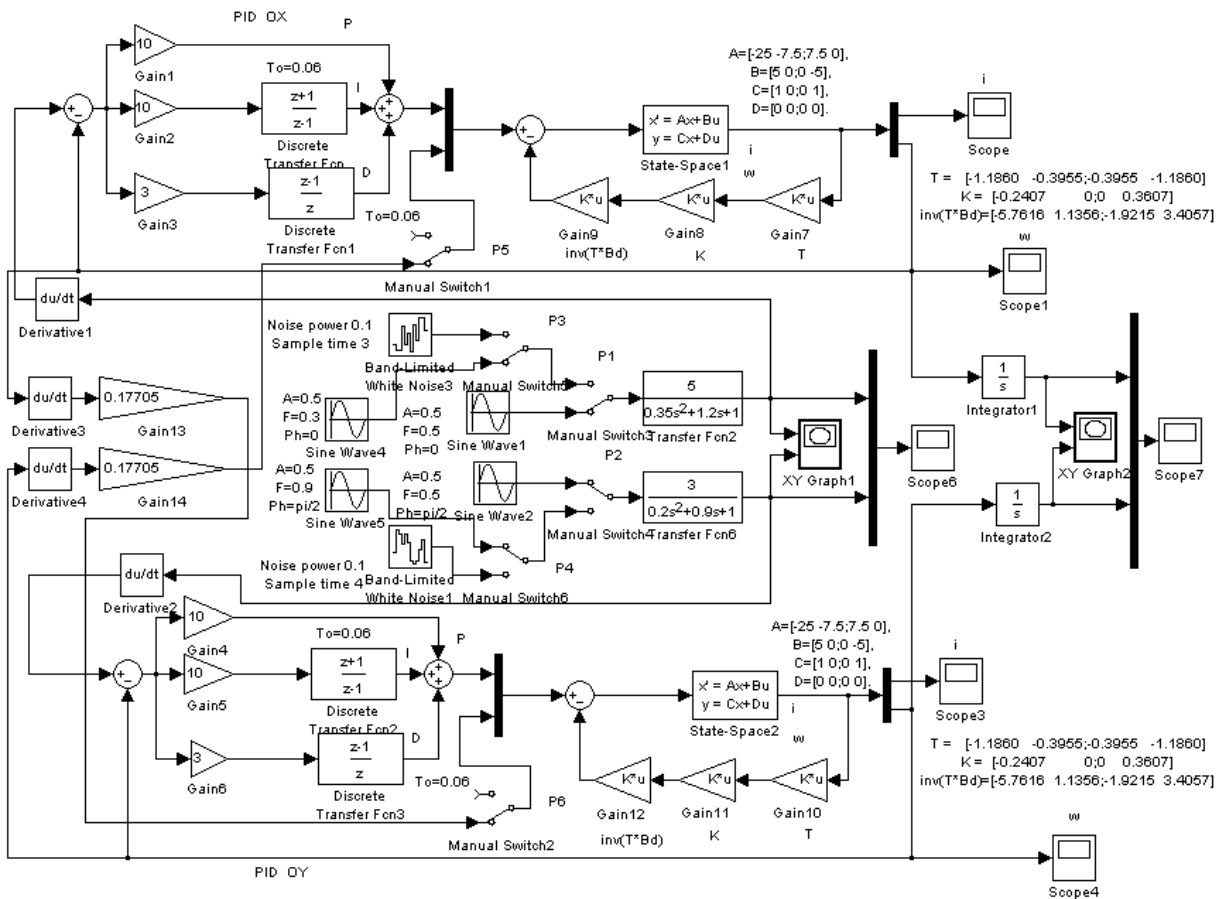


Рис. 7. Комп'ютерна математична модель руху вузла цілі гіпотетичного типового двовісного напівнатурного стенду, який призначений для випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи

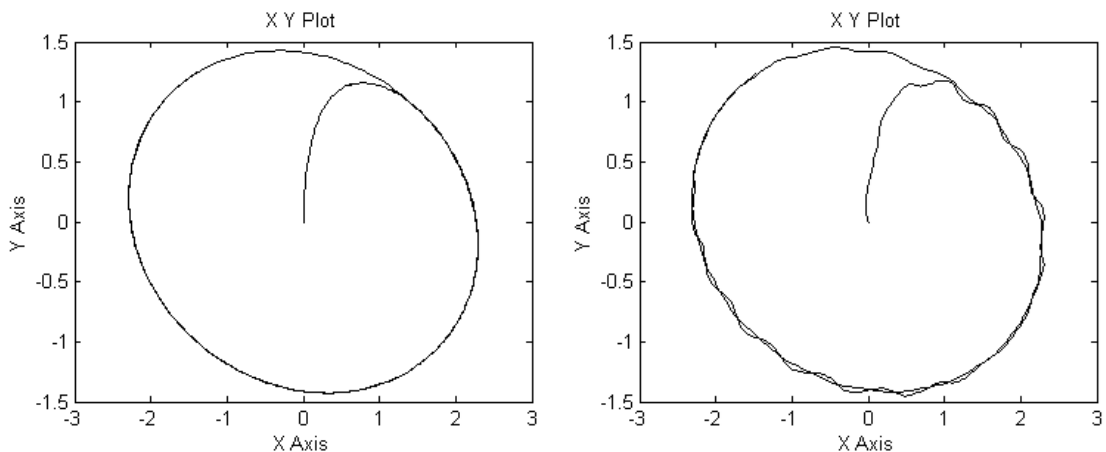


Рис. 8. Графічний образ еталонної траєкторії руху минидрона «овал» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в): положення перемикачів (рис. 1) P1 і P2 відповідно «вниз» і «вгору»

Комп'ютерна математична модель і результати моделювання процесу функціонування модернізованого гіпотетичного типового двовісного напівнатурного стенду представлені відповідно на рис. 7, 8 (а, в), 9 (а, в) і 10 (а, б).

Висновки

1. Математичне моделювання руху вузла цілі, який віртуально наводився в рух гіпотетичним двовісним стендом напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої сис-

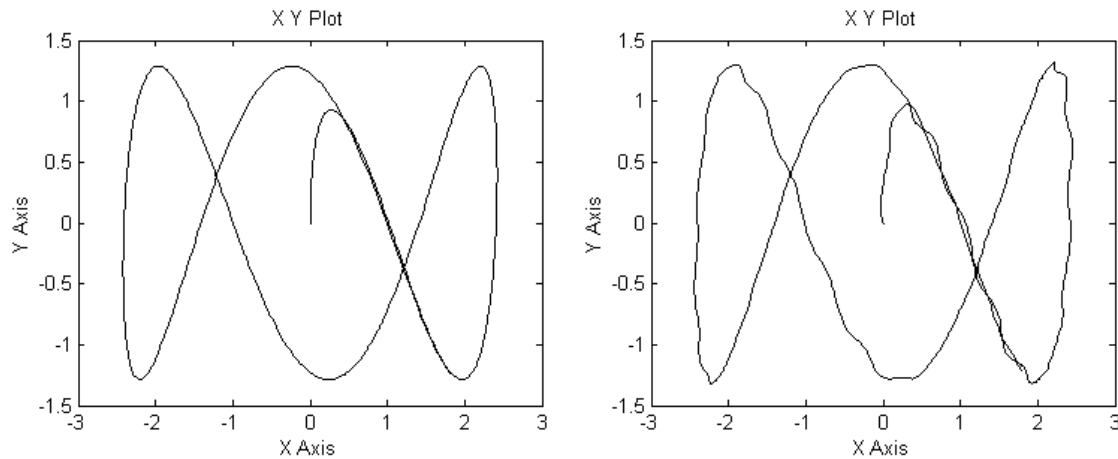


Рис. 9. Графічний образ еталонної траєкторії руху мінідрона «фігура Лісажу» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в): положення перемикачів (рис. 1) P1 і P2 відповідно «вгору» і «вниз», а P3 і P4 відповідно «вниз» і «вгору»

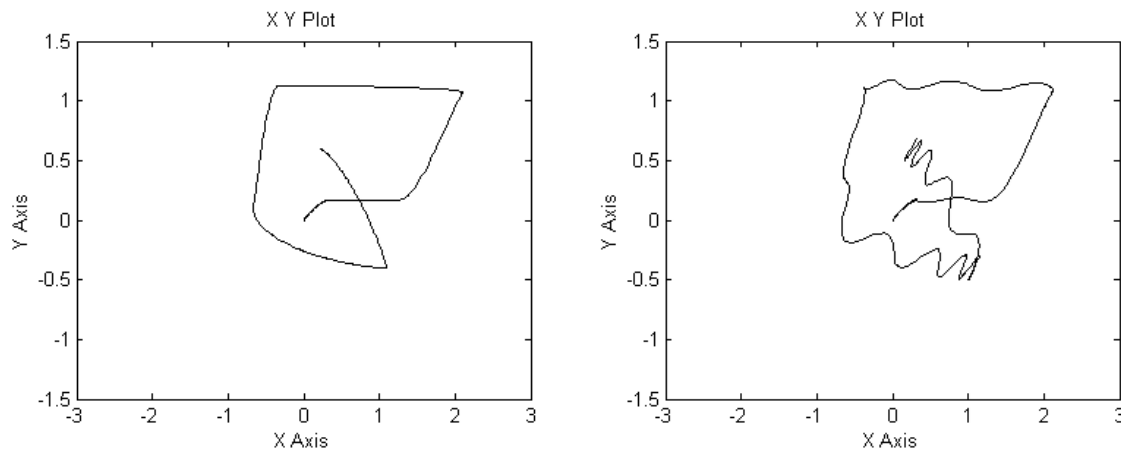


Рис. 10. Графічний образ еталонної траєкторії руху мінідрона «випадкове блукання» (а) і результат відтворення цього руху гіпотетичним типовим двовісним напівнатурним стендом (в): положення перемикачів (рис. 1) P1, P3 і P2, P4 відповідно «вгору» і «вниз»

теми дозволило: передбачити можливість виникнення автоколивань при моделюванні захисних маневрів мінідронів; підтвердити ефективність алгоритмічного способу модернізації стенду.

2. Для реалізації алгоритмічного способу модернізації стенду необхідно ідентифікувати: математичну модель руху каретки(вузла цілі) стенду напівнатурного моделювання з урахуванням перехресних зв'язків між каналами моделювання руху; математичну модель екстремальних маневрів руху мінідронів.

3. Запропонований в статті комплексний алгоритм роботи стежачих приводів складається з двох алгоритмів: алгоритму цифрового модального регулятора і алгоритму цифрового пропорційно-інтегрально-диференційного регулятора. Перший алгоритм коригує динамічні властивості електричного двигуна, а другою забезпечує квазі-

адаптивність управління по відношенню до обурюючої дії перехресних зв'язків.

4. Стенди напівнатурного моделювання, модернізовані викладеним в статті алгоритмічним способом, можуть бути використані для випробувань вузлів стеження за окремими мінідронами або кластерами мінідронів(розподіленими дронами). Ці вузли стеження можуть знайти застосування в інформаційно-керуючих системах, з людиною оператором або штучним інтелектом-оператором(ШІО) в контурі дистанційного керування засобами інспекції і знищення цілей охоронної інформаційно-керуючої системи.

5. Напрямом подальших досліджень слід вважати побудову математичної моделі руху вузла цілі, який буде встановлений на каретку тривісного стенду напівнатурного випробування сенсорів охоронної інформаційно-керуючої системи.

Список літератури:

1. Романченко І.С., Лисенко О.І., Чумаченко С.М., Данилюк С.Л., Новіков В.І., Тачиніна О.М., Кірчу П.І., Валуйський С.В. Моделі застосування інформаційно-телекомунікаційних технологій на основі безпілотних авіаційних комплексів у надзвичайних ситуаціях. – К.: НАУ, 2016. – 332 с. ISBN 978-966-932-011-7.
2. Лисенко О. І., Тачиніна О. М., Пономаренко С. О., Гуйда О. Г. Теорія оптимальних розгалужених траєкторій / О. І. Лисенко, О. М. Тачиніна, С. О. Пономаренко, О. Г. Гуйда – К: КПІ ім. Ігоря Сікорського., 7БЦ, 2023. – 260 с. ISBN 978-617-549-163-8 <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/52094>
3. Tachinina, O., Lysenko, O., Alekseeva, I., Novikov, V.: Mathematical Modeling of Motion of Iron Bird Target Node of Security Data Management System Sensors. In: CEUR Workshop Proceedings, Vol-2711, 482-491. (2020). ISSN 1613-0073, Springer, (Scopus), <http://ceur-ws.org/Vol-2711/paper37.pdf>
4. HANDONG UNITWIN FELLOWSHIP (Republic of Korea). Course «Digital automatic control systems for information communications engineers», 14 Lectures. Spring 2020. <https://www.hufocw.org/Course/197>
5. O. Lysenko, O. Tachinina. Algorithms of controlling an information robot created on the basis of unmanned aerial vehicles. Proceedings of the National Aviation University. –К.: NAU, 2020. –№ 2(83). – pp. 13-19. DOI: 10.18372/2306-1472.83.14629
6. Лисенко О.І., Тачиніна О.М., Новіков В.І., Гуйда О.Г., Фуртат О.В., Юсипів Т.В. Спосіб налаштування цифрової системи керування положенням вісі чуттєвості мобільного сенсора. Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 32 (71) № 5 2021. – С. 51-57. Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua. ISSN 2663-5941 (Print). ISSN 2663-595X (Online)
7. Tachinina O., Lysenko O., Nesterenko K., Zybin S., Alekseeva I. Tuning Methodology for Multi-circuit Digital Regulators of Robot Drives with Adjustable Dynamic Characteristics. In: Nechyporuk M., Pavlikov V., Kritskiy D. (eds). Integrated Computer Technologies in Mechanical Engineering-Synergetic Engineering. ICTM 2021. Lecture Notes in Networks and Systems, vol 367. P. 874 – 886. Springer, Cham. ISSN 2367-3370, ISSN 2367-3389 (electronic) ISBN 978-3-030-94258-8 ISBN 978-3-030-94259-5 (eBook) https://doi.org/10.1007/978-3-030-94259-5_67

Lysenko O.I., Tachinina O.M., Novikov V.I., Furtat O.V., Furtat S.O. THE METHOD OF ALGORITHMIC MODERNIZATION OF THE DRIVE CONTROL SYSTEM OF THE SEMI-NATURAL SIMULATION STAND OF MINIDRON MOTION

The article is devoted to the presentation of the results of mathematical modeling of the movement of the target node, which imitates a minidrone and is fixed on the carriage of a stand for semi-realistic testing of sensors of the security information and control system. It is shown that mathematical modeling made it possible to predict the possibility of self-oscillations when simulating protective maneuvers of minidrones and to confirm the effectiveness of the algorithmic method of modernizing the stand.

The results of the computer simulation of the stand show that with semi-realistic modeling of both deterministic and stochastic movement of the minidrone, self-oscillations and unstable mode of operation of a hypothetical typical two-axis semi-realistic stand are possible. These self-oscillations did not occur before in the simulation of the movement of inertial objects, since the cross-connections between the channels in the semi-natural simulation with small accelerations were not significant. The simulation results showed the existence of a scientific and technical problem that arises when trying to use the available semi-realistic stands to simulate the movement of maneuverable targets. In order to solve the scientific and technical problem, it is proposed to carry out an algorithmic refinement of the monitoring system of the drive control.

The complex algorithm of tracking drives proposed in the article consists of two algorithms: the digital modal controller algorithm and the digital proportional-integral-differential controller algorithm. The first algorithm adjusts the dynamic properties of the electric motor, and the second one provides quasi-adaptive control in relation to the disturbing action of cross connections.

Stands of semi-realistic modeling, modernized according to the algorithmic method described in the article, can be used for testing tracking nodes for individual minidrones or clusters of minidrones (distributed drones). These tracking nodes can be used in information management systems, with a human operator or an artificial intelligence operator (AIO) in the circuit of remote control means of inspection and destruction of security information management system targets. The direction of further research should be considered the construction of a mathematical model of the movement of the target node, which will be installed on the carriage of the three-axis stand of semi-natural testing of the sensors of the security information and control system.

Key words: *mathematical motion modeling, target node, semi-life test stand, sensor network, flying robots, drones, security information and control system.*

УДК 621.396.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/08>**Сайко В.Г.**

Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Наритник Т.М.Спільне підприємство «Інститут електроніки та зв'язку
Української академії наук національного прогресу»**Баховський П.Ф.**

Луцький національний технічний університет

МОДЕЛЬ ПІДВИЩЕННЯ ПОКАЗНИКІВ ЯКОСТІ ОБСЛУГОВУВАННЯ ГЕТЕРОГЕННОЇ МЕРЕЖНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ТЕРАГЕРЦОВОГО ДІАПАЗОНУ

У статті наводяться результати аналізу існуючих сучасних моделей та методів підвищення показників якості обслуговування у бездротових мережах зв'язку 5G NR при застосуванні терагерцового діапазону. Головний акцент зроблений на явищі блокування радіопромінів рухомими об'єктами, яке приводить до того, що ймовірність помилки на рівні каналу не перевищує наперед визначеного цільового значення. Приводиться модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою реконфігурованих інтелектуальних поверхонь (РІП). Особливості її є те, що вона враховує динаміку змін основного параметру, який характеризує якість послуги, це затримку доставки даних з врахуванням затримки у розподіленому реєстрі. Такий підхід визначає можливість побудови мереж uRLLC. Запропоновані принципи реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону з інтегрованими РІП для забезпечення надійності зв'язку. Наведено інноваційне рішення з використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при динамічному блокуванні з'єднання прямої видимості рухомими перешкодами під час передачі у терагерцовому діапазоні довжин хвиль. Новим у запропонованому рішенні є те, що у сучасних бездротових мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання запускається механізм послідовної взаємодії та передачі сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. Запропоноване рішення відрізняється від відомих тим, що усуває необхідність у послідовній обробці запитів безліччю об'єктів, що управляються, особливо коли мережева функція повинна бути обрана з безлічі кандидатів та відповідно забезпечує реалізацію різноманітні послуги з ультра-малими затримками.

Ключові слова: терагерцовий діапазон, терагерцові системи зв'язку, розподілений реєстр, блокування передачі прямої видимості, блокчейн-системи, гетерогенні мережі 5G.

Постановка проблеми. Сьогодні у світі 72 країни вже запустили сервіси мобільного зв'язку 5G, понад 460 операторів із 137 країн інвестують у пілотні розробки та проводять тестові запуски [1]. Технологія бездротового доступу 3GPP New Radio (NR) становиться основою систем 5G, що забезпечують високі швидкості передачі даних на інтерфейсі радіодоступу. Передача даних у таких системах вестиметься у терагерцовому діапазоні довжин хвиль, особливістю якого є необхідність прямої видимості між пристроями, що беруть участь у з'єднанні [2]. Одним із завдань у мережах, побудованих на основі терагерцових точок доступу, є завдання знаходження оптимального розташування точок доступу для забезпечення зони покриття мережі стійким зв'язком.

В реальних умовах найбільші труднощі системам 5G NR у більшості випадків привносять рухливі перешкоди, такі як люди і транспортні засоби, які є блокаторами поширення радіосигналу. У випадку якщо обладнання тимчасово потрапляє в стан блокування радіосигналу деяким об'єктом, то залежно від середовища розповсюдження сигналу та відстані між мобільним пристроєм і базовою станцією NR BS (англ. New Radio Base Station) цей пристрій може або випасти із зони покриття BS, або знизити свою схему модуляції та кодування таким чином, щоб ймовірність помилки на рівні каналу не перевищувала наперед визначеного цільового значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Нещодавно консорціум 3GPP запропонував мож-

ливе вирішення проблеми виходу із зони покриття, яке полягає в механізмі «множинних з'єднань» (англ. multiconnectivity) [3]. При використанні цього принципу одночасно підтримується кілька активних каналів зв'язку пристрою з сусідніми NR BS, і у разі блокування радіосигналу з'єднання передається на одну з них. В умовах блокування для того, щоб підтримувати необхідну швидкість передачі через основну та через резервну базові станції, необхідна більша кількість фізичних ресурсів. Якщо для підтримки необхідної швидкості радіо ресурсів недостатньо, то поточна сесія скидається, або послуга продовжується надається з нижчою швидкістю з'єднання, якщо це передбачено угодою про рівень обслуговування (SLA).

Відомо рішення з одночасним підключенням користувача до кількох базових станцій мережевої інфраструктури в умовах їх щільного розміщення, що враховує блокування каналу прямої видимості перешкод при передачі на вкрай високих частотах [4, 5]. Однак складність його технічної реалізації на існуючій інфраструктурі мобільного зв'язку 5G призводить до додаткових затримок перемикавання каналів, оскільки рішення приймаються віддалено, та відповідно знижує загальну ефективність системи. Це пов'язано з тим, що існуюча централізована архітектура інфраструктури мереж мобільного зв'язку на сьогодні є вразливою з точки зору перевантаження обчислювальних ресурсів і тому вона не гарантує безперебійне надання сервісів IoT, у випадку коли у головних серверах виникають збої програмного забезпечення. Тому, зростаюча потреба в різноманітних додатках, що потребують високої пропускної здатності, таких як мобільне потокове відео та обробки великих даних, потребує зміни принципів управління радіо ресурсами в мережах мобільного зв'язку, щоб уникнути їх дефіциту ресурсів для забезпечення новітніх сервісів для абонентів.

З цієї точки зору представляють інтерес нові технічні рішення з інтегрованими інтелектуальними поверхнями, що реконфігуруються, (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) які можна використовувати для допомоги у швидкому формуванні променя з використанням точного позиціонування або подолання ефектів блокування за рахунок збору даних про канали в системах міліметрових та терагерцових діапазонах хвиль. Інтелектуальні поверхні, що реконфігуруються, відносно недавно стали багатообіцяючою парадигмою проектування бездротових мереж і режимів бездротової передачі [6,7]. Вони також можуть створювати інтелектуальні радіосередовища (або інтелектуальні радіоканали), тобто поширенням радіохвиль

у навколишньому середовищі можна керувати для створення персоналізованого каналу зв'язку. В узагальненій моделі RIS-мережа формується між декількома БС для створення великомасштабних інтелектуальних радіоканалів, що обслуговують кількох користувачів. У відсутності керованого середовища архітектура бездротової системи та режим передачі можуть бути оптимізовані тільки відповідно до статистичних властивостей фізичних каналів та/або інформацією, що повертається від приймача до передавача. У керованому середовищі RIS-мережі спочатку сприймають дані середовища знаходження і повертають в систему. Виходячи з цих даних, система оптимізує режим передачі та параметри RIS по інтелектуальних радіоканалах на стороні передавача, каналу та приймача. Завдяки підтримці формування променя, пов'язаної з RIS, використання інтелектуальних радіоканалів може значно покращити якість зв'язку, продуктивність системи, покриття стільника та якість зв'язку на межі стільника в бездротових мережах. Тим не менш, через велику кількість елементів, що відбивають промені на RIS, оцінка каналу виявляється складним завданням. Крім того, потенціал RIS для локалізації отримав лише обмежене висвітлення в літературі, включаючи попередні дослідження, в яких RIS працює в режимі прийому як лінза [6] та в режимі відображення [7].

Постановка завдання. Розробка принципів технічної реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону на базі РІП для забезпечення надійності зв'язку на основі розподіленого реєстру для механізму попереджувального хендверу при блокуванні каналу прямої видимості перешкодами при передачі на вкрай високих частотах.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Модель бездротової терагерцової мережі з підтримкою РІП. Вважатимемо, що основним параметром, що характеризує якість послуги, є затримка доставки даних τ . Саме такий підхід визначає можливість побудови мобільних мереж 5G uRLLC. Її величина залежить від багатьох чинників. По-перше, від розміру тієї одиниці кількості (обсягу) даних про передачу якої йдеться і швидкості передачі даних по лінії зв'язку для кожної з ділянок маршруту, якщо маршрут складається з кількох ділянок. По-друге, від ймовірних затримок у вузлах маршруту, пов'язаних із очікуванням у буфері через зайнятість лінії передачею чергового пакету даних. По-третє, від ймовірних затримок у вузлах розподіленого реєстру,

пов'язаних із очікуванням у буфері при обробці відповідного запиту. Четверте, від імовірності блокування прямої видимості лінії зв'язку між учасниками обміну даними у терагерцовому діапазоні довжин хвиль. П'яте, від часу поширення сигналу між учасниками обміну даними.

З огляду на сказане можна записати:

$$\tau = \bar{t}_1 + \bar{t}_2 + \bar{t}_3 + \bar{t}_4 + \bar{t}_5, \quad (1)$$

де $\bar{t}_1 = \bar{V}/\bar{W}$ – середній час передачі;
 \bar{V} – середній об'єм даних, що передаються;
 \bar{W} – середня швидкість передачі;
 \bar{t}_2 – середній час очікування;
 \bar{t}_3 – середній час обробки відповідного запиту у розподіленому реєстрі;
 \bar{t}_4 – середній час хендоверу при блокуванні прямої видимості лінії зв'язку між учасниками обміну даними;
 \bar{t}_5 – середній час розповсюдження сигналу.

Для маршруту при деяких припущеннях середню величину затримки можна оцінити, як суму затримок для кожної з ділянок:

$$T = \sum_{i=1}^N \tau_i, \quad (2)$$

де τ_i – затримка для i -ї ділянки, яка визначається відповідно формули (1).

Зробимо припущення про те, що мережа між користувачем та точкою надання послуги складається з двох ділянок: ділянки доступу та сполучної лінії з точкою надання послуги, яка складається теж з двох ділянок (перша, це ділянка доступу до відповідного РІП (R_{q1}) та друга, – від РІП до точки надання послуги (R_{q2})). Структура моделі мережі з підтримкою РІП наведена рис 1.

Модель складається з користувачів послуг K , точок доступу D , точок розміщення РІП $R_{1..4}$ та точки надання послуги Q . Прийняті припущення такі, що точки доступу з'єднані з точкою надання послуги лініями зв'язку, довжина яких дорівнює довжині прямого відрізка до відповідного РІП та від РІП до точки доступу.

Максимальна відстань від користувача до точки доступу дорівнює R_d , максимальна відстань від точки надання послуги до точки доступу $R_q = R_{q1} + R_{q2}$. Тоді максимальна відстань, що долається сигналом, становитиме

$$D_{max} = R_d + R_q, \quad (3)$$

При зроблених вище припущеннях $R_d \ll R_q$, (4)

При допущенні (4) відстань між користувачем та точкою надання послуги можна прийняти рівним R_d . Час поширення сигналу визначається швидкістю поширення світла при передачі. Вважаємо, що між точкою доступу та точкою надання

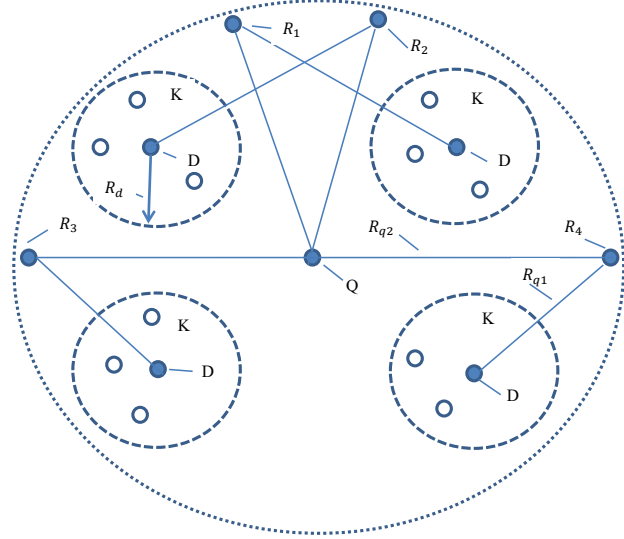


Рис. 1. Структура терагерцової мережі з підтримкою РІП

послуги використовується бездротова лінія зв'язку. Тоді з урахуванням рекомендації [8, 9]

$$t_5 = t_0 R_q, \quad (5)$$

де t_0 – затримка під час поширення на одиницю довжини.

Ми також робимо припущення про те, що користувачі розподілені на території випадково і їх розподіл може бути описано пуассонівським полем.

Імовірність знаходження n користувачів у зоні обслуговування точкою надання послуги визначатиметься як:

$$P_n = \frac{(\pi R_q^2 \mu)^n}{n!} e^{-\pi R_q^2 \mu}, \quad (6)$$

де μ – густина користувачів на території ($1/m^2$).

Кількість користувачів у зоні обслуговування складе

$$\rho = \pi R_q^2 \mu, \quad (7)$$

Інтенсивність заявок (потіку) у зоні обслуговування

$$\lambda = \lambda_0 \rho, \quad (8)$$

λ_0 – інтенсивність заявок, створювана одним користувачем.

Припустимо, що трафік можна описати моделлю потоку з коефіцієнтом варіації часового інтервалу між заявками Δa . Визначимо затримку на очікування (для однієї ділянки мережі) за допомогою моделі для системи GI/G/1 Крамера та Лангенбах-Бельца [10]:

$$\bar{t}_2 \approx \frac{\rho \bar{t}}{2(1-\rho)} (\Delta_a^2 + \Delta_t^2) G(\Delta_a^2, \Delta_t^2, \rho), \quad (9)$$

$$G(\Delta_a^2, \Delta_t^2, \rho) = \begin{cases} e^{\frac{2(1-\rho)(1-\Delta_a^2)^2}{3\rho(\Delta_a^2 + \Delta_t^2)}}, \Delta_a^2 \leq 1 \\ e^{-(1-\rho) \frac{(\Delta_a^2)^2}{\Delta_a^2 + 4\Delta_t^2}}, \Delta_a^2 > 1 \end{cases} \quad (10)$$

де $\rho = \lambda \bar{t}$ – параметр використання каналу (інтенсивність навантаження);
 Δ_a^2 – коефіцієнт варіації інтервалу між заявками (пакетами);
 Δ_t^2 – коефіцієнт варіації часу обслуговування.

Припустимо, що всі пакети мають рівну довжину, що може бути характерним для трафіку однієї послуги. Із формул (9,10) видно, що затримка на очікування істотно залежить від властивостей трафіку та його інтенсивності.

У [11] показано, що область надання обслуговування можна описати колом з радіусом, який визначається, переважно, часом поширення сигналу, тобто. відстанню. Це справді визначальна величина і наведені у цій роботі результати можна розглядати як граничні межі цифрового кластера.

Дійсно, збільшення радіусу цифрового кластера R_q згідно з (7) та (8) призводить до зростання інтенсивності заявок, що згідно з (9) та (10) призводить до зростання затримки через очікування. З урахуванням цієї залежності граничне значення R_q буде дещо меншим. Крім того, є необхідність врахувати різні вимоги щодо затримки доставки з боку різних послуг. Такий підхід визначає можливість побудови мереж uRLLC.

Інноваційне рішення з використання розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні передачі в терагерцовому діапазоні.

У сучасних бездротових мережах під час передачі обслуговування (хендовера) користувачького обладнання об'єкт управління мобільністю повинен використовувати контекстну інформацію обладнання і, можливо, стану RAN спільно з об'єктом управління сеансом. Ця подія запускає послідовну взаємодію та передачу сигналів між кількома об'єктами керування мобільністю та сеансом. У сильно розподіленому середовищі (гетерогенній мережі терагерцового діапазону) цей підхід мало ефективний, особливо при частих подіях передачі обслуговування при блокуванні в терагерцовому діапазоні.

Тому автори запропонували для вирішення такої задачі використати технологію розподіленого реєстру для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні в терагерцовому діапазоні. Суть даного підходу наступна.

Розподілений реєстр використовується для реалізації механізму попереджувального хендоверу при блокуванні, згідно з яким створюється локальний кластер мережевих функцій для перемикання при блокуванні, так що контент обладнання РІП в цьому кластері може бути заздалегідь синхронізований. Це скоротить час передачі обслуговування, необхідний для надсилання та створення нового контенту обладнання РІП. Ефективна синхронізація в даному випадку цілком реалізована, оскільки такі кластери містять лише обмежену кількість локальних пристроїв РІП.

При цьому розподілений реєстр сприяє вирішенню задачі по управлінню сеансом при блокуванні шляхом ведення загального розподіленого реєстру, в якому різні управляючі об'єкти (РІП) можуть публікувати мережеву інформацію зі свого власного домену. Щоб гарантувати, що конфіденційну інформацію не буде розкрито, можна передбачити політики публікації. Сеанси можна створити в кількох доменах за допомогою смарт-контрактів, які публікуються різними об'єктами керування сеансом. Смарт-контракти визначають умови та вхідні дані, необхідні для створення маршруту переадресації у певному домені при блокуванні. Після виклику смарт-контракту розподілений реєстр гарантує його виконання, відповідно розгортається сегмент маршруту. Щоразу, коли викликається смарт-контракт, всі операції записуються до розподіленого реєстру для перевірки. Ці переваги роблять розподілений реєстр ідеальним вибором для забезпечення спільного використання даних у кількох доменах.

Запит на використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури на базі РІП може бути підготовлений заздалегідь у відповідності з постійним ідентифікатором РІП, які зберігаються у UDR. Служба управління мобільністю підготовлює перевіряючий смарт-контракт та публікує його в розподіленому реєстрі, доступ до якого здійснюється набором відповідних об'єктів управління мобільністю. Будь-який об'єкт управління мобільністю може вилучити підготовлений цей запит і відправити його до користувачького обладнання. Потім це обладнання, яке запросило ресурс локального кластера мережевої інфраструктури, вирішує задачу корисності та повертає своє рішення об'єкту управління мобільністю, який відправляє його рішення у смарт-контракт. Якщо смарт-контракт підтверджує правильність рішення, тобто запит на використання локального кластеру мережевої інфраструктури на базі РІП, пройшов успішно, підключається механізм

попереджувачого хендоверу, згідно якого створюється локальний кластер мережевих функцій для переключення при блокуванні в терагерцовому діапазоні. Це усуває необхідність у послідовній обробці запитів безліччю об'єктів, що управляються, особливо коли мережева функція повинна бути обрана з безлічі кандидатів.

Таким чином, управління даними на основі розподілений реєстр формує нову схему управління та обміну даними у мобільній мережі з використанням терагерцового діапазону. По-перше, дані не обов'язково повинні зберігатися приватно в одному домені. Натомість дані можуть бути зашифровані та розповсюджені по всій мережі, оскільки розподілений реєстр гарантує їх достовірність. По-друге, конкретний механізм управління доступом можна реалізувати за допомогою смарт-контрактів. Будь-який запит на доступ до опублікованих даних шляхом запуску смарт-контракту буде записано, що

полегшить майбутній аудит. Це особливо важливо стосовно даних, які використовуються для спільного керування, таких як стан мережі, контекст сеансу та вимоги QoS.

Висновки: запропоновані принципи технічної реалізації нової інноваційної послуги мереж 5-го та наступних поколінь – використання ресурсу локального кластеру мережевої інфраструктури терагерцового діапазону на базі РІП для забезпечення надійності зв'язку на основі розподіленого реєстру для механізму попереджувачого хендоверу при блокуванні передачі. Одним із подальших напрямків наукових досліджень – розробка моделей та методів застосування систем розподіленого реєстру, які необхідні для забезпечення заданих показників якості послуг зв'язку при використанні терагерцового діапазону, а також стабільності стану елементів такої гетерогенної мережі.

Список літератури:

1. Сайко В.Г., Одарченко Р.С., Абакумова А.О., Наритник Т.М., Наконечний В.С., Домрачев В.М., Толюпа С.В., Заблоцький В.Ю., Баховський П.Ф. Мережі мобільного зв'язку нового покоління 4G/5G/6G: Київ: ТОВ «Про формат», 2021. 200 с.
2. V. Saiko, T. Narytnyk, M. Brailovskyi and V. Nakonechnyi. Radiating telecommunication system of the sub-THz-band to protect objects from unauthorized access. *2019 International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications: Science and Technology PIC S&T'2019*. p.p. 698–702.
3. 3GPP TS 37.340 V15.2.0: NR: Multi-connectivity; Overall description, Rel. 15 – 2018. URL: https://www.3gpp.org/ftp/Specs/archive/37_series/37.340/ (accessed 31.07.2019).
4. D. Moltchanov, A. Samuylov, V. Petrov. Improving Session Continuity with Bandwidth Reservation in mmWave Communications. *IEEE Wireless Communications Letters*. 2018. no. 7. p. 1–4.
5. Сайко В.Г., Наритник Т.М. Беспроводові системи зв'язку терагерцового діапазону: монографія. Німеччина: Видавництво "LAP LAMBERT Academic Publishing". 2019. 68 с.
6. S. Hu, F. Rusek, and O. Edfors. Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning With Large Intelligent Surfaces. *IEEE Trans. Signal Process.* 2018. vol. 66. pp. 1761–1774.
7. J. He, H. Wymeersch, T. Sanguanpuak, O. Silvén, and M. Juntti. Adaptive beamforming design for mmwave RIS-aided joint localization and communication. *IEEE Wireless Communications and Networking Conference Workshops (WCNCW)*. 2020.
8. Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник. Ніжин: ТОВ "Видавництво "Аспект-Поліграф". 2011. 612 с.
9. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: монографія. К.: ПП "Золоті ворота". 2011. 300 с.
10. Степанов С.Н. Теория телетрафика: концепции, модели, приложения. М.: Горячая линия – Телеком. 2015. 868 с.
11. Бородин А.С. Сети связи пятого поколения как основа цифровой экономики. *Электросвязь*. 2017. № 5. С. 45–47.

Saiko V.G., Narytnyk T.M., Bakhovskyi P.F. A MODEL FOR IMPROVING QUALITY OF SERVICE INDICATORS OF A HETEROGENEOUS NETWORK INFRASTRUCTURE IN THE TERAHERTZ RANGE

The article presents the results of the analysis of existing modern models and methods of improving service quality indicators in 5G NR wireless communication networks when using the terahertz range. The main emphasis is placed on the phenomenon of radio beam blocking by moving objects, which leads to the fact that the probability of an error at the channel level does not exceed a predetermined target value. A model of a wireless terahertz network with support for reconfigurable intelligent surfaces (RIS) is given. Its features are that it takes into account the dynamics of changes in the main parameter that characterizes the quality

of the service, which is the data delivery delay, taking into account the delay in the distributed registry. This approach determines the possibility of building uRLLC networks.

The proposed principles of implementation of a new innovative service of networks of the 5th and subsequent generations are the use of the resource of a local cluster of the network infrastructure of the terahertz range with integrated RIPv to ensure the reliability of communication. A solution is given for using a distributed register to implement a warning handover mechanism when the line-of-sight connection is dynamically blocked by moving obstacles during transmission in the terahertz wavelength range. What is new in the proposed solution is that in modern wireless networks, during the handover of user equipment, a mechanism of sequential interaction and signal transmission between several mobility and session management objects is launched. The proposed solution differs from the known ones in that it eliminates the need for sequential processing of requests by many managed objects, especially when the network function must be selected from many candidates, and accordingly ensures the implementation of various services with ultra-low delays.

Key words: *terahertz range, terahertz communication systems, distributed ledger, line-of-sight transmission blocking, blockchain systems, 5G heterogeneous networks.*

УДК 621.37(045)
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/09>

Сібрुक Л.В.

Національний авіаційний університет

Слободян О.П.

Національний авіаційний університет

Єнчев С.В.

Національний авіаційний університет

СПОСІБ І ПРИСТРІЙ ВИМІРЮВАННЯ ПОЧАТКОВОЇ ФАЗИ ГАРМОНІЧНОГО РАДІОСИГНАЛУ НА ОСНОВІ МАГНІТООПТИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

Процес розвитку радіотехнічних пристроїв та телекомунікацій в останні тридцять років тісно пов'язаний з небувалим за темпами та масштабами зростанням технологій в усіх сферах людської діяльності. Згідно з проведеним аналізом, існує проблема, яка стримує розвиток техніки, перетворення спектра сигналів, вимірювання та обробки сигналів, зокрема, у вузлах радіотехнічних пристроях в яких нелінійні елементи та їх характеристики не є достатньо дослідженими. Однією з таких є актуальна наукова задача, що полягає у розвитку методу, який дозволяє здійснювати вимірювання початкової фази гармонічного радіосигналу, шляхом розробки способів реалізації таких операцій за допомогою магнітооптичного перетворювача на ефекті Фарадея. Проаналізовані аналітичні залежності, що описують роботу магнітооптичного перетворювача. Встановлено, що його апаратна функція володіє властивістю множення сигналу. На основі цієї властивості запропоновано метод вимірювання початкової фази гармонічного радіосигналу та конструкцію фотополяриметричного фазометра. Визначено похибку вимірювання фази запропонованим методом. Досліджено поведінку вихідного сигналу в точках вимірювання. Встановлено залежність амплітуди вихідного сигналу в момент вимірювання початкової фази. Проаналізована потенційна точність запропонованого методу. Для збільшення точності необхідно збільшувати частоту заповнення сигналу, тобто крок квантування фази. Досліджено вплив рівень шумів на точність вимірювання. Рівень шуму пов'язаний з дробовими шумами (фотоприймач) або генераційно-рекомбінаційними (напівпровідниковий фотоприймач) шумами набагато більше теплових шумів, поляризаційним дефектом оптичного каналу. Запропоновано блок-схему фотополяриметричного фазометра. Відповідно до викладених теоретичних досліджень та розробленої блок-схеми приладу, складено алгоритм роботи фотополяриметричного фазометра. Застосування цього методу дозволить створювати прилади дуже високої точності, зокрема, на інфра- та низькому радіочастотному діапазонах. Це відкриває широке застосування для створення далекомірів, пеленгаторів, фазообертачів, аналізаторів спектру для використання в новітніх технологіях.

Ключові слова: початкова фаза, радіосигнал, магнітооптичний перетворювач, спосіб, пристрій.

Вступ і постановка завдання. Відомі методи вимірювання різниці фаз електричних сигналів: метод фазового детектування, середньо-імпульсний, цифровий (базується на вимірі часового інтервалу, заповненням рахунковими імпульсами), гетеродинний, компенсаційний тощо [1-8]. У термінології «різниця фаз електричних сигналів» часто називають «початкова фаза електричного сигналу» [1]. Цифровий метод вимірювання початкової фази виявився найточнішим. Його похибка обмежена тим, що фаза сигналу створює лічильні імпульси, які флюктують відносно фази вимірюваного сигналу, а також похибкою визначення моментів часу

коли амплітуди вимірюваного (t_c) і опорного (t_{on}) сигналів дорівнюють нулю [9-11].

У роботі [12] пропонується використовувати магнітооптичний оптрон [13] для вимірювання різниці фаз електричних сигналів. Використання магнітооптичного оптрона викликає потенціальний науковий інтерес, оскільки має можливість функціонувати в інфра- та низькому радіочастотному діапазонах. Тому розробка методу вимірювання початкової фази радіосигналу на основі магнітооптичного перетворювача та пристроїв на його основі є актуальною науковою задачею, яка вирішується в нашому дослідженні.

Сигнал на виході оптрона. На вхід оптрона подаються два сигнали. Сигнал, початкову фазу ϕ_0 якого необхідно вимірювати, має вигляд:

$$u_{\omega} = u_{0\omega} \sin(\omega t - \phi_0), \quad (1)$$

та лічильний сигнал, який називають ще сигналом заповнення [12]

$$u_{\Omega} = u_{0\Omega} \sin \Omega t. \quad (2)$$

Відповідно до [14] сигнал на виході оптрона дорівнює:

$$u_{\text{вих}} = u_0 \cos^2 [\Theta_0 + \Theta_{0\omega} \sin(\omega t - \phi_0) + \Theta_{0\Omega} \sin \Omega t], \quad (3)$$

де Θ_0 – вихідний азимут між площинами найбільшого пропускання поляризатора та аналізатора; $\Theta_{0\omega} = k u_{0\omega}$, $\Theta_{0\Omega} = k u_{0\Omega}$ – початкові амплітуди кутів розгойдування площини поляризації світла сигналами u_{ω} і u_{Ω} , k – коефіцієнт перетворення напруги подаючого на фарадівський модулятор оптрона в кут повороту площини поляризації світла.

Розглянемо варіант, коли $\Theta_0 = \frac{\pi}{2}$, тобто у вихідному стані, коли на модулятор не подаються сигнали u_{ω} і u_{Ω} напруги на виході оптрона дорівнює нулю. У такому разі спектральний розклад формули (3) [14] матиме вигляд:

$$u = u_0 \left\{ 1 - \left[j_0(2\Theta_{0\omega}) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} j_{2p}(2\Theta_{0\omega}) \cos 2p(\omega t - \phi_0) \right] \times \right. \\ \left. \times \left[j_0(2\Theta_{0\Omega}) + 2 \sum_{p=1}^{\infty} j_{2p}(2\Theta_{0\Omega}) \cos 2p\Omega t \right] + \right. \quad (4)$$

$$\left. + 4 \sum_{p=1}^{\infty} j_{(2^p-1)}(2\Theta_{0\omega}) \sin(2^p-1)(\omega t - \phi_0) \sum_{p=1}^{\infty} j_{(2^p-1)}(2\Theta_{0\Omega}) \sin(2^p-1)\Omega t \right\},$$

де $j_i(2\Theta)$ – функція Беселя i -го порядку.

Накладемо умову $\Omega \gg \omega$. Частота сигналу зчитування (заповнення) набагато більша за частоту вимірюваного сигналу.

Виділимо зі всього спектру частот сигнали з частотою $\Omega - \omega$ до $\Omega + \omega$. Це буде сигнал, що несе інформацію про початкову фазу ϕ_0

$$u_{\text{вих}} = 2u_0 j_1(2\Theta_{0\omega}) j_1(2\Theta_{0\Omega}) \sin(\omega t - \phi_0) \sin \Omega t =, \quad (5)$$

$$= u_{0\text{вих}} \sin(\omega t - \phi_0) \sin \Omega t$$

де $u_{0\text{вих}} = 2u_0 j_1(2\Theta_{0\omega}) j_1(2\Theta_{0\Omega})$.

З виразу (5) випливає, що при азимутальній орієнтації площин найбільшого пропускання щодо аналізатора $\Theta_0 = \pi/2$ апаратна функція оптрона володіє властивістю множення сигналу (рис. 1).

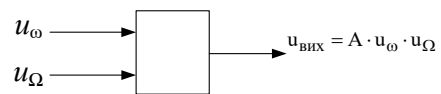


Рис. 1. Принцип множення сигналів в оптроні

Слід зазначити, що перемноження сигналів магнітооптичним оптроном має одну важливу особливість на відміну від традиційних способів множення: вихідний сигнал повністю відсутній, якщо немає одного з вхідних сигналів, тобто, відсутній «дрейф нуля». Отже, такі пристрої мають (потенційно) прецизійні характеристики. Відомими радіотехнічними методами не можна створити пристрій з ідеальною функцією перемноження. За відсутності одного з сигналів другий буде проходити сильно ослабленим.

Метод вимірювання різниці фаз і конструкція фазометра. Використовуючи вище розглянуту здатність оптрона множити сигнали в роботі [12] запропоновано метод вимірювання початкової фази.

Вимірюваний сигнал u_{ω} , опорний сигнал u_{on} і сигнал заповнення (сигнал зчитування) u_{Ω} визначається виразами

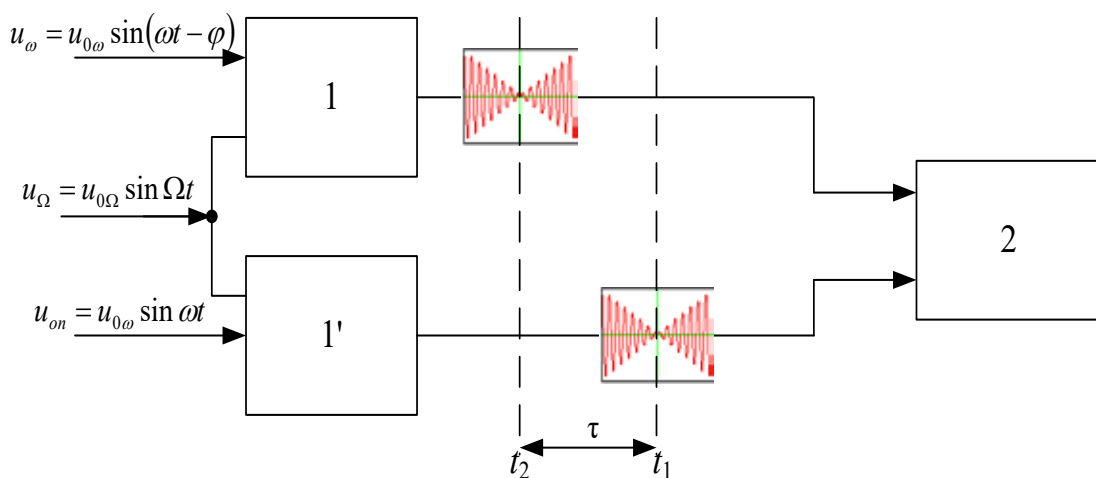


Рис. 2. Фотополяриметричний фазометр: 1, 1' – оптрони для сигналу u_{ω} та опорного сигналу u_{on} ; 2 – цифровий мікропроцесор вимірювання інтервалу τ

$$\begin{aligned} u_{\omega} &= u_{0\omega} \sin(\omega t - \phi_0 - \phi_{on}), \\ u_{on} &= u_{0on} \sin(\omega t - \phi_{on}), \\ u_{\Omega} &= u_{0\Omega} \sin \Omega t. \end{aligned} \quad (6)$$

Сигнал заповнення має нульове значення початкової фази, так як він прив'язаний до еталонного, поточного часу і за ним відраховується поточний час t . Частота Ω має бути стабільною, еталонною.

Визначаємо моменти часу, коли вимірюваний та опорний сигнали дорівнюють нулю:

$$\begin{aligned} \omega t_c - \phi_0 - \phi_{on} &= n' \pi, \\ \omega t_{on} - \phi_{on} &= n'' \pi, \end{aligned} \quad (7)$$

де $n' = 0, 1, 2, \dots$

Вважаємо, що зсув за фазою ϕ_0 не перевищує 2π , тобто $n' = n''$

З формул (7) отримаємо:

$$\omega(t_c - t_{on}) = \phi_0, \quad (8)$$

де t_c і t_{on} – моменти часу, коли амплітуди вимірюваного та опорного сигналів дорівнюють нулю.

Період сигналу заповнення T_{Ω} підбираємо кратним періоду вимірюваного сигналу T_{ω} :

$$T_{\omega} = NT_{\Omega}, \quad (9)$$

де N – ціле число. З (9) слідує

$$N = \frac{\Omega}{\omega}.$$

Абсолютна і відносна похибка визначення N пов'язана з нестабільністю частоти опорного генераторів (відповідно й частоти вимірюваного сигналу) і сигналу заповнення

$$\Delta N = \frac{\Delta\Omega}{\omega} + \frac{\Omega\Delta\omega}{\omega^2} = \frac{\Delta\Omega}{\Omega} + \frac{\Delta\omega}{\omega}. \quad (10)$$

Відносна точність N , тобто кратність частот ω і Ω визначаються нестабільністю частоти генераторів опорного сигналу і сигналу заповнення:

$$t_c - t_{on} = nT_{\Omega} + \Delta t_c + \Delta t_{on}, \quad (11)$$

де n – ціле число ($n \leq N$); Δt_c

та Δt_{on} – похибки визначення моментів часу t_c та t_{on} .

Позначимо $\Delta t_c + \Delta t_{on} = \Delta t_0$ сумарна похибка визначення моментів часу t_c та t_{on} . Далі буде показано, що цей час також можна визначити і відповідно знизити похибку $\Delta t_{0max} = T_{\Omega}$. Значимо, що $\Delta t_{0max} \leq 2T_{\Omega}$, незважаючи на те, що вимірюємо у двох точках.

Таким чином, початкова фаза та похибка її визначення рівні:

$$\begin{aligned} \phi_0 &= \omega n T_{\Omega} + \omega \Delta t_0 = \omega n T_{\Omega} + \xi = 2\pi \frac{\omega}{\Omega} n + 2\pi \frac{\omega}{\Omega} \frac{\Delta t_0}{T_{\Omega}} = \\ &= 2\pi \frac{n}{N} + 2\pi \frac{1}{N} k = \frac{2\pi}{N} (n + k), \end{aligned} \quad (12)$$

де $n = 0, 1, 2, \dots, N$; $\xi = \omega \Delta t_0$.

Значимо, що n – кількість періодів, сигналу u_{Ω} в інтервалі часу $t_c - t_{on}$, а k – додаткова частина часу щодо періоду заповнення.

Дискретність вимірювання фази дорівнює

$$\psi_n = \phi_n - \phi_{n-1} = \frac{2\pi}{N}. \quad (13)$$

Отже, для збільшення точності слід збільшувати N .

Похибка вимірювання фази на крок дискретності дорівнює

$$\Delta\psi_n = \frac{2\pi}{N} \left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega} + \frac{\Delta\omega}{\omega} \right), \quad (14)$$

а похибка у вимірюванні фази

$$\Delta\phi_0 = n\Delta\psi_n = \frac{2\pi}{N} n \left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega} + \frac{\Delta\omega}{\omega} \right). \quad (15)$$

Значимо, що $n_{max} = N$ і $\Delta\psi_{0max} = 2\pi \left(\frac{\Delta\Omega}{\Omega} + \frac{\Delta\omega}{\omega} \right)$. Проаналізуємо співвідношення

$$\frac{\xi}{\phi_0} = \frac{k}{n+k}. \quad (16)$$

З виразу (16) видно, що менше n , тим гостріше потреба у вимірюванні (тобто k) у зменшенні похибки вимірювання.

Попередньо за наведеними формулами розрахуємо похибку, пов'язану з нестабільністю генераторів. За $\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = 10^{-4}$ і $N = 2 \cdot 10^4$ $\Delta\phi_0 = 0,036^\circ$, а за $\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta\Omega}{\Omega} = 10^{-6}$ і $N = 2 \cdot 10^4$ $\Delta\phi_0 = 0,00036^\circ = 1,3''$.

З наведених результатів видно, що точність, принаймні чутливість, методу забезпечує метрологічне вимірювання. Проаналізуємо вимірювання k (у точці $\phi \approx 0$), а для цього необхідно вивчити поведінку сигналу в цій області.

Поведінка вихідного сигналу в точках вимірювання. Розглянемо вираз вихідного сигналу (5) в якому знаходиться інформація про початкову фазу сигналу u_{ω} та інформація про поточний час, в сигналі u_{Ω} . Умова $\Omega \gg \omega$ накладається для того, щоб точно визначати моменти часу коли амплітуда сигналу u_{ω} дорівнює нулю. Частота сигналу заповнення (зчитування) повинна бути стабільна $\Omega = const$, так як сигнал u_{Ω} прив'язаний до фази.

Для вимірювання часу використовується схема вимірювання часового інтервалу за кількістю лічильних імпульсів, які заповнюють цей проміжок часу. У формулі (5), а саме у вихідному сигналі, закладена інформація про початкову фазу і поточний час, що вимірюється за еталонною частотою сигналу зчитування. Тому можна позбутися операції перетворення різниці фаз двох сигналів в тривалість прямокутного імпульсу і заповненнями його імпульсами рахунку. Це дозволить, як буде наведено нижче, знизити похибку вимірювання. Щоб підкреслити цю особливість сигнал u_{Ω}

називатимемо сигналом заповнення. Сигнал рахунку та сигнал заповнення несуть інформацію про еталонний час. Однак у відомому методі [13] вимірюваний сигнал і сигнал рахунку незалежні. Підкреслимо ще раз те, що в запропонованому методі за рахунок перемноження вимірюваного сигналу і сигналу заповнення вихідний сигнал матиме жорсткий зв'язок між згаданими двома сигналами.

Вирази (5) являє собою биття двох сигналів з частотами $\Omega + \omega$ і $\Omega - \omega$. Графік цього сигналу подано на рис. 3. Проаналізуємо поведінку вихідного сигналу в області зникнення u_ω , де вимірюємо початкову фазу ϕ_0 . Вираз (5) в області вимірювання фази матиме вигляд:

$$u_{\text{вих}}(t) = u_{0\text{вих}}(\omega t - \phi_0) \sin \Omega t. \quad (17)$$

В області вимірювання $\phi = \omega t - \phi_0 \ll 1$ величина мала, порівнянна з величиною похибки вимірювання. Тому у виразі (5) $\sin \phi$ замінимо на ϕ .

У системі координат (16) перетворюється

$$u_{\text{вих}} = u_{0\text{вих}} \phi \sin N(\phi + \phi_0). \quad (18)$$

З (18) видно, якщо початкова фаза низькочастотного сигналу змінюється на ϕ , то початкова фаза вихідного сигналу збільшується в N разів, у системі координат ϕ . Відносно вимірюваного сигналу початкова фаза сигналу заповнення також в N разів більше і становить $N\phi_0$. На рис. 4 (а, б, в, г, д) наведені сигнали u_ω та u_Ω в області вимірювання залежно від часу для п'яти значень ϕ_0 ($N = 18; = 1$):

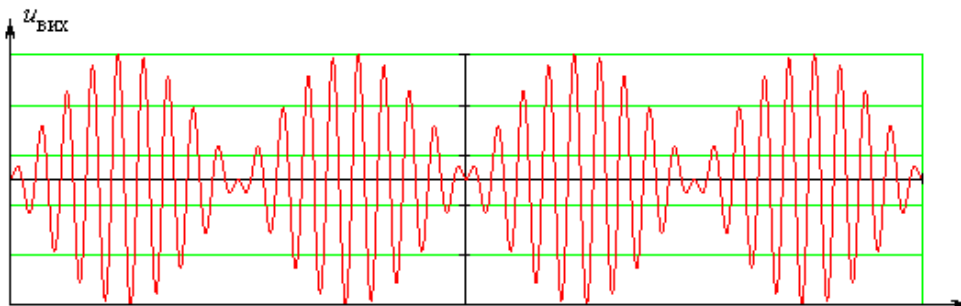


Рис. 3. Залежність амплітуди вихідного сигналу $u_{\text{вих}}$ від часу

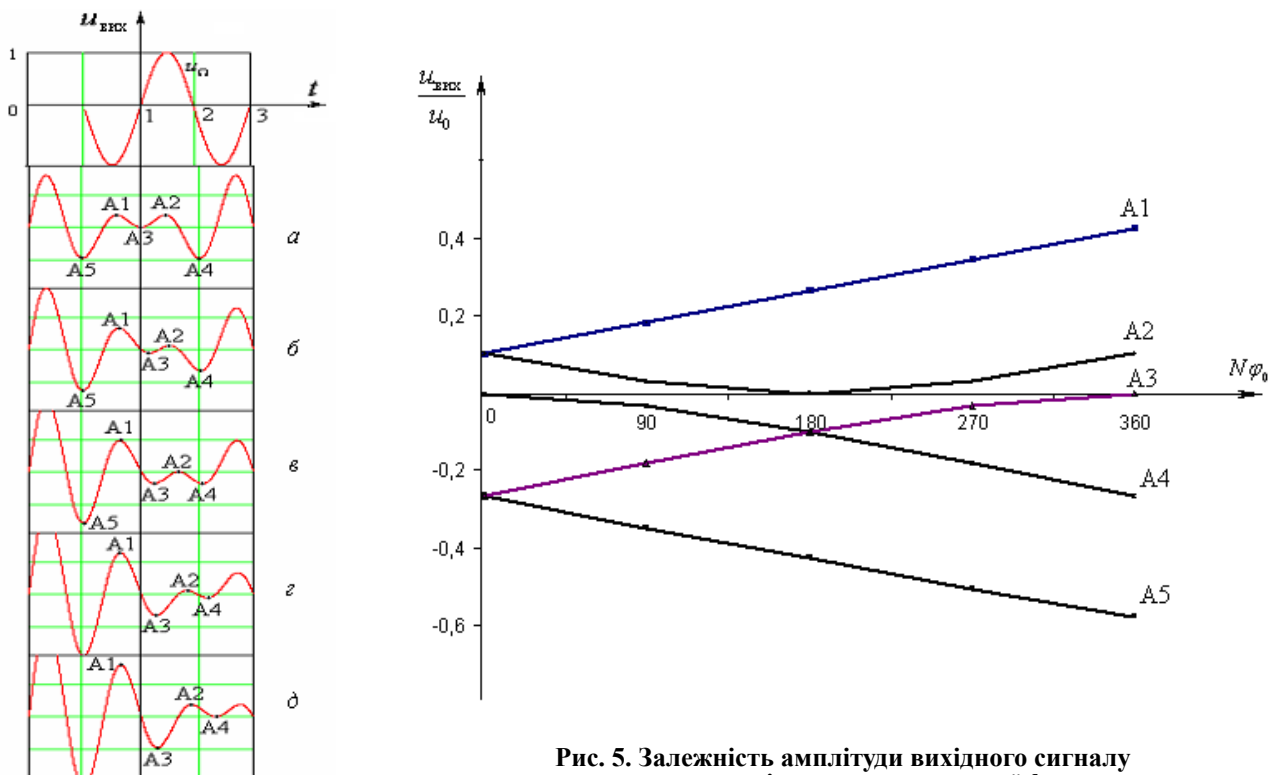


Рис. 5. Залежність амплітуди вихідного сигналу в момент вимірювання початкової фази

Рис. 4. Залежність $u_{\text{вих}}$ від часу

- а) $\phi_0 = 0^\circ$;
- б) $N\phi_0 = 90^\circ$ ($\phi_0 = 5^\circ$);
- в) $N\phi_0 = 180^\circ$ ($\phi_0 = 10^\circ$);
- г) $N\phi_0 = 270^\circ$ ($\phi_0 = 15^\circ$);
- д) $N\phi_0 = 360^\circ$ ($\phi_0 = 20^\circ$).

Положення всіх малюнків синхронізовано в часі, тому точки 1, 2, 3 ($u_\Omega = 0$) займають одне й те саме положення. Точка 0 всіх графіках це точка, в якій вимірюється початкова фаза. Якщо графіки накреслити в координаті Ωt , то вони будуть переміщатися в залежності ϕ_0 від N раз швидше. При $N\phi_0 = 0, 2\pi, 4\pi \dots n\pi$ залежність симетрична щодо точки ($t = 0$). Перші найближчі максимуми $A1$ і $A2$ позитивні й знаходяться на однаковій відстані між максимумами сигналу заповнення $N\phi = 180^\circ$. Щодо цих максимумів вершини $A1$ і $A2$ зсунуті відповідно вліво та вправо на кут $N\phi = 26,25^\circ$ ($\phi = 6,46^\circ$). Положення максимумів і мінімумів $A1, A2, \dots, A5$ щодо точок 1, 2, 3 показано на рис. 4 (а, б, в, г, д).

Точка 0 визначається з умови $\omega t = \phi_0$ ($\Omega t = N\phi_0$), тобто точка, в якій вимірюється фаза ϕ_0 . Увесь період сигналу u_Ω відповідає вимірюванню фази $\Delta\phi$ сигналу $u_\Omega \frac{360}{N}$ (у наведеному прикладі $N = 18, \Delta\phi = 20^\circ$). Таким чином, визначаючи положення точки 0 щодо точок 1, 2, 3 ми знаходимо ξ . Далі підставляючи ξ вираз (12), знаходимо початкову фазу ϕ_0 . Похибка визначення $\Delta\phi$ визначається шумами системи.

На рис. 5 представлена залежність відносного значення амплітуди вихідної напруги $u_{\text{вих}}$ від N у найближчих максимумах та мінімумах від точки 0.

При $N\phi_0 \rightarrow 360^\circ$ зі збільшенням $N\phi_0$ амплітуди у вершинах $A1$ і $A2$ наближається до +1, у точках $A3, A4$ і $A5$ наближається до -1.

На рис. 6 представлені залежності зсуву вершин $A1, A2 \dots$ фази ϕ_i щодо моменту $t=0$. Вершини праворуч від точки $A1$ ($A2, A3, A4$) зміщуються на значні відстані порівняно з точками, які розташовані зліва від вершини $A1$ ($A5$). З графіків видно, що $N\phi_0$ змінюється на 360° ($\phi_0 = 20^\circ$). Переміщення вершини $A1, A2$ відповідно (табл. 1) позначено значення переміщення вершини за фазою (щодо $t = 0$) при зміні $N\phi_0$ від 0° до 360° .

Максимальне переміщення вершини $A2$ на кут $N\phi = 125^\circ$. Отже найбільш чутливу залежність, потрібно використовувати для вимірювання ξ .

Потенційна точність способу. Основну похибку при вимірі вносить складова $2\pi \frac{\omega \Delta t}{\Omega T_\Omega}$, що входить до (12). Для того щоб

зменшити її, необхідно точніше знати момент часу проходження сигналу u_Ω через нуль, отже, збільшувати частоту заповнення Ω . Тобто зменшувати крок квантування фази $360 \frac{\omega}{\Omega}$. Якщо частота вимірюваного сигналу 1 кГц, то досягнення похибки в $0,01^\circ$ необхідно, щоб частота заповнення була 36 МГц. Магнітооптичні модулятори на феритах ефективно працюють до 2 МГц.

Таблиця 1

Переміщення вершини за фазою

ϕ_i	$N\phi_1$	$N\phi_2$	$N\phi_3$	$N\phi_4$	$N\phi_5$
Зміщення, град	30°	125°	80°	80°	12°

Підберемо частоту сигналу заповнення такою, щоб у (12) зникла складова ξ . Це можливо, якщо в моменти часу t_c і t_m епюра напруги відповідає рис. 4, а та рис. 4, д. У цих випадках вираз (12) перетворюється:

$$\phi_0 = 2\pi \frac{\omega}{\Omega} n + 2\pi \frac{\omega}{\Omega} \frac{\Delta t}{T_0} = 2\pi \frac{\omega}{\Omega} n, \quad (20)$$

де $n' = n \pm i$; i – ціле число.

Частота Ω' підібрана таким чином, щоб у вимірюваний проміжок часу укладалося цілу кількість

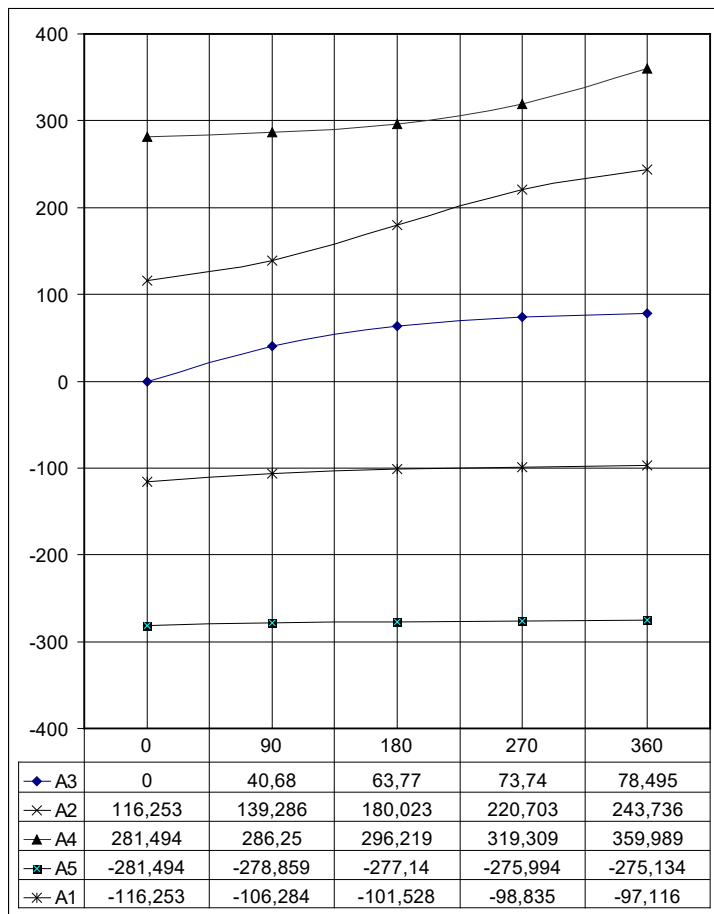


Рис. 6. Залежність зсуву вершин

періодів. Можна вибрати й інші частоти, для яких виконується умова (20)

$$2\pi \frac{\omega}{\Omega} n' = 2\pi \frac{\omega}{\Omega''} n'',$$

де $n' = n'' \pm i$.

Отже

$$n' = i \frac{\Omega'}{\Omega'' - \Omega'}. \quad (21)$$

Якщо $\Omega'' > \Omega'$, то i – ціле додатне число.

Чим більше додаткових періодів, тим більше різниця між частотами Ω' і Ω'' . За виразом (21) можна визначити n , знаючи частоти Ω' та Ω'' . Похибка у визначенні n повинна бути меншою, ніж одиниця.

Визначимо похибку Δn , продиференціювавши (21):

$$\Delta n = i \frac{\Omega' \Omega'' \left(\frac{\Delta \Omega'}{\Omega'} + \frac{\Delta \Omega''}{\Omega''} \right)}{(\Omega'' - \Omega')^2} < 1. \quad (22)$$

Вважаємо стабільність частоти генератора в межах вимірюваного діапазону незмінної

$$\frac{\Delta \Omega'}{\Omega'} = \frac{\Delta \Omega''}{\Omega''} = \frac{\Delta \Omega}{\Omega}.$$

З (22) знаходимо умову, коли $\Delta n < 1$.

$$\sqrt{2i \frac{\Delta \Omega}{\Omega}} < \frac{\Omega'' - \Omega'}{\sqrt{\Omega'' \Omega'}}. \quad (23)$$

У виразі (23) $\frac{\Delta \Omega}{\Omega}$ – визначає стабільність частоти генератора, $\Omega'' - \Omega'$ – діапазон, в якому змінюється частота генератора у процесі вимірювання. Реально $\Omega \approx \Omega'' \approx \Omega' \gg \Omega'' - \Omega'$ тому вираз (23) запишемо в наступному вигляді

$$\sqrt{2i \frac{\Delta \Omega}{\Omega}} < \frac{\Omega'' - \Omega'}{\sqrt{\Omega}}. \quad (24)$$

У разі використання кварцового генератора стабільність частоти якого $\frac{\Delta \Omega}{\Omega} \approx 10^{-6}$ та $i = 2,2 \cdot 10^{-3} < \frac{\Omega'' - \Omega'}{\sqrt{\Omega}}$, що є реальним, тобто змінювати відносну частоту еталонного генератора в межах $2,2 \cdot 10^{-3}$ від несучої частоти, не змінюючи частоту стабільності генератора, можна дійти висновку, що n визначена як підрахунком імпульсів заповнення, а й у формулі визначаючи граничні частоти Ω' й Ω'' у заданого i .

З (24) випливає, що збільшення i , тобто збільшення кількості періодів T_Ω у вимірюваному інтервалі, ніяких імпульсів не дає. Зі збільшенням i необхідно збільшувати діапазон вимірювання частоти генератора в \sqrt{i} раз, а точність при цьому не збільшується.

Вплив шумів на точність вимірювання.

У запропонованому методі оптоелектронний прийом радіосигналу (або електричного сигналу). Отже рівень шуму пов'язаний з дробовими шумами (фотоприймач) або генераційно-рекомбінаційними (напівпровідниковий фотоприймач)

шумами набагато більше теплових шумів і відношення сигналу до шуму на виході фотоприймача визначається виразом (15, 16).

$$\frac{s}{N} = \frac{u_c^2}{u_{sp}^2 + u_r^2} = A \Delta^2 \frac{(1 - 2Gd)^4 \sin^2 2\Theta_0}{(1 - Gd)^2 [1 - (1 - 2Gd)^2 \cos 2\Theta_0]}, \quad (25)$$

де u_c , u_{sp} , u_r – напруги, створювані сигналом, генераційно-рекомбінаційними та тепловими шумами відповідно; Gd – поляризаційний дефект оптичного каналу (насамперед визначається поляризаційним дефектом призми); A – стала величина, що залежить від швидкості рекомбінації, рухливості носіїв, прозорості оптичного каналу. Δ – похибка у визначенні кута площини поляризації; Θ_0 – кутова амплітуда коливань площини поляризації світлового променя. При $Gd \rightarrow 0$ (підвищення якості оптичного каналу прозорості та деполіризації променя).

$$\Theta_0 \rightarrow 0 \text{ та } \frac{s}{N} \rightarrow \left(\frac{s}{N} \right)_{\max}^{Gd \rightarrow 0} = A \Delta^2 2.$$

Якщо враховувати теплові (темнові) шуми, то відношення $\frac{s}{N}$ буде рівним. У такому разі при $Gd \sim 0$:

$$\frac{s}{N} = A \Delta^2 \frac{(1 - 8Gd) \sin^2 2\Theta_0}{u_r'^2 + [1 - 2Gd - (1 - 6Gd) \cos 2\Theta_0]}.$$

При оптимальному куті розкачки Θ_0 рівним $\cos 2\Theta_0 = 1 - \sqrt{2u_r'^2 + 8Gd}$.

Відношення сигналу до шуму буде максимальним і рівним:

$$\frac{s}{N} = A \Delta^2 \frac{2\sqrt{2u_r'^2 + 8Gd}}{u_r'^2 + \sqrt{2u_r'^2 + 8Gd} + 4Gd}.$$

При $u_r'^2 \ll 1$, $u_r'^2 \ll \sqrt{2u_r'^2 + 8Gd}$, отримаємо:

$$\frac{s}{N} = A \Delta^2 \frac{2\sqrt{2u_r'^2 + 8Gd}}{\sqrt{2u_r'^2 + 8Gd} + 4Gd}.$$

Слід зазначити, що якщо не враховувати теплові шуми $u_r'^2$, то відношення $\left(\frac{s}{N} \right)_{\max}$ збігається з роботою (15).

Якщо оптичний канал є ідеальним $Gd = 0$, то

$$\left(\frac{s}{N} \right)_{\max} = A \Delta^2 \frac{2\sqrt{2u_r'^2}}{u_r'^2 + 2\sqrt{u_r'^2}} \sim 2A \Delta^2.$$

При куті розкачки $\sin^2 2\Theta_0 = 2\sqrt{2u_r'^2}$.

Слід пам'ятати, що менший кут розкачки, тим більше відношення $\frac{s}{N}$.

Як було зазначено вище, максимуми A_1 і A_2 з'являються за умови $N\phi = 116,5\phi$ ($\phi = 0$). Отже $\phi = \frac{116,5}{N}$, ϕ – це відхилення від ϕ_0 тобто похибка вимірювання. Зв'язок ϕ з Δ визначається виразом

$$\Delta = \Delta\Theta_{00} = ku_{00}\Delta\phi = \Theta_{00} \frac{116,5}{N}.$$

Таким чином, величина N визначається з умови, коли A_1 і A_2 будуть за величиною більше шуму

$$\frac{s}{N} = AF(u_r^2, Gd, \Theta_{0\omega}) \Delta^2 = 1.$$

Найбільш точно постійна A визначається експериментально. Чутливість (і точність) фотополяриметрів варіюється в межах від однієї секунди до сотих (і якщо є необхідність до градусів). Відповідно до формули

$$\frac{s}{N} = A\Delta^2.$$

Постійну A можна завжди визначити експериментально, вимірюючи Δ . Знаючи Δ обчислюємо $\Delta\phi = \frac{360}{2\pi} \frac{\Delta}{\Theta_{0\omega}}$ (зазвичай $\Theta_{0\omega} \sim 10^\circ$).

Якщо чутливість поляриметра $\Delta = 1\phi$, то $\Delta\phi = 0,0017^\circ$, при $\phi = 6''$, $\Delta\phi = 0,01^\circ$, а при $\Delta = 1'$, $\Delta\phi = 0,1^\circ$ тощо. Для вимірювання фази електричного сигналу це прийнятні результати.

Загалом, прирівнюючи $\frac{s}{N} = 1$, знаходимо похибку визначення фази

$$\Delta\phi = \frac{58,8}{\Theta_{0\omega} \sqrt{A}}.$$

Знаючи чому дорівнює $\Delta\phi$, можна визначити N виходячи з таких міркувань

$$\omega\Delta t = \Delta\phi.$$

$$\text{Отже, } \omega\Delta t > \Delta\phi \text{ або } \frac{2\pi}{\Delta\phi} > \frac{\Omega}{\omega} = \frac{T_\omega}{T_\Omega} = N.$$

У граничному випадку N_{\max} дорівнюватиме

$$N_{\max} = \frac{2\pi}{\Delta\phi} = \frac{360}{\frac{360}{2\pi} \frac{1}{\Theta_{0\omega}} \Delta} = \frac{2\pi\Theta_{0\omega}}{\sqrt{A}} = 2\pi\Theta_{0\omega}\sqrt{A}.$$

Таким чином, для фотополяриметра з чутливістю по $\Delta 1'' (0,0017)$, $6'' (0,01)$, N_{\max} відповідно дорівнює $2,12 \cdot 10^5$, $36 \cdot 10^3$, $36 \cdot 10^2$, а якщо з точністю до $1^\circ - 360^\circ$.

Блок схема приладу. На рис. 7 представлена блок-схема вимірювача фази на базі магнітооптичного оптрона (фотополяметричного фазометра).

Сигнал u_ω з вимірюваною початковою фазою подається на оптрон 2 (магнітооптичний помножувач амплітуд), на який також подається сигнал заповнення від генератора сигналу заповнення 3. Сигнал заповнення подається на оптрон 6 разом з опорним сигналом від генератора опорного сигналу 8 через керований фазообертач 9. Початкова фаза опорного сигналу фазообертачем 9 зсувається таким чином, щоб на виході оптрона був вихідний сигнал, що відповідає емпорі представленій на рис. 4, а, що відповідає нульовій різниці фази опорного сигналу та сигналу заповнення. Цей момент фіксується вимірювачем опорного сигналу 7, для цього сигнал подається для управління фазовим зсувом опорного сигналу фазообертач 9.

Діапазон виміру фазового зсуву не перевищує дискретності кроку (кванта) виміру фази $\frac{2\pi}{N} \left(\frac{360^\circ}{N} \right)$. У цей момент вимірювач опорного сигналу 7 відкриває лічильник вимірювання кількості дискретних кроків фази. Вимірювач вимірюваного сигналу аналізує через оптрон 2 вимірюваний сигнал, реєструючи момент закінчення дискретних кроків, і подає сигнал закриття лічильника 4 від сигналу заповнення. Крім того, вимірювач опорного сигналу 7 видає інформацію про величину додаткової фази ξ , що залишилася після дискретної лічби.

Суматор 5 вважає кількість дискретних порцій фази та складаючи їх зі значенням додаткової фази ξ видає значення вимірюваної фази ϕ_0 . Для дослідження роботи блок-схеми фотополяметричного фазометра, можна використовувати пакет

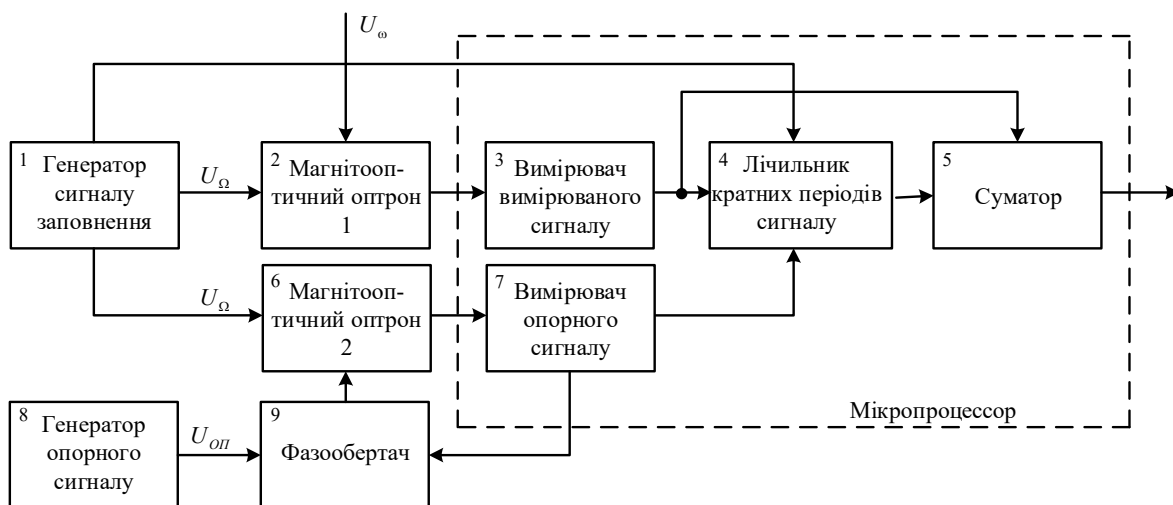


Рис. 7. Блок-схема фотополяриметричного фазометра

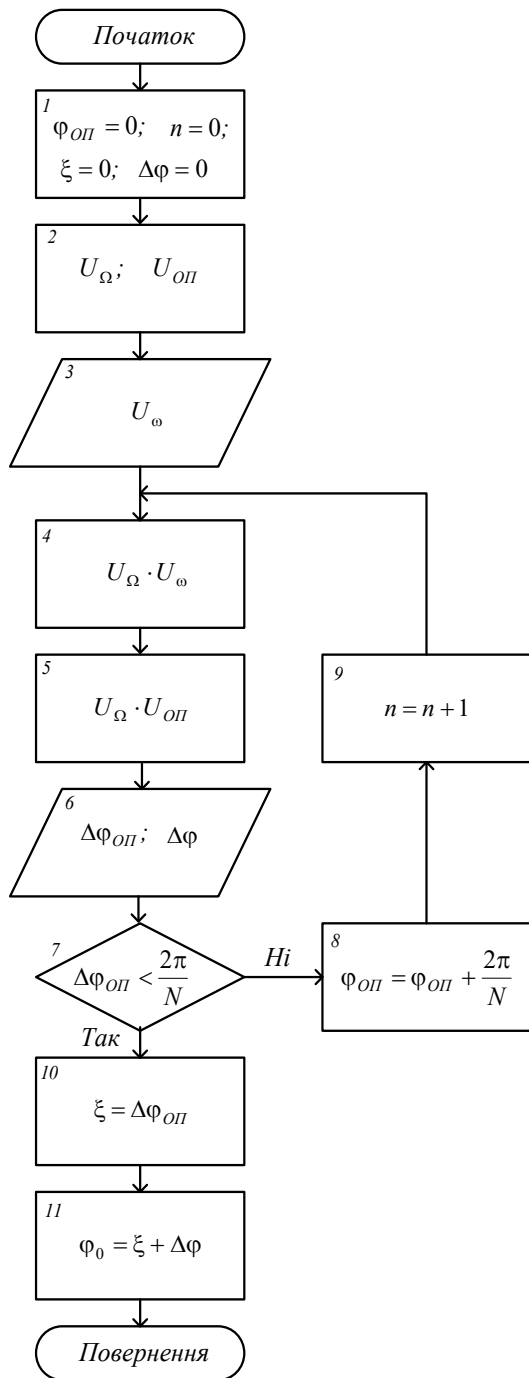


Рис. 8. Алгоритм роботи фотополяриметричного фазометра

System Identification Toolbox, який використовується для систем керування та обробки сигналів у часовій та частотній області [17].

Алгоритм роботи фотополяриметричного фазометра. Відповідно до викладеної вище теоретичної бази та розробленої блок-схеми приладу (рис. 7), складемо алгоритм роботи фотополяриметричного фазометра (рис. 8).

У блоці 1 відбувається обнулення початкової фази опорного сигналу $\phi_{оп}$ через фазообертач 9, вмісту n лічильника 4, додаткової фази (початкової фази сигналу заповнення) ξ , значення вимірюваної фази вимірювачем 3 $\Delta\phi$.

Блок 2 ілюструє генерацію опорного сигналу та сигналу заповнення генераторами 1 та 8 (рис. 7).

У блоці 3 проводиться завантаження сигналу з вимірюваною фазою U_{ω} .

Блоки 4 та 5 показують множення сигналів оптронами 2 та 6 (рис. 7).

Блок 6 здійснює вимірювання різниць фаз: опорного сигналу $\Delta\phi_{оп}$ та сигналу заповнення вимірювачем опорного сигналу 7; вимірюваного сигналу та сигналу заповнення $\Delta\phi$ вимірювачем вимірюваного сигналу 3.

Блок 7 здійснює порівняння поточної різниці $\Delta\phi_{оп}$ з кроком зміни різниці фаз $\frac{2\pi}{N}$.

У разі, якщо $\Delta\phi_{оп} > \frac{2\pi}{N}$, у блоці 8 відбувається збільшення значення фази опорного сигналу на величину $\frac{2\pi}{N}$ (додатковий поворот фази фазообертачем 9), а в блоці 9 збільшення вмісту лічильника 4 на 1.

Коли $\Delta\phi_{оп} < \frac{2\pi}{N}$, у блоці 10 визначається додаткова фаза ξ дорівнює поточній різниці фаз опорного сигналу і сигналу заповнення.

Блок 11 ілюструє роботу суматора 5 який проводить підсумовування значень додаткової фази ξ та вимірюваної фази $\Delta\phi$ та обчислює вимірювану початкову фазу сигналу. Далі цикл виміру повторюється.

Висновки. Застосування цього методу дозволить створювати прилади дуже високої точності, зокрема, на інфра- та низькому радіочастотному діапазонах. Це відкриває широке застосування для створення далекомірів, пеленгаторів, фазообертачів, аналізаторів спектру для використання в нових технологіях. Пропонований метод буде конкурентоспроможним методом множення частоти за чутливістю та може широко використовуватися у цифровій та обчислювальній техніці [5, 6, 11, 18, 19, 20].

Список літератури:

1. Радіотехніка. Енциклопедичний навчальний довідник / за ред. Ю. Л. Мороза, Є. А. Мачуського, В. І. Правди. Київ : Вища школа, 1999. 838 с.
2. Кононов В. Б., Кононова О. А., Кірвас В. В., Лозинська С. В. Дослідження вимірювання низьких частот // Системи озброєння і військова техніка. 2017. № 3. С. 62–67.

3. Грязнов М. И., Гуревич М. Л., Рябинин Ю. А. Измерение параметров импульсов. Москва : Радио и связь, 1991. 216 с.
4. Альошин Г. В. Ефективність інформаційно-вимірювальних радіотехнічних систем. Харків, ХУ ПС, 2005. 294 с.
5. Волосюк В. К., Нечипорук М. В., Павліков В. В. Радіотехнічні системи вимірювального типу : підручник. Харків : ХАІ, 2019. 117 с.
6. Осадчук В. С., Осадчук О. В., Жагловська О. М. Радіовимірювальні мікроелектронні перетворювачі потужності оптичного випромінювання з частотним виходом : монографія. Вінниця, ВНТУ, 2016. 167 с.
7. Автоматизація фазовимірювальних пристроїв і систем / Ю. О. Скрипник, О. П. Яненко, І. Ю. Скрипник, Л. О. Глазков. Київ : НМК ВО, 1992. 172 с.
8. Волосюк В. К., Павліков В. В., Жила С. С. Методы оптимальной обработки сигналов в пассивных радиометрических устройствах и системах : учеб. пособие. Харьков : ХАИ, 2014. 209 с.
9. Захаров И. П., Кукуш В. Д. Теория неопределенности в измерениях : учеб. пособие. Харьков : Консум, 2002. 256 с.
10. Гула І. В., Троцишин І. В., Войтюк О. П. Розробка методу вимірювання фазових зсувів сигналів // Вісник Хмельницької національного університету. Технічні науки. 2011. №5. С. 159–161.
11. Бабак В. П. Хандецький В. С., Шрюфер Е. Обробка сигналів. Київ : Либідь, 1996. 390 с.
12. Скрипеч А. В., Тронько В. Д., Слободян О. П. Фотополяриметричний спосіб вимірювання фази електричних сигналів інфра- та низькочастотного діапазонів. Автошляховик. Вісник Північного наукового центру Транспортної академії України. 2008. Вип. 11. С. 97–99.
13. Тронько В. Д., Шиманская Н. В. Оптрон. А. с. №531.031 от 12.02.1976.
14. Тронько В. Д., Скрипеч А. В., Слободян О. П., Оптоелектронний перетворювач спектра радіосигналу інфра- та низькочастотного діапазону. Автошляховик України. Окремий випуск. Вісник Північного наукового центру Транспортної академії України, 2006. Вип. 9. С. 154–158.
15. Дерюгин И. А., Кузнецов Ю. А., Тронько В. Д. Фотоэлектрический поляриметр инфракрасного диапазона. Оптика и спектроскопия. 1970. Вып. 2. С. 415–418.
16. Ванюрихин А. И., Кузнецов Ю. А., Майстренко В. Ф., Тронько В. Д. Регистрация угла плоскости колебания линейно поляризованного инфракрасного излучения. Опτικο-механическая промышленность. 1970. Вып. 8. С. 30–33.
17. Дьяконов В. П. MatLab 6.5 SP1/7+Simulink 5/6. Обработка сигналов и проектирование фильтров. Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. 576 с.
18. Антонов С. Н., Булюк А. Н., Котов В. М. Фарадеевский волоконно-оптический датчик магнитного поля. Квантовая электроника. 1991. №1. С. 139–141.
19. Портала О. Н., Халоян А. А., Божко З. В. Справочник Радиокomпоненты и материалы / под ред. Н. М. Корнильева. Киев : «Радиоаматор», 1998. 720 с.
20. Ландсберг Г. С. Оптика. Москва : Физматлит, 2010. 848 с.

Sibruk L.V., Slobodian O.P., Yenchев S.V. METHOD AND DEVICE FOR MEASURING THE INITIAL PHASE OF A HARMONIC RADIO SIGNAL BASED ON A MAGNETO-OPTICAL TRANSDUCER

The process of development of radio engineering devices and telecommunications over the past thirty years is closely connected with the growth of technologies, unprecedented in terms of pace and scale, in all spheres of human activity. According to the analysis, there is a problem that hinders the development of technology, signal spectrum conversion, signal measurement and processing, in particular, in the nodes of radio devices in which nonlinear elements and their characteristics are not sufficiently studied. One of these is an urgent scientific problem, which consists in the development of a method that makes it possible to measure the initial phase of a harmonic radio signal by developing methods for implementing such operations using a magneto-optical converter based on the Faraday effect. Analytical dependences describing the operation of the magneto-optical converter are analyzed. It is established that its hardware function has the property of signal multiplication. Based on this property, a method for measuring the initial phase of a harmonic radio signal and the design of a photopolarimetric phase meter are proposed. The phase measurement error was determined by the proposed method. The behavior of the output signal at the measurement points has been studied. The dependence of the amplitude of the output signal at the time of measurement of the initial phase is established. The potential accuracy of the proposed method is analyzed. To increase the accuracy, it is necessary to increase the signal filling frequency, that is, the phase quantization step. The effect of the noise level on the measurement accuracy is studied. The noise level is associated with fractional noise (photodetector) or generation-recombination (semiconductor photodetector) noise much more than thermal noise, a polarization

defect of the optical channel. A block diagram of a photopolarimetric phase meter is proposed. According to the above theoretical studies and the developed block diagram of the device, an algorithm for the operation of a photopolometric phase meter was compiled. The application of this method will make it possible to create devices of very high accuracy, in particular, in the infrared and low radio frequency ranges. This will open wide application for the creation of rangefinders, direction finders, phase shifters, spectrum analyzers for use in the latest technologies.

Key words: *initial phase, radio signal, magneto-optical converter, method, device.*

ІНФОРМАТИКА, ОБЧИСЛЮВАЛЬНА ТЕХНІКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ

УДК 004.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/10>

Гайдукевич С.В.

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

Семенова Н.П.

Відокремлений підрозділ Національного університету біоресурсів і природокористування України
«Бережанський агротехнічний інститут»

ІННОВАЦІЙНІ ТЕНДЕНЦІЇ ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЖИТТЯ ЛЮДЕЙ

У статті розглядаються інноваційні тенденції підвищення рівня життя людей завдяки впровадження в їх побут технологій Інтернету речей, що об'єднує інтелектуальні системи та пристрої, вимірювальні установки, датчики та виконавчі механізми, які здатні взаємодіяти між собою через існуючу інфраструктуру Інтернет. Застосування технологій Інтернет речей дозволяє підвищити рівень автоматизації. На прикладі розробленої системи проаналізовано переваги та недоліки інтелектуальної будівлі, рішення забезпечення комфортності людей, безпеку та охорону будівлі, ресурсо- та енергозбереження.

В статті акцентується, що Інтернет речей, впроваджений у повсякденне життя, є однією із основних тенденцій, що пропонує нові стандарти проживання та націлена на підвищення добробуту і комфортності людей.

Сучасний етап автоматизації побуту людей вимагає новітніх технологій та розробки нових інноваційних організаційно-економічних інструментів.

Розроблена система автоматизації домашнього побуту людей дає можливість розпізнавати конкретну ситуацію, що виникає в будівлі та контролювати функціонування інших систем за рахунок потоку інформації та розробленого алгоритму. Глобалізація, інтернетизація та інтелектуалізація є основою сучасної тенденції щодо автоматизації побуту людей для підвищення їх добробуту та зручності, зменшення часу на повсякденну роботу.

Існуючі системи, які забезпечують високий рівень безпеки і низький рівень енергоспоживання є дорогими і, як правило, не забезпечують достатню енергоефективність.

Проведено дослідження розробленої системи домашньої автоматизації з метою проведення необхідного налаштування складових установки, визначення можливості використання даних рішень та рівень ефективності впровадженні системи в побут людей.

Проаналізовано проблеми захисту інформації системи, адже така система може стати доступною для кіберзлочинців, які отримавши доступ до конфіденційної інформації, одержать доступ в керуванні системою, внаслідок чого можуть завдати великої шкоди.

Ключові слова: IoT-технології, домашня автоматизація, система керування.

Постановка проблеми. З розвитком цифрових пристроїв побут людей з кожним днем вдосконалюється. Системи домашньої автоматизації стрімко впроваджуються в усьому світі [1, 2]. Якщо донедавна поняття «розумний дім» це була часткова автоматизація побутових технологічних процесів, то на сьогодні в дане поняття входять такі технології як енергозбереження, обслуговування, захист, організація та формування економічного, зручного, екологічного, комфортного

житла людей. Так як кожна людина після важкого робочого дня хоче прийти у затишну оселю, де можна відпочити, насолодитися життям, а не перейматися повсякденними побутовими проблемами, такі як утеплення та опалення будівлі, кондиціонування, зволоження або осушення повітря, а також пошуками засобів з економії електроенергії. На сучасному етапі автоматизації побутового простору вимагається застосування новітніх проривних технологій та розроблення інновацій-

них організаційно-економічних інструментів, що спрямовані на забезпечення комфортності людей та створення нових засад для їх соціально-економічного розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний внесок у розвиток сучасних інтелектуальних будинків внесли такі науковці як: Роганов М.Л., Пархоменко А.В., Туленков А.В., Соколянський О.В., Залюбовський Я.І. та інші, які застосували інформаційно-комунікаційні технології досягли надзвичайно високих результатів. Задорожна Ю.А. ретельно охарактеризувала вплив Інтернету речей на автоматизацію побуту та підвищення рівня комфортності людей. Багато науковців, наприклад, Одаренко Р.С., Пробита Д.М., Третяк І.В. вважають, що Інтернет речей давно перестав бути концепцією. Тепер цей цікавий і перспективний технологічний тренд активно втілюється в життя [3, с. 107]. Сучасні технології настільки стрімко розвиваються, що вже не задовольняють потреби суспільства. Перед вітчизняними та зарубіжними науковцями підвищення комфортності людей залишається відкритим питанням. До сьогоднішнього дня немає стабільної методики інтелектуалізації, централізації та автоматизації побутового простору. А також немає чітких рекомендацій з використання програмних продуктів для підтримки всіх етапів життєвого циклу системи [4, с. 101], але попит породжує пропозиції [5, с. 153], так як сучасне життя висуває нові додаткові вимоги [6], а інновації вирішують широкий спектр питань, які розраховані на якісні зміни [7, с. 211], тому це питання на разі залишається актуальним та затребуваним.

Мета дослідження – розглянути основні тенденції вдосконалення житлово-побутових умов людей для забезпечення їх життя більш комфортним та зручним.

Виклад основного матеріалу. Новітні технології впроваджуються не тільки в промислових і сільськогосподарських господарствах, але останнім часом знайшли широке застосування в домашньому побуті. Одним з таких, відносно нових, явищ є впровадження технології інтернету речей (Internet of Things) [8, с. 161], скорочено IoT, що є одним із найбільш ефективних інструментів у досягненні нового рівня цифровізації [9, с. 142] і представляє собою міжмережеву взаємодію фізичних пристроїв, транспортних засобів, будівель й інших предметів, забезпечених електронікою, програмним забезпеченням, датчиками, актуаторами і мережевим підключенням [10, с. 116], які дають можливість цим інтелектуальним пристроям гене-

рувати, збирати, обробляти і передавати відповідну інформацію, інтегруючи через комп'ютерну систему завдяки мережі Інтернет.

Тобто основною тенденцією створення комфортного життя людей є впровадження інноваційних рішень у їх побут. Саме завдяки Smart-технологіям, які активно проникають в усі сфери життєдіяльності суспільства, можна досягти неймовірного розвитку побутового простору, що приводить до того, що спроектована будівля спроможна самостійно приймати рішення в кожній конкретній ситуації відповідно до змінюючих умов. Технології Інтернет речей поступово стають невід'ємною частиною нашого життя не тільки в побуті, а й в промисловості, енергетиці, економіці, сільськогосподарському виробництві і інших установах.

Сучасне «розумне» електрообладнання, телекомунікаційні, інформаційні та обчислювальні технології вдосконалюють процеси та їхні системи керування, які наділяються новими можливостями, а тим самим роблять їх ефективними, надійними, безпечними, спроможними економити електроенергію, що на сьогоднішній день так не маловажно [11, с. 79].

На сьогодні розроблено багато різноманітних систем домашньої автоматизації. Але існуючі на ринку системи, які забезпечують високий рівень безпеки і низький рівень енергоспоживання, є дорогими [12, с. 58], тим більше більшість виробників в своїй продукції не передбачають такої функції, як енергоефективність.

Тому враховуючи всі фактори на базі IoT технологій розроблено систему керування технологічними процесами житлової будівлі (рис. 1), де конвергуються такі концепції, як глобалізація та інтернетизація, що забезпечує керування наступними системами:

- створення оптимального мікроклімату;
- керування освітленням;
- управління побутовою технікою;
- керування електромережею;
- відеоспостереження та охорони;
- розваги;
- водопостачання.

Саме при використанні IoT, житлове приміщення перетворюється на систему, яка набуває здатності розпізнавати конкретні ситуації, що відбуваються в будинку, і відповідним чином на них реагувати [13, с. 199].

Система містить інтелектуальні пристрої та різного роду реле, наприклад, фірми Sonoff. Частиною «розумних» реле самостійно розроблено та виго-

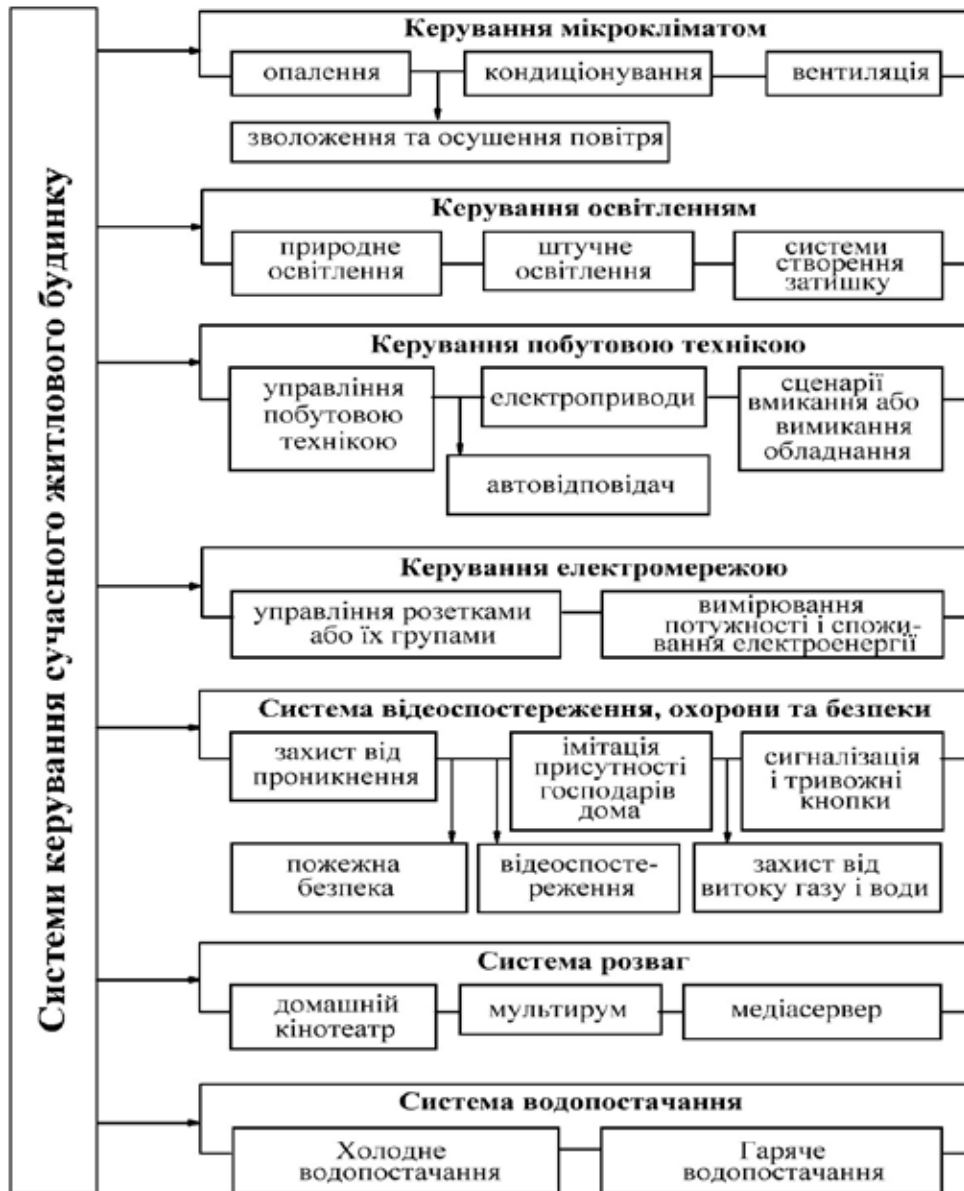


Рис. 1. Основні складові систем розробленої системи керування технологічними процесами житлової будівлі

товлено на базі багатofункціональної мікропроцесорної плати NodeMCU. Такі реле, порівняно з реле типу Sonoff, виконують набагато більше функцій, дешевші і мають можливість підключатися до резервної WiFi точки в разі недоступності головної WiFi мережі, оскільки при створенні прошивки, тобто написанні коду, можна запрограмувати різні додаткові та корисні функції.

Сходиною в еволюції [14] системи є підключення до соціальної мережі. Інтелектуальні пристрої, установки та виконавчі механізми, які підлягають керуванню підключаються до єдиної системи, що дозволяє обмінюватися інформацією в режимі реального часу. Тобто кожний пристрій

ідентифікується через вбудовану в нього обчислювальну систему. Ці взаємопов'язані пристрої мають можливість зчитування та приведення в дію, функцію програмування та ідентифікації, а також дозволяють мінімізувати участь людини, за рахунок використання інтелектуальних інтерфейсів [15, с. 84]. Розроблена система дозволяє керувати всіма інтелектуальними пристроями, з використанням віртуальної приватної мережі-VPN, дистанційно за допомогою смартфона, персонального комп'ютера, планшета та смарт-годинника через мережу Інтернет, яку ще називають глобальною інформаційною мережею (рис. 2). Налаштування системи виконується за допомогою бездротових



Рис. 2. Керування інтелектуальними пристроями через мережу Інтернет

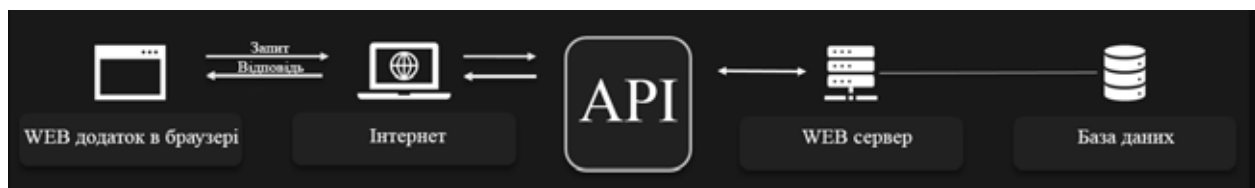


Рис. 3. Робота API

або жорстких систем. Зазвичай підключаються всі смарт-пристрої через спеціально розроблені для Інтернет речей протоколи: MQTT, ZigBee, Bluetooth, XMPP, DDS, AMQP, LwM2M. А також, для обміну інформацією між системою, датчиками, реле та іншими сервісами використовується інтерфейс прикладного програмування API - Application Programming Interface (рис. 3).

В якості безпроводного приймально-передатального елемента використано мережевий маршрутизатор, що підтримує мережеву структуру з IP відеокамерою та забезпечує зв'язок через мережу Інтернет з Web-сервісом у хмарному сервері [4, с. 103] та ZigBee міст, для зв'язку між пристроями які працюють через мережевий протокол ZigBee.

Всі «розумні» пристрої, окрім пристроїв, що розроблені та виготовлені власноруч, керуються за допомогою додатку eWeLink, який доступний для Android і iOS. Програму можна завантажити для iOS в App Store, а для Android в Google Play. Синхронізується статус пристроїв в режимі реального часу, в додатку Timing-Set доступні для вста-

новлення різноманітні таймери, тобто таймери зворотного відліку для ввімкнення та вимкнення у зазначений час. А також підтримується голосове керування та інтеграція з сервісами Amazon Alexa, Google Home. Так, як в додатку eWeLink недостатня функціональність, для створення повної автоматизації та обмежена кількість сервісів для інтеграції з іншими пристроями, тому розгорнуто сервер, на якому запущено систему Home Assistant, доступ до цієї системи можливий в локальній мережі та через інтернет. Для доступу через інтернет за допомогою сервісу ZeroTier налаштовано приватну віртуальну мережу, тобто VPN. Перевага віртуальної приватної мережі в тому, що така мережа має надійний кіберзахист, оскільки приховує від кіберзлочинців весь трафік та з'єднання з системою.

Для збирання інформації, відслідковування за процесами та моніторинку історії усіх керованих показників розроблена система укомплектована рядом різноманітних датчиків, а саме:

- освітлення, що вмикає освітлювальні пристрої з настанням сутінок при 5–10 люкс., при

необхідності можна контролювати освітленням в реальному часі;

- датчик руху, що дозволяє вмикати освітлення при виявленні в приміщенні руху;
- датчики температури, що контролюють температуру в приміщеннях і зовнішнього середовища;
- датчики вологості, що контролюють вологість в приміщеннях;
- датчик тиску.

Система дозволяє, при необхідності, вимикати будь-який із датчиків і відповідно управління виконавчими механізмами виконується в ручному режимі. Система може працювати за прописаними алгоритмами (сценаріями, скриптами та автоматизаціями).

Досліджуючи розроблену систему з метою налагодження і її експлуатації було проведено аналіз і обробку результатів експериментальних даних в режимі реального часу з огляду на конкретну ситуацію для виявлення слабких сторін, визначено ефективності впровадження автоматичної системи керування електроприборами житлового будинку, досліджено її роботу з метою проведення необхідного налаштування складових установок, досліджено перехідні процеси з дистанційним керуванням.

Фактично це апаратно-програмна система, яка здатна забезпечити:

- гнучкість, що дозволяє перелаштовувати систему в залежності від конкретної ситуації;
- широкі межі керування;
- контролювання керованих параметрів, що здійснюється за допомогою різноманітних датчиків;
- багатofункціональність, що систематизує прописуванню різноманітних сценаріїв;

- моніторинг історії всіх контролюючих величин;
- в автоматичному режимі збір та обробку інформації про енергію, потужність і інші параметри, що мінімізує витрати з метою підвищення ефективності;

– в рамках надійності передбачено самовідновлення та самодіагностування системи;

– зручне керування, що виконується дистанційно з персонального комп'ютера або смартфона;

- стабільність роботи, тобто вихід з ладу будь якого пристрою не впливає на роботу всієї системи;
- забезпечення безпеки та охорони будинку.

Система представляє собою постійний потік інформації між користувачем та інтелектуальними пристроями, виконавчими механізмами та іншими предметами, що забезпечені цифровою системою (рис. 4).

Користувач на блок інтерфейс користувача подає запит на зміну режиму роботи, цей сформований запит на встановлення режиму роботи передається на блок локального серверу, де проходить генерування, збір, обробка і передача відповідної інформації та запитів. Блок локального серверу через блок комутації інтелектуальних пристроїв безперервно взаємодіє з інтелектуальними пристроями, одержуючи інформацію про їх стан і роботу та надсилаючи запити на встановлення відповідних режимів роботи. Блок комутації інтелектуальних пристроїв безпосередньо контролює роботу інтелектуальних пристроїв та надає команди на ввімкнення чи вимкнення відповідного пристрою та збирає інформацію про їх стан. Вся інформація про стан пристроїв та системи з блоку локального серверу моніториться на панелі керування, які спеціально розроблені на

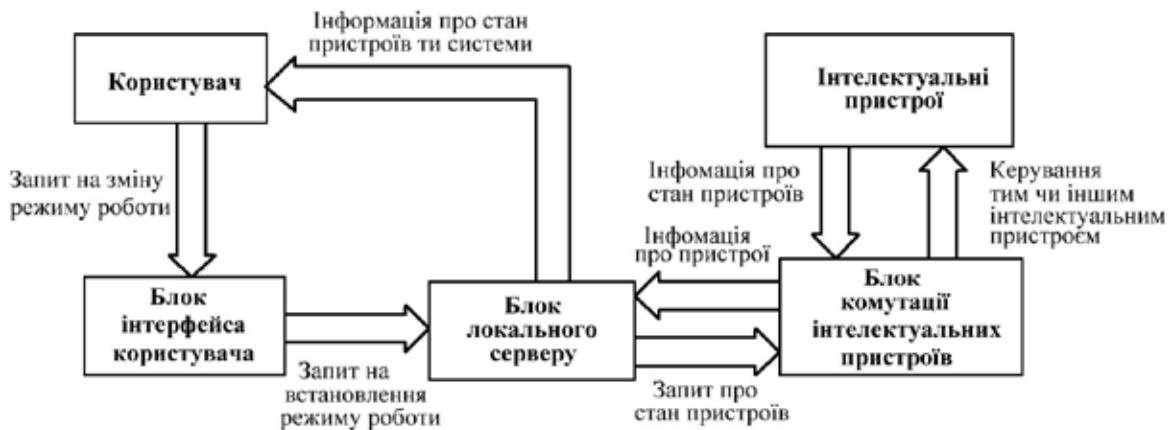


Рис. 4. Діаграма потоку інформації

персональному комп'ютері чи смартфоні користувача (рис. 5).

В будь-який момент часу можна вивести на екрані керування пристроями, показники з датчиків в реальному часі, а також можна переглянути історію будь-якого контролюючого показника (рис. 6). Тобто функціональність системи забезпечується інформаційно-комунікаційними технологіями, реалізація яких дозволяє:

- зменшити витрати електроенергії;
- забезпечити високу ступінь захисту;
- розширити номенклатуру контролюючих і виконавчих пристроїв.

Питання енергозбереження на сьогоднішній день дуже важливе. За допомогою розробленої системи автоматизації домашнього побуту можна економити витрати електроенергії за рахунок:

1. Адаптування освітлення в залежності від умов дня;
2. Використання освітлення тільки за потреби;
3. Адаптування опалення та охолодження приміщень, тобто зменшення потужності наванта-

ження при відсутності людей в будівлі, або в нічний час;

4. Використання альтернативних джерел енергії (сонячні панелі або вітрогенератори), тобто розроблена система має можливість вибирати в який час можна використовувати вироблену енергію, а коли енергію з мережі;

5. Використання приладів тільки за потреби;

6. Використання електроенергії переважно в нічний час, коли її тариф дешевший.

Актуальність розробленої системи проявляється в тому, що передбачено керування голосовими командами, що підвищує рівень автоматизації побутового простору розширюючи його функції.

Розроблена система надійно забезпечує безпеку житлової будівлі від непередбачених обставин, а також від злодіїв. Для цього передбачені наступні компоненти: камера відеоспостереження; датчики руху; датчик входу; датчик розбиття скла; сигналізація; клавіатура (для контролю сигналізацією); детектор диму та чадного газу; датчик витоку води.

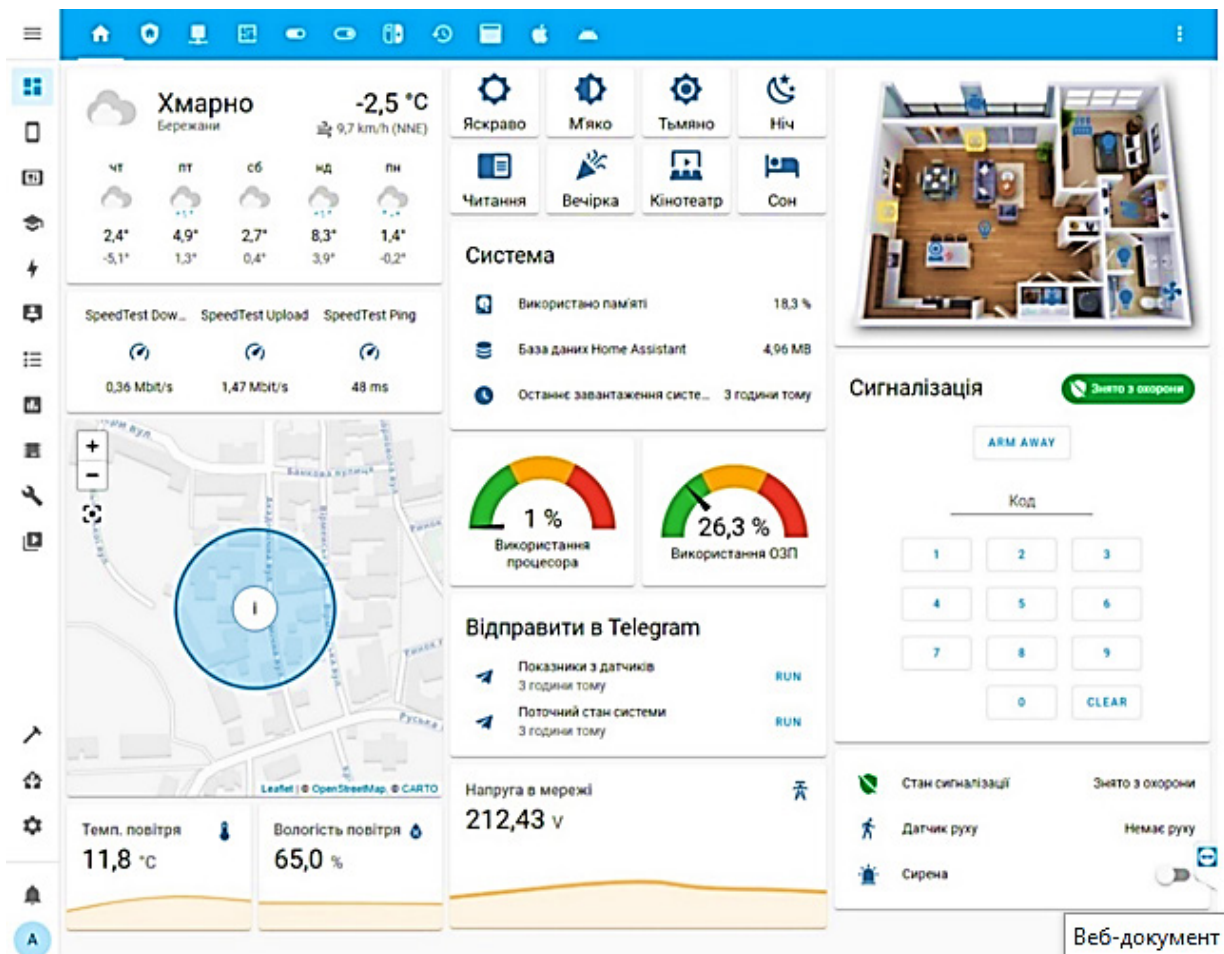


Рис. 5. Керування розумними пристроями

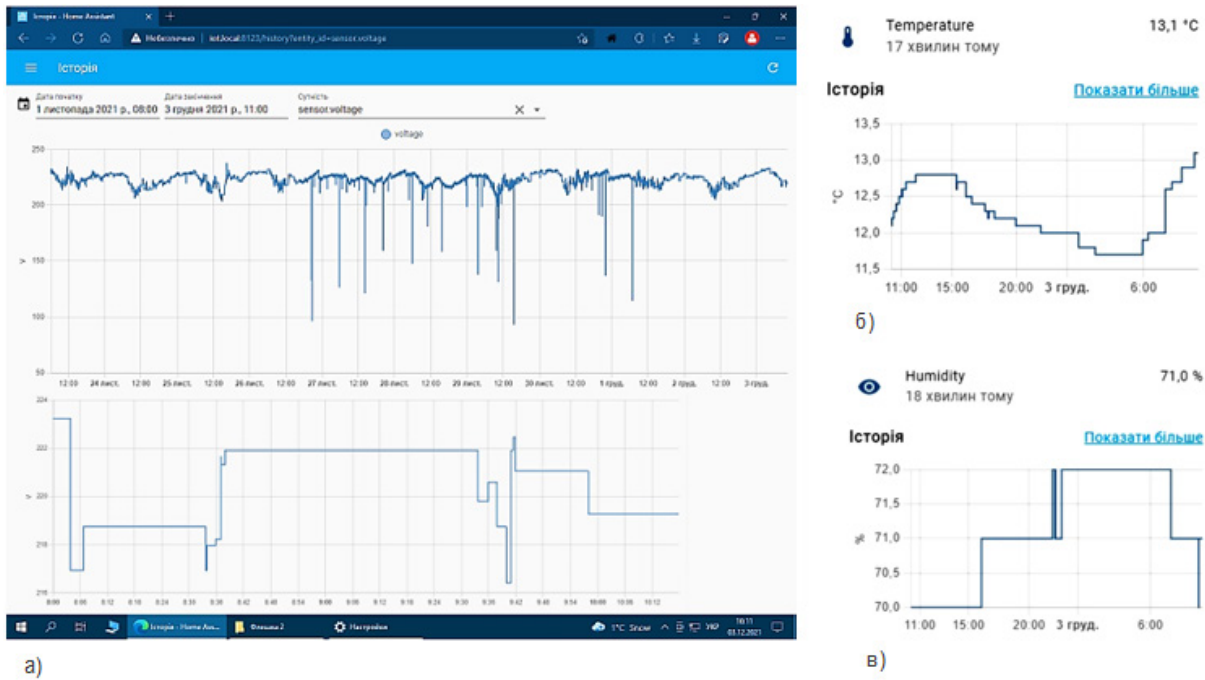


Рис. 6. Графіки історії показників:
 а) напруги; б) температури; в) вологості

Наприклад, при проникненні невідомої особи в будівлю система блокує вікна і двері, спрацьовує сигналізація і подається інформація про проникнення на смартфон користувача, камера відео-спостереження постійно записує відео на відеореєстратор та хмарне сховище, при необхідності може надсилати з камери фотографії та короткі фрагменти відео користувачу, коли під час охорони спрацював будь-який датчик руху, датчик входу чи датчик розбиття скла. При появі диму в будівлі чи пожежі система при потребі може автоматично вмикати вентиляцію та за допомогою електроприводу відкривати вікна/двері, а також відправляється інформація, яка поступає на всі пристрої користувачів (персональний комп'ютер, планшет, смартфон, смарт-годинник та навіть може відображатися в системі автомобіля), у випадку затоплення будівлі автоматично перекривається загальний кран водопостачання, а сигнал про аварійну ситуацію поступає на пристрій користувача, наприклад на смартфон. Якщо виникла ситуація, що господар забув закрити вікно, або залишив його відчиненим для провітрювання приміщення то при зміні погодних умов вікно закривається за допомогою електроприводу. Користувач незалежно від його географічного розташування може переглядати історію будь-якого з пристроїв та вносити зміни в керуванні цими пристроями (рис. 7).

До недоліків системи можна віднести складність в налаштуванні, оскільки дуже часто пристрої програмуються і сама система налаштову-

ється за допомогою кількох мов програмування та низький рівень захисту деяких пристроїв при підключенні до мережі Інтернет, оскільки пристрої системи постійно збирають і обробляють інформацію про навколишнє середовище, то вони в кінцевому результаті можуть бути небезпечними для користувача. Фундамент безпеки інтернету речей складається з чотирьох частин: безпека зв'язку, захист пристроїв, контроль пристроїв і контроль взаємодії в мережі [16]. На даний час вже існують деякі правила та засоби для підвищення та встановлення надійного кіберзахисту системи від зловмисників. Науковці активно працюють над питаннями захисту системи від різноманітних атак, що спрямовані на порушення обміну даних між пристроями та відмову в обслуговуванні.

Висновки. Розроблена система реалізуючи інформаційно-комунікаційні технології вирішує найважливішу проблему сьогодення, як енергозбереження, підвищення енергоефективності, створення комфорту побутового простору.

За рахунок IoT технологій система працює як єдиний злагоджений механізм і відноситься до більш високого класу кіберфізичних систем, що містить в собі інтелектуальні пристрої з вбудованими сенсорами та програмним забезпеченням.

А саме головне, що розроблена система автоматизації домашнього побуту набагато дешевша, та може виконувати значно більше функцій, ніж ті, що пропонуються відомими фірмами.

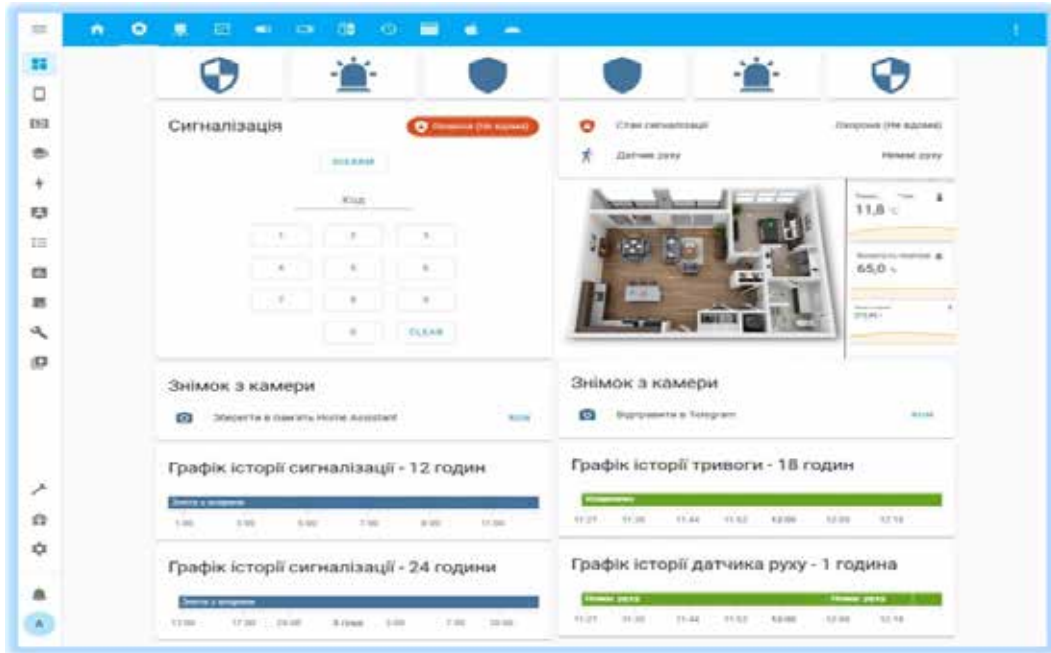


Рис. 7. Історія системи безпеки

Список літератури:

1. Rucinski A., Garbos R., Jeffords J., Chowdbury S. Disruptive innovation in the era of global cyber-society: with focus on Smart city efforts. Proceedings of the International conference on *Intelligent data acquisition and advanced computing systems: Technology and applications*. Bucharest, Romania, 2017. pp. 1102-1104.
2. Pavithra D., Balakrishnan R. IoT based Monitoring and control system for home automation. *Proceedings of the Global conference on communication technologies (GCCT)*. 2015. pp. 169-173.
3. Одарченко Р. С., Пробита Д. М., Третяк І. В. Основні засади функціонування технології Li-Wi в концепції IoT. *Науковий журнал «Технічні науки»*, 2017. № 2 (34). С. 107-113.
4. Пархоменко А.В., Туленков А.В., Соколянський О.В., Залюбовський Я.І. Інтелектуальне середовище системи домашньої автоматизації. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*, 2020. № 1(30). С. 101-111.
5. Топорков В.Г., Матвіїва К.В. Smart-квартири – сучасний тренд. *Архітектурний вісник КНУБФ. Теорія та історія архітектури*. 2018. Вип. 14-15. С. 153-157.
6. Ковалевська О.П. Житлові умови в системі характеристик якості життя. Електронний журнал «Державне управління: удосконалення та розвиток», 2011. № 3. Режим доступу: <http://www.dy.nayka.com.ua/?op=1&z=475#>
7. Гудзь О.С. Провайдинг технологічних інновацій: стратегії та механізми. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України*. Серія: Техніка та енергетика АПК. 2015. Вип. 226. С.211-221.
8. Бабійчук В.С., Шуміло І.А. Інтернет речей: нові напрями модернізації Законодавства. *Експерт: парадигми юридичних наук і державного управління*. 2020. № 6(12). С. 159-166.
9. Самойленко М.Ю. Принципи застосування технології Інтернет речей у сучасному світі техніки. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2020. Том 31 (70). ч. 1. № 6. С. 142-148.
10. Праворська Н.І. Розробка моделі елементів інтернету речей для контролю параметрів навколишнього середовища. *Вісник Хмельницького національного університету*, 2019, № 6 (279). С. 116-119.
11. Гайдукевич С.В., Семенова Н.П., Леськів Я.А. Концепції «Smart технологій» та їх застосування в приміщеннях закритого ґрунту. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського*. 2022. Том 33 (72) № 2. С. 78-83.
12. Ковівчак Я.В., Дубук В.І., Слюсар В.В. Розробка інформаційної системи управління електроживленням у розумному будинку. *Науковий журнал «Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво»*. Луцьк, 2021. Вип. № 42. С. 58-64.
13. Задорожна Ю.А. Автоматизація житлових приміщень з використанням технології IoT та концепції Smart home. *Фундаментальні та прикладні проблеми сучасних технологій: матеріали Міжнародної науково-технічної конференції*. Тернопіль, 2018. С. 199.

14. Нічепорук А. О., Нічепорук А. А., Савенко О. С., Казанцев А. Д. Інтелектуальна система виявлення аномалій та ідентифікації пристроїв розумних будинків із застосуванням колективної комунікації. *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. 2021. № 34 (110). Режим доступу: <file:///C:/Users/Svitlana/Desktop/3196-Article%20Text-2350-1-10-20210904.pdf>

15. Пулеко І.В., Супруненко О.О. Система IoT-обладнання для тепличного господарства. *Інформаційно-комп'ютерні технології 2019: матеріали X Міжнародної науково-технічної конференції* (18-20 квітня 2019 р., м. Житомир). Державний університет «Житомирська політехніка», 2019 р. С. 84-85.

16. Савченко К.В., Вишньовський В.В., Войтович О.П. Загрози Технології Іо. [Електронний ресурс]: матеріали XLVII науково-технічної конференції підрозділів ВНТУ. (14-23 березня, 2018 р., м. Вінниця). 2018. Режим доступу: <https://ir.lib.vntu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/20557/4396.pdf?sequence=3&isAllowed=y>.

Haidukevych S.V., Semenova N.P. INNOVATIVE TENDENCIES IN IMPROVING THE STANDARD OF PEOPLE'S LIVING

The article examines innovative trends in improving the standard of living of people thanks to the introduction of Internet of Things technologies into their lives, which unites intelligent systems and devices, measuring devices, sensors and executive mechanisms that are able to interact with each other through the existing Internet infrastructure. Application of the Internet of Things technology allows to increase the level of automation. Using the example of the developed system, the advantages and disadvantages of an intelligent building, solutions for ensuring people's comfort, safety and security of the building, resource and energy saving are analyzed.

The article emphasizes that the Internet of Things, introduced into everyday life, is one of the main trends that offers new standards of living and is aimed at improving people's well-being and comfort.

The modern stage of automation of people's lives requires the latest technologies and the development of new innovative organizational and economic tools.

The developed home automation system of people makes it possible to recognize a specific situation that occurs in the building and control the functioning of other systems due to the flow of information and the developed algorithm. Globalization, Internetization, and intellectualization are the basis of the modern tendency to automate people's lives to increase their well-being and convenience, and reduce time spent on daily work.

Existing systems that provide a high level of security and a low level of energy consumption are expensive and, as a rule, do not provide sufficient energy efficiency.

A study of the developed home automation system was carried out in order to carry out the necessary adjustment of the components of the installation, to determine the possibility of using these solutions and the level of efficiency in the implementation of the system in people's lives.

The problems of system information protection are analyzed, because such a system can become available to cybercriminals who, having gained access to confidential information, gain access to system management, as a result of which they can cause great damage.

Key words: *IoT technologies, home automation, control system.*

Гнатчук Є.Г.

Хмельницький національний університет

Засорнова І.О.

Хмельницький національний університет

Рей К.С.

Хмельницький національний університет

СИСТЕМА ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ ПРО МОЖЛИВІСТЬ ВАКЦИНАЦІЇ ВІД COVID-19

Проведений огляд відомих систем підтримки прийняття рішення про вакцинацію від COVID-19 показав, що інструменти підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації від COVID-19 наразі відсутні. Хоча відомі системи мають чималий потенціал для галузі охорони здоров'я та в боротьбі з пандемією COVID-19, але ці системи не враховують правових норм жодної країни і не забезпечують формування висновку про можливість вакцинації від COVID-19 на основі наявних правових норм.

В статті проведено моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19, яке є теоретичним підґрунтям для формування опитувальника для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, для організації аналізу відповідей цієї людини, а також для підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Розроблено опитувальник для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19 з врахуванням чинних правових норм України, а також розроблено правила для аналізу відповідей на питання для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19. Розроблені правила дають можливість сформулювати множини медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються протипоказання до вакцинації від COVID-19, які є підставами для прийняття рішення про можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19.

Спроектовано систему підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19, згідно із якою людина, яка планує вакцинуватись, автоматично та безкоштовно може визначити можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19 на основі чинних в Україні правових норм, тобто може самостійно прийняти обґрунтоване рішення щодо вакцинації від COVID-19. Наразі пропонується система підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19 базується на чинних правових нормах України, але її можна адаптувати до правових норм будь-якої іншої країни шляхом проведення аналізу цих правових норм, доповнення або зміни опитувальника, а також доповнення та зміни правил для аналізу відповідей на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19.

Ключові слова: вакцинація від COVID-19, можливість вакцинації від COVID-19, протипоказання до вакцинації від COVID-19, опитувальник для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19, система підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення автоматизованої підтримки прийняття рішень у галузі охорони здоров'я стає все більш актуальною зі збільшенням інформаційного навантаження на лікаря, розвитком комп'ютерних технологій. Системи підтримки прийняття клінічних рішень надають особам, які приймають рішення, функціональні можливості для використання різноманітної інформації, яка є підґрунтям для прийняття рішень. Саме системи підтримки прийняття клінічних рішень можуть допомогти пом'якшити тиск, який відчувають працівники

галузі охорони здоров'я, звести до мінімуму ймовірність лікарських помилок і допомогти надати ефективну допомогу незалежно від поточного навантаження на медичний заклад. Система підтримки прийняття клінічних рішень значно економить гроші, час і репутацію медичного закладу та його співробітників [1, 2].

З початку 2020 року галузь охорони здоров'я зіткнулась із серйозним викликом – пандемією COVID-19, яка спричиняє чималу смертність населення, а також руйнує економіку країн світу. Найбільш дієвим інструментом для стримування

пандемії стала вакцинація проти COVID-19. Проте висока швидкість виготовлення вакцин та їх прискорене схвалення, погана апробація та слабкі лабораторні дослідження вакцин, відсутність даних клінічних випробувань щодо безпеки та ефективності вакцин, погане самопочуття в багатьох людей після отримання вакцини, невідомі наслідки вакцинації для здоров'я в довгостроковій перспективі, невизначеність щодо ефективності проти різних штамів COVID-19, неадекватна інформація та презентація вакцинації в соціальних мережах – фактори, які гальмують вакцинацію населення і ускладнюють прийняття рішення про можливість вакцинації від COVID-19, особливо для людей з хронічними захворюваннями, незважаючи навіть на високий рівень смертності. При прийнятті рішення про можливість вакцинації від COVID-19 українцям варто знати медичні протипоказання та застереження щодо вакцинації, встановлені чинним законодавством України (медичні протипоказання та застереження описані авторами у [3]).

Отже, при прийнятті рішення про можливість вакцинації від COVID-19 людина може самостійно вивчити відповідні законодавчі акти і прийняти таке рішення або звернутись до сімейного лікаря, який знов-таки повинен володіти нормами закону і взяти на себе відповідальність прийняти рішення про можливість вакцинації. Третім шляхом є використання системи підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19, яка надає висновок про можливість вакцинації від COVID-19 на основі наявних правових норм і сприяє тим самим самостійному прийняттю рішення людиною та зменшенню навантаження на сімейного лікаря (щонайменше усуваючи необхідність вивчення сімейним лікарем чинних правових норм щодо вакцинації).

Отже, усунення необхідності вивчення людиною та сімейними лікарями законодавчих актів щодо вакцинації за рахунок розроблення системи підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19 наразі є *актуальною проблемою*.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведемо огляд відомих систем підтримки прийняття рішення про вакцинацію від COVID-19.

У дослідженні [4] пропонується система підтримки прийняття рішень, яка об'єднує геоінформаційні системи, методи моделювання та аналітики для розробки інструменту для пріоритетного розподілу вакцин проти COVID-19 у великих містах.

У [5] розроблено байєсовську мережу для поєднання та ефективного обміну доказами щодо

ризиків і переваг вакцини AstraZeneca, для консолідації доказів щодо переваг і ризиків вакцини AstraZeneca, щодо оцінки ризику розвитку тромбозу та тромбоцитопенічного синдрому після вакцини AstraZeneca.

У [6] проведено огляд спільного прийняття рішень та використання засобів допомоги пацієнтам у прийнятті рішень, які дозволяють пацієнтам подолати вагання щодо вакцинації проти COVID-19 та значно підвищити рівень впевненості в прийнятті рішень.

Автори [7] пропонують спільне прийняття рішень на основі інструментів, пов'язаних із допоміжними засобами для прийняття рішень, які допомагають пацієнтам зробити усвідомлений вибір щодо вакцинації вакциною Comirnaty від Pfizer-BioNTech.

У статті [8] пропонується прототип багатокритеріальної моделі підтримки прийняття рішень на основі цільового програмування, яка може ефективно підтримувати плани вакцинації з урахуванням мінімізації ризику поширення хвороби та кількості летальних випадків.

Основним внеском дослідження [9] є використання алгоритму машинного навчання для проведення та пріоритетної класифікації вакцинації проти COVID-19, для прогнозування пріоритетів вакцини проти COVID-19.

Автори [10] пропонують систему підтримки прийняття рішень з використанням багатоагентного програмованого середовища моделювання NetLogo. Ця система базується на застосуванні методів штучного інтелекту, моделюванні різних стратегій вакцинації, використанні генетичних алгоритмів для розробки найкращих критеріїв вакцинації та для надання пропозицій щодо більш ефективної політики.

Постановка завдання. Проведений огляд відомих систем підтримки прийняття рішення про вакцинацію від COVID-19 показав, що інструменти підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації від COVID-19 наразі відсутні. Хоча відомі системи мають чималий потенціал для галузі охорони здоров'я та в боротьбі з пандемією COVID-19, але ці системи не враховують правових норм жодної країни і не забезпечують формування висновку про можливість вакцинації від COVID-19 на основі наявних правових норм.

Тоді *метою нашого дослідження* є проектування системи підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації від COVID-19. Пропонована система на основі правдивих відповідей людини, яка планує вакцинуватись, на питання

системи про її анамнез формуватиме висновки про можливість або протипоказання до вакцинації. Основним завданням при проектуванні такої системи є формування опитувальника для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, а також аналіз відповідей цієї людини на питання системи, на основі яких і приймається рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Виклад основного матеріалу дослідження. Для формування опитувальника для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, та для аналізу відповідей цієї людини на питання потрібно спочатку виконати моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Нехай $RCIQS$ – множина медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються можливість або протипоказання вакцинації від COVID-19 (така множина може складатись з одного елементу або бути порожньою).

Для формування висновку про протипоказання до вакцинації від COVID-19 обов'язковою умовою є наявність медичних протипоказань, визначених у [3], тому *критерій наявності протипоказань до вакцинації від COVID-19* має вигляд:

- якщо $RCIQS = \emptyset$, то вакцинація від COVID-19 можлива;
- якщо $RCIQS \neq \emptyset$, то наявні протипоказання до вакцинації від COVID-19.

Враховуючи визначені у [3] наявні медичні протипоказання до вакцинації проти COVID-19, *множина протипоказань до вакцинації проти COVID-19* має наступний вигляд:

$$CIQS = \{ails, cdhs, macp, pgnt, lctn, vcid, tbif, hidv, tcp, mcpc, opct, opic, imdy, arar, aics\} \quad (1)$$

де *ails* – гостра хвороба з підвищенням температури понад 38,0°C, *cdhs* – COVID-19 в анамнезі, *macp* – лікування моноклональними антитілами або реконвалесцентною плазмою, *pgnt* – вагітність, *lctn* – лактація, *vcid* – нещодавнє введення вакцин проти інших інфекційних хвороб, *tbif* – проба з туберкуліном або аналіз крові вивільнення інтерферону- γ , *hidv* – вірус імунодефіциту людини, вірус гепатиту С, вірус гепатиту В, *tcp* – тромбоз та/або тромбоцитопенія, *mcpc* – міокардит та/або перикардит, *opct* – онкопатологія з аlogenною або аутогенною трансплантацією або клітинною терапією, *opic* – онкопатологія з перебуванням на курсі інтенсивної цитотоксичної хіміотерапії, *imdy* – імунодефіцит, *arar* – алергічна та/або анафілактична реакція на компоненти вакцини в анамнезі, *aics* – аутоімунні стани.

Враховуючи розроблені критерій наявності протипоказань до вакцинації від COVID-19

та множину протипоказань до вакцинації проти COVID-19 (формула (1)), виконаємо моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Якщо $RCIQS$ – множина медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються протипоказання до вакцинації проти COVID-19 (така множина може складатись з одного елементу або бути порожньою), то *загальне правило для прийняття рішення про можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19* має вигляд:

$$\begin{aligned} & \text{Якщо } RCIQS = \emptyset, \\ & \text{то вакцинація проти COVID-19 можлива,} \\ & \text{інакше наявні протипоказання до вакцинації від COVID-19,} \end{aligned} \quad (2)$$

Проведене моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19 є теоретичним підґрунтям для формування опитувальника для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, для організації аналізу відповідей цієї людини, а також для підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Враховуючи результати проведеного у [3] аналізу правових норм вакцинації від COVID-19, а також проведене моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19, розробимо опитувальник для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, і опишемо процес формування множини медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються протипоказання до вакцинації від COVID-19.

Опитувальник для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19:

1. Чи маєте Ви зараз гостру хворобу з підвищенням температури понад 38,0 °C?
2. Чи маєте Ви COVID-19 в анамнезі?
3. Чи проходить Ви лікування моноклональними антитілами або реконвалесцентною плазмою?
4. Чи наявна у Вас зараз вагітність?
5. Чи наявна у Вас зараз лактація?
6. Чи мали Ви нещодавнє введення вакцин проти інших інфекційних хвороб?
7. Чи проходили Ви нещодавно пробу з туберкуліном або аналіз крові вивільнення інтерферону- γ ?
8. Чи маєте Ви вірус імунодефіциту людини, вірус гепатиту С або В?
9. Чи хворієте Ви на тромбоз та/або тромбоцитопенію?
10. Чи хворієте Ви на міокардит та/або перикардит?

11. Чи маєте Ви онкопатологію з алогенною або аутогенною трансплантацією або клітинною терапією?

12. Чи маєте Ви онкопатологію з перебуванням на курсі інтенсивної цитотоксичної хіміотерапії?

13. Чи маєте Ви імунodefіцит?

14. Чи маєте Ви алергічну та/або анафілактичну реакцію на компоненти вакцини в анамнезі?

15. Чи наявні у Вас аутоімунні стани?

На кожне із запитань опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19 передбачено відповідь «так» або «ні».

Правила для аналізу відповідей на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19:

1. Якщо обрано відповідь «так» на перше запитання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *ails*

2. Якщо обрано відповідь «так» на друге запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *cdhs*

3. Якщо обрано відповідь «так» на третє запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *tascp*

4. Якщо обрано відповідь «так» на четверте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *pgnt*

5. Якщо обрано відповідь «так» на п'яте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *lctn*

6. Якщо обрано відповідь «так» на шосте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *vcid*

7. Якщо обрано відповідь «так» на сьоме запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *tbif*

8. Якщо обрано відповідь «так» на восьме запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *hidv*

9. Якщо обрано відповідь «так» на дев'яте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *ttcp*

10. Якщо обрано відповідь «так» на десяте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *msrc*

11. Якщо обрано відповідь «так» на одинадцяте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *opct*

12. Якщо обрано відповідь «так» на дванадцяте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *opіc*

13. Якщо обрано відповідь «так» на тринадцяте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *imdy*

14. Якщо обрано відповідь «так» на чотирнадцяте запитання, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *arar*

15. Якщо обрано відповідь «так» на п'ятнадцяте запитання опитувальника, то в множині *RCIQS* заноситься елемент *aіcs*

Отже, розроблено опитувальник для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19 з врахуванням чинних правових норм України, а також розроблено правила для аналізу відповідей на питання для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19. Розроблені правила дають можливість сформувати множині медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються протипоказання до вакцинації від COVID-19, які є підставами для прийняття рішення про можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19.

Структура системи підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19 представлено на рис. 1.

Отже, спроектовано систему підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19, згідно із якою людина, яка планує вакцинуватись, автоматично та безкоштовно може визначити можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19 на основі чинних в Україні правових норм, тобто може самостійно прийняти обґрунтоване рішення щодо вакцинації від COVID-19. Наразі пропонована система підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19 базується на чинних правових нормах України, але її можна адаптувати до правових норм будь-якої іншої країни шляхом проведення аналізу цих правових норм, доповнення або зміни опитувальника, а також доповнення та зміни правил для аналізу відповідей на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19.

Розглянемо *приклад роботи системи підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19*. Особа1, яка хоче вакцинуватись, дала правдиві відповіді на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19.

Особа1 дала наступні відповіді на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19: 1. Ні; 2. Ні; 3. Ні; 4. Ні; 5. Ні; 6. Ні; 7. Ні; 8. Так; 9. Ні; 10. Ні; 11. Ні; 12. Ні; 13. Ні; 14. Так; 15. Ні.

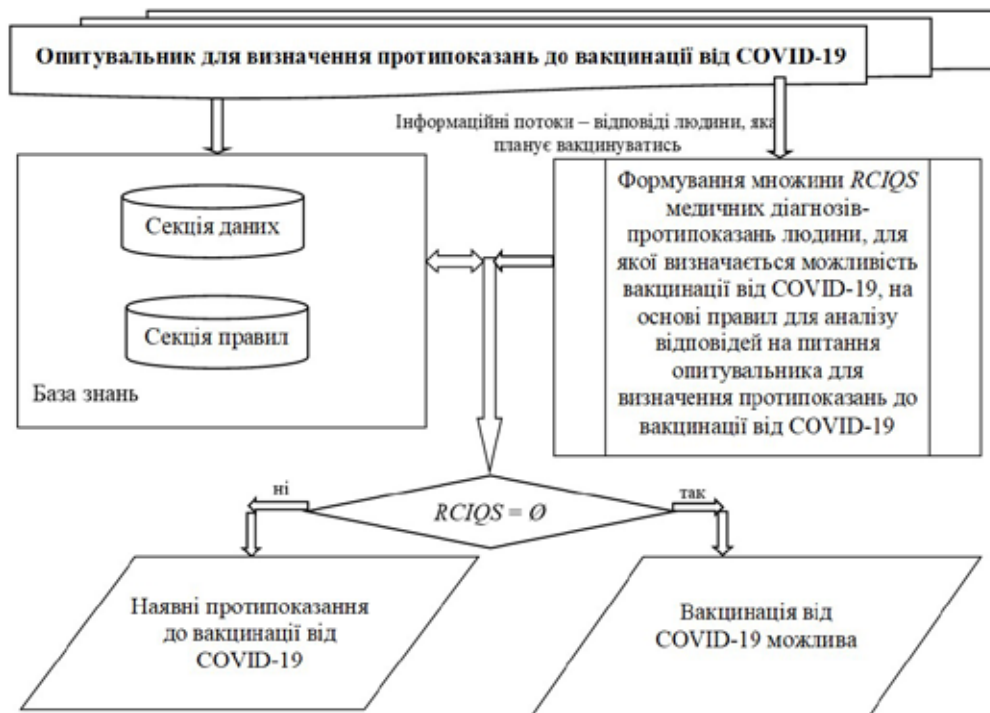


Рис. 1. Структура системи підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19

Враховуючи надані відповіді, множина $RCIQS_i = \{hidv, arar\}$. Оскільки множина $RCIQS_i \neq \emptyset$, то Особі1 система надала висновок про протипоказання до вакцинації від COVID-19. Особа1, проаналізувавши отриманий висновок, прийняла рішення відтермінувати вакцинацію від COVID-19.

Висновки. Проведений огляд відомих систем підтримки прийняття рішення про вакцинацію від COVID-19 показав, що інструменти підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації від COVID-19 наразі відсутні. Хоча відомі системи мають чималий потенціал для галузі охорони здоров'я та в боротьбі з пандемією COVID-19, але ці системи не враховують правових норм жодної країни і не забезпечують формування висновку про можливість вакцинації від COVID-19 на основі наявних правових норм.

В статті проведено моделювання процесу підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19, яке є теоретичним підґрунтям для формування опитувальника для збору інформації про людину, яка планує вакцинуватись, для організації аналізу відповідей цієї людини, а також для підтримки прийняття рішення про можливість вакцинації проти COVID-19.

Розроблено опитувальник для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19

з врахуванням чинних правових норм України, а також розроблено правила для аналізу відповідей на питання для визначення протипоказань до вакцинації проти COVID-19. Розроблені правила дають можливість сформувати множину медичних діагнозів-протипоказань людини, для якої визначаються протипоказання до вакцинації від COVID-19, які є підставами для прийняття рішення про можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19.

Спроековано систему підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19, згідно із якою людина, яка планує вакцинуватись, автоматично та безкоштовно може визначити можливість або протипоказання до вакцинації від COVID-19 на основі чинних в Україні правових норм, тобто може самостійно прийняти обґрунтоване рішення щодо вакцинації від COVID-19. Наразі пропонована система підтримки прийняття рішень про можливість вакцинації від COVID-19 базується на чинних правових нормах України, але її можна адаптувати до правових норм будь-якої іншої країни шляхом проведення аналізу цих правових норм, доповнення або зміни опитувальника, а також доповнення та зміни правил для аналізу відповідей на питання опитувальника для визначення протипоказань до вакцинації від COVID-19.

Список літератури:

1. Khairat S., Marc D., Crosby W., Sanousi A. Reasons for Physicians Not Adopting Clinical Decision Support Systems: Critical Analysis. *JMIR Medical Informatics*. 2018. Vol. 6. Issue 2. Paper Number e24.
2. Bogdan M. Clinical Decision Support Systems: Do They Enhance Care and Cut Costs? Web-site. URL: <https://kindgeek.com/blog/post/clinical-decision-support-systems-do-they-enhance-care-and-cut-costs> (Last accessed: January 25, 2023).
3. Hnatchuk Ye., Herts A., Misiats A., Hovorushchenko T., Kant Singh K. Covid'19 Vaccination Decision-Making Method and Subsystem Based on Civil Law. *CEUR-WS*. 2022. Vol. 3156. Pp. 262-273.
4. Shahparvari S., Hassanizadeh B., Mohammadi A., Kiani B., Lau K., Chhetri P., Abbasi B. A decision support system for prioritised COVID-19 two-dosage vaccination allocation and distribution. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*. 2022. Vol. 159. Paper Number 102598.
5. Mayfield H., Lau C., Sinclair J., Brown S., Baird A., Litt J., Vuorinen A., Short K., Waller M., Mengersen K. Designing an evidence-based Bayesian network for estimating the risk versus benefits of AstraZeneca COVID-19 vaccine. *Vaccine*. 2022. Vol. 40. Issue 22. Pp. 3072-3084.
6. Scalia P., Durand M., Elwyn G. Shared decision-making interventions: An overview and a meta-analysis of their impact on vaccine uptake. *Journal of Internal Medicine*. 2022. Vol. 291. Issue 4. Pp. 408-425.
7. Vincent Y., Frachon A., Allaire A., Boussageon R., Pouchain D., Ferrat E., Rat C. Development of a patient decision aid for COVID-19 vaccination with the Comirnaty vaccine. *Family Practice*. 2022. Vol. 39. Issue 3. Pp. 486-492.
8. Asllani A., Trimi S. COVID-19 vaccine distribution: exploring strategic alternatives for the greater good. *Service Business*. 2022. Vol. 16. Pp. 601-609.
9. Romeo L., Frontoni E. A Unified Hierarchical XGBoost model for classifying priorities for COVID-19 vaccination campaign. *Pattern Recognition*. 2022. Vol. 121. Paper Number 108197.
10. Sulis E., Terna P. An Agent-based Decision Support for a Vaccination Campaign. *Journal of Medical Systems*. 2021. Vol. 45. Issue 11. Paper Number 97.

Hnatchuk Ye.H., Zasornova I.O., Rei K.S. DECISION-MAKING SUPPORT SYSTEM ABOUT THE POSSIBILITY OF VACCINATION AGAINST COVID-19

The paper simulates the process of supporting decision-making about the possibility of vaccination against COVID-19, which is a theoretical basis for the formation of a questionnaire for collecting information about a person who plans to be vaccinated, for organizing the analysis of the answers of this person, as well as for supporting decision-making about the possibility of vaccination against COVID-19.

A questionnaire was developed to determine contraindications to vaccination against COVID-19, taking into account the current legal norms of Ukraine, as well as rules were developed to analyze the answers to questions to determine contraindications to vaccination against COVID-19. The developed rules make it possible to form a set of medical diagnoses-contraindications of a person for whom contraindications to vaccination against COVID-19 are determined, which are grounds for making a decision about the possibility or contraindications to vaccination against COVID-19.

A support system for decision-making about the possibility of vaccination against COVID-19 has been designed, according to which a person who plans to be vaccinated can automatically and free of charge determine the possibility or contraindications to vaccination against COVID-19 based on the legal norms in force in Ukraine, that is, he can independently make an informed decision regarding vaccination against COVID-19. Currently, the proposed support system for decision-making about the possibility of vaccination against COVID-19 is based on the current legal norms of Ukraine, but it can be adapted to the legal norms of any other country by conducting an analysis of these legal norms, supplementing or changing the questionnaire, as well as supplementing and changing the rules to analyze answers to questionnaire questions to determine contraindications to vaccination against COVID-19.

Key words: *vaccination against COVID-19, possibility of vaccination against COVID-19, contraindications to vaccination against COVID-19, questionnaire to determine contraindications to vaccination against COVID-19, decision-making support system about the possibility of vaccination against COVID-19.*

Гоменюк С.І.

Запорізький національний університет

Козуб В.Ю.

Луганський національний університет імені Тараса Шевченка

ПАРАЛЛЕЛЬНИЙ АЛГОРИТМ ФОРМУВАННЯ МАТРИЦІ ЖОРСТКОСТІ СКІНЧЕННОГО ЕЛЕМЕНТА

У статті досліджуються проектні розрахунки конструкцій, що потребують всебічного аналізу процесів деформування під дією експлуатаційних навантажень. Для розв'язання таких задач зазвичай використовуються чисельні методи, з яких найбільш поширеним є метод скінченних елементів. Точність методу визначається розмірністю розрахункових сіток. Крім того, в розрахункових схемах одночасно можуть використовуватися різні типи скінченних елементів. Одним з етапів розв'язування задач є формування матриць жорсткості скінченних елементів. Причому для елементів одного типу використовуються обчислення за однаковою процедурою і кількість таких обчислень зумовлює час розв'язування задачі. У традиційному підході ці обчислення виконуються послідовно. Для невеликого розміру розрахункових схем достатньо час розв'язування є незначним. У випадку великих розмірів сіток кількість та час розрахунків збільшуються, що потребує оптимізації обчислень з використанням алгоритмів паралельних обчислень. Для паралелізації методу скінченних елементів потрібно організувати управління роботою достатньо великої кількості процесів, упорядкувати обмін даними між процесорами. При виконанні обчислень виникають затримки, зумовлені незавершеністю виконання деяких етапів усіма процесорами. Найповільніша задача з тих, що виконуються паралельно, визначає час виконання програми. При формуванні матриць жорсткості виникає необхідність проводити інтегрування по області скінченного елемента. При використанні моментної схеми скінченних елементів переміщення і деформації апроксимуються однаковими поліномами, що спрощує обчислення інтегралів. Ця процедура закінчується формуванням блоку матриці жорсткості, причому для сусідніх скінченних елементів цей блок є частково спільним. У системі із загальною пам'яттю обмін інформацією між процесорами відбувається за допомогою змінних, що зберігаються в загальній пам'яті. Для забезпечення детермінованості виконання програми реалізовано поступове розпаралелювання програми. Розроблено алгоритми паралельного програмування для побудови матриць жорсткості скінченних елементів та розрахунку напружено-деформованого стану для пакету програм «МІРЕЛА+». Паралельна обробка даних реалізована за допомогою бібліотеки OpenMP, що забезпечує більшу швидкість розробки через зручність використання. На основі обчислювальних методів експериментів встановлено використання алгоритмів паралельних обчислень на початку розв'язування задач традиційними скінченноелементними алгоритмами для великорозмірних сіток.

Ключові слова: метод скінченних елементів, матриця жорсткості, паралельні обчислення, OpenMP, напружено-деформований стан.

Постановка проблеми. Традиційна процедура побудовання матриць жорсткості скінченних елементів має матричне формулювання та зводиться до обчислення інтегралів від функцій, що задані в місцевій системі координат [1, 2]. Інтеграли обчислюються за допомогою квадратурних процедур, які потребують великої кількості одноманітних розрахунків, що значно збільшує час розв'язування задач. Для розрахункових сіток великих розмірів час рішення задачі складається з етапів формування матриці жорсткості та розв'язування системи алгебраїчних рівнянь. Прискорення виконання цих етапів дозволить

зменшити затрати машинного часу. Одним з підходів до прискорення обчислень є використання паралельних алгоритмів [3, 4].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання в високопродуктивних комп'ютерів для проектних розрахунків конструкцій дозволяє цей процес значно прискорити за рахунок паралелізації обчислень. Для підвищення продуктивності паралелізації методу скінченних елементів використовуються різні підходи. Одними з таких способів є методи, що базуються на використанні блочних алгоритмів прямих методів дослідження та розв'язування систем лінійних алгебраїчних

рівнянь з розрідженими симетричними матрицями (стрічковими, профільними, блочно-діагональними) [5-8]. Такі підходи потребують ефективних методів забезпечення передобумовленості матриць системи, що іноді ставить нетривіальні завдання.

Інші підходи спрямовані на дослідження ефективності декомпозиції розрахункової області [9-10]. За методами декомпозиції задача розділяється на декілька підзадач меншої розмірності, розв'язання яких можна виконати паралельно. При чому можна використати відповідні методи рішення систем рівнянь [11-13]. Метод декомпозиції передбачає різні підходи до розділення на підобласті та способами моделювання контакту поверхонь між собою. В кожному випадку необхідно формулювати додаткові граничні умови та формувати розрахункову сітку скінченних елементів на кожній області окремо.

Метою роботи є розробка паралельного алгоритму побудови матриць жорсткості скінченних елементів.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо побудову матриць жорсткості скінченного елемента з кубічною апроксимацією переміщень на основі моментної схеми скінченних елементів [14].

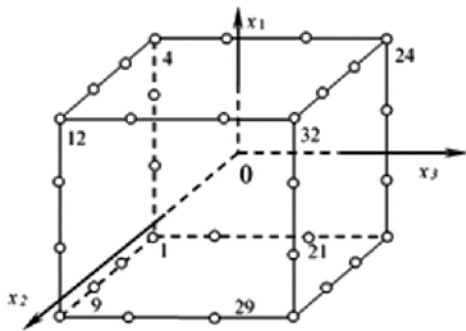


Рис. 1. Кубічний скінченний елемент

Нехай задано глобальну декартову систему координат z_i . Для описання властивостей скінченного елемента розглянемо місцеву систему координат x_i , в якій координати точок скінченного елемента лежать межах від -1 до +1. Переміщення за об'ємом скінченного елемента серендипова сімейства апроксимуємо у вигляді:

$$u_k = \sum_{pqr}^{lmn} \omega_k^{(pqr)} \psi^{(pqr)} \quad (1)$$

де ω_k – коефіцієнти розкладання, $\psi^{(pqr)}$ – набір степеневих функцій виду:

$$\psi^{(pqr)} = \frac{x_1^p x_2^q x_3^r}{p! q! r!} \quad (2)$$

де $(p=0,1,2,3; q=0,1,2,3; r=0,1,2,3)$ – степені апроксимації за відповідними напрямками координат.

Для координатних функцій справедливе співвідношення диференціювання:

$$\partial^{(\alpha+\beta+\gamma)} \psi^{(pqr)} = \psi^{(p-\alpha q-\beta r-\gamma)}, \quad (3)$$

де α, β, γ – порядок похідних.

На основі розподілу переміщень отримуємо розподіл похідних функцій переміщень:

$$\begin{aligned} u_{k,1} &= \sum_{p=1}^3 \sum_{q=0}^3 \sum_{r=0}^3 \omega_k^{(pqr)} \psi^{(p-1qr)}; \\ u_{k,2} &= \sum_{p=0}^3 \sum_{q=1}^3 \sum_{r=0}^3 \omega_k^{(pqr)} \psi^{(pq-1r)}; \\ u_{k,3} &= \sum_{p=0}^3 \sum_{q=0}^3 \sum_{r=1}^3 \omega_k^{(pqr)} \psi^{(pqr-1)}. \end{aligned} \quad (4)$$

Варіацію δW енергії пружної деформації для СЕ приймаємо у вигляді:

$$\delta W = \iiint_V \sigma^{ij} \delta \varepsilon_{ij} dv. \quad (5)$$

Компоненти тензора пружних напружень приймаємо у вигляді закону Гука:

$$\sigma^{ij} = 2\mu g^{ik} g^{jl} \varepsilon_{kl} + \lambda \theta g^{ij}, \quad (6)$$

де μ, λ – коефіцієнти Ляме; g^{ij} – компоненти метричного тензора;

θ – функція зміни об'єму.

Представимо компоненти тензора деформацій ε_{ij} в вигляді розкладання в ряд Маклорена [14-16]:

$$\varepsilon_{ij} = \sum_{s=0}^{L_{ij}} \sum_{t=0}^{M_{ij}} \sum_{g=0}^{N_{ij}} e_{ij}^{(stg)} \psi^{(stg)}. \quad (7)$$

Коефіцієнти розкладання $e_{ij}^{(pqr)}$ визначимо згідно з моментною схемою скінченних елементів за формулами [14]:

$$\begin{aligned} e_{11}^{(pqr)} &= \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_s^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p+1-\mu q-\nu r-\eta)}^s; \\ e_{22}^{(pqr)} &= \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_s^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu q+1-\nu r-\eta)}^s; \\ e_{33}^{(pqr)} &= \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \omega_s^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu q-\nu r+1-\eta)}^s; \\ e_{12}^{(pqr)} &= \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_s^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu+1q-\nu r-\eta)}^s + \omega_s^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p-\mu q-\nu+1r-\eta)}^s \right); \\ e_{13}^{(pqr)} &= \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_s^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu+1q-\nu r-\eta)}^s + \omega_s^{(\mu+1\nu\eta)} b_{(p-\mu q-\nu r-\eta+1)}^s \right); \\ e_{23}^{(pqr)} &= \frac{1}{2} \sum_{\mu\nu\eta}^{pqr} \left(\omega_s^{(\mu\nu\eta+1)} b_{(p-\mu q-\nu+1r-\eta)}^s + \omega_s^{(\mu\nu+1\eta)} b_{(p-\mu q-\nu r-\eta+1)}^s \right); \\ b_{(\mu\nu\eta)}^s &= \left. \frac{\partial^{(\mu+\nu+\eta)} z_s}{\partial x_1^\mu \partial x_2^\nu \partial x_3^\eta} \right|_{x_1=x_2=x_3=0}. \end{aligned} \quad (8)$$

де
$$b_{(\mu\nu\eta)}^s = \frac{\partial^{(\mu+\nu+\eta)} z_s}{\partial x_1^\mu \partial x_2^\nu \partial x_3^\eta} \Big|_{x_1=x_2=x_3=0}$$

Функцію змінення об'єму представимо також у вигляді ряду [16]:

$$\theta = \sum_{\alpha=0}^{l-1} \sum_{\beta=0}^{m-1} \sum_{\gamma=0}^{n-1} \xi^{(\alpha\beta\gamma)} \psi^{(\alpha\beta\gamma)}, \quad (9)$$

де коефіцієнти розкладання $\xi^{(\alpha\beta\gamma)}$ визначаються співвідношенням:

$$\xi^{(\alpha\beta\gamma)} = \frac{\partial^{(\alpha+\beta+\lambda)} u_{i,j} g^{ij}}{\partial x_1^\alpha \partial x_2^\beta \partial x_3^\gamma} \Big|_{x_1=x_2=x_3=0}, \quad (10)$$

Аналіз кожної з компонент $e_{ij}^{(pqr)}$ показав, що деякі коефіцієнти $u_i^{(pqr)}$ не входять до розкладання для апроксимації переміщень. Ті коефіцієнти деформацій $e_{ij}^{(pqr)}$, які містять хоча б один з членів, відсутній в (4), повинні бути опущені в розкладанні. Таким чином встановлюється відповідний зв'язок між коефіцієнтами $e_{ij}^{(pqr)}$ та $u_i^{(pqr)}$. Для апроксимаційних поліномів встановлюється співвідношення для інших компонент тензора деформацій.

Підставляючи (8), (9) у варіацію енергії пружної деформації отримуємо:

$$\delta W = \iiint_V \{\delta e\}^T \{\psi_{(ij)}\} 2\mu g^{ik} g^{jl} \{\psi_{(kl)}\}^T \{e_{kl}\} dV + \iiint_V \{\delta \xi\}^T \{\psi_{(\theta)}\} \lambda g^{ij} \{\psi_{(\theta)}\}^T \{\xi\} dV \quad (11)$$

$$\delta W = \{\delta e_{ij}\}^T [H^{ijkl}] \{e_{kl}\} + \{\delta \xi\}^T [H^\theta] \{\xi\},$$

де $[E^{ijkl}] = \int_- \int_1^1 \int 2\mu \{\psi_{(ij)}\} g^{ik} g^{jl} \{\psi_{(kl)}\}^T \sqrt{g} dx_1 dx_2 dx_3;$

$$[E^\theta] = \int_- \int_1^1 \int \lambda \{\psi_{(\theta)}\} g^{ij} \{\psi_{(\theta)}\}^T \sqrt{g} dx_1 dx_2 dx_3; \quad (12)$$

Враховуючи зв'язок коефіцієнтів розкладання компонентів тензора деформацій та вектора переміщень рівняння (11) має вигляд:

$$\delta W = \delta \{\omega_s\}^T [F_{ij}^s]^T [H^{ijkl}] [F_{kl}^t] \{\omega_t\} + \delta \{\omega_s\}^T [F_{(\theta)}^s]^T [H^{(\theta)}] [F_{(\theta)}^t] \{\omega_t\} \quad (13)$$

Для побудови матриці жорсткості необхідно перейти у виразі (13) від коефіцієнтів ω_s до значень переміщень у вузлах скінченного елемента. Між вузовими функціями форми та степеневими функціями для скінченного елемента існує простий зв'язок, який можна виразити у матричній формі

$$N_L = \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_L^{ijk} \psi^{ijk}.$$

Переміщення довільної точки елемента:

$$u_i = \sum_{s=1}^n u_i^s \sum_{i=0}^3 \sum_{j=0}^3 \sum_{k=0}^3 a_s^{ijk} \psi^{ijk}.$$

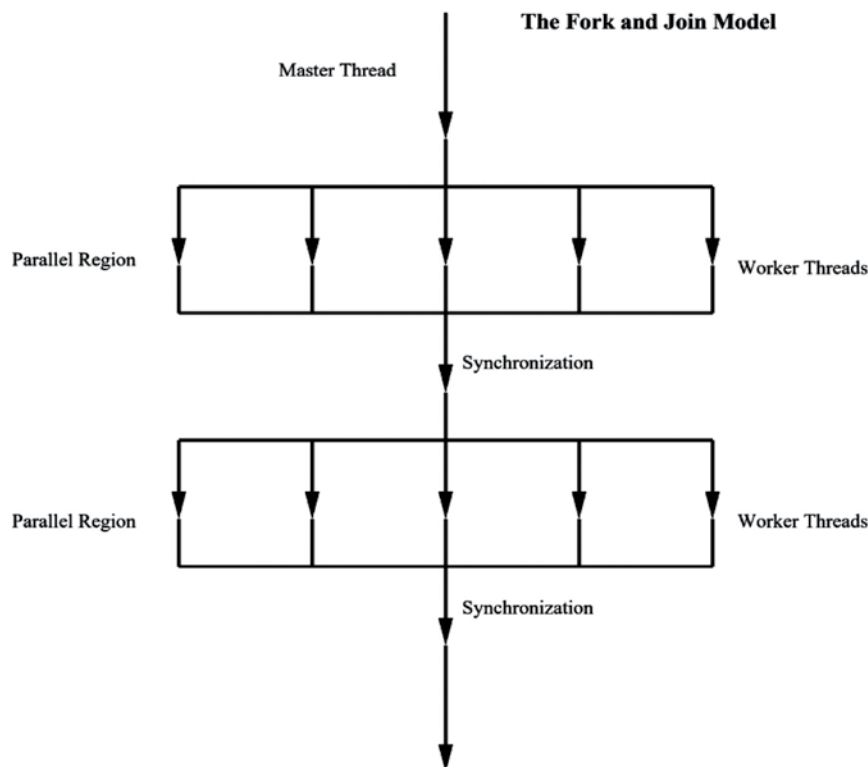


Рис. 2. Модель Fork and Join

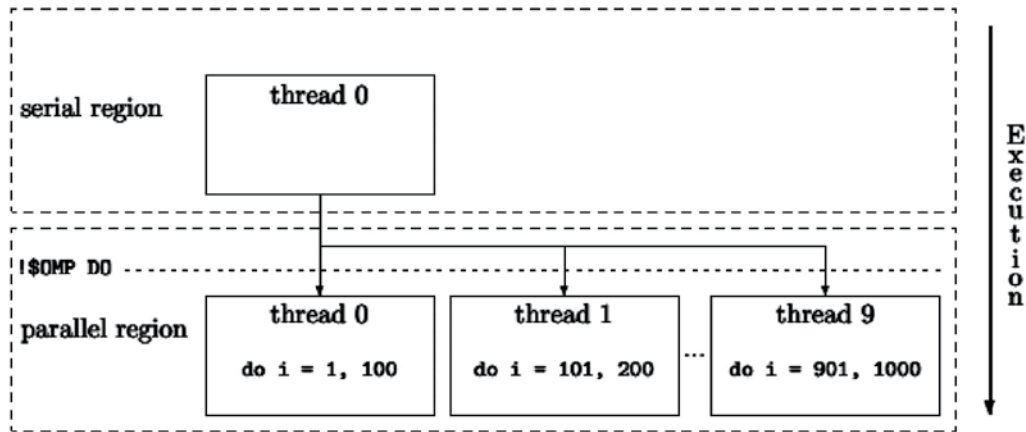


Рис. 3. Графічне зображення загального принципу роботи директиви !\$OMP DO!\$OMP END DO

З урахуванням зв'язку між коефіцієнтами розкладання по степеневим функціям для деформацій, вузлових переміщень та функції зміни об'єму варіація енергії деформування набуде вигляду:

$$\delta W = \delta\{u_s\}^T [K^{st}] \{u_t\} + \delta\{u_s\}^T [K_\delta^{st}] \{u_t\}.$$

Для визначення матриці жорсткості необхідно обчислити інтеграли що входять в рівняння (11), (12). Цю процедуру можна виконати за паралельним алгоритмом.

Для побудови паралельного алгоритму використано бібліотеку OpenMP. OpenMP являє собою набір директив компілятора, процедур та змінних середовища, призначених для паралельного програмування на машинах зі спільною пам'яттю. Паралельне виконання за моделлю Fork and Join лягає в основу архітектури бібліотеки (рис. 2).

Усі програми OpenMP починаються як єдиний процес, який називається головним потоком. Цей головний потік виконується послідовно доки не зустрінеться паралельна область. У цей момент головний потік «розгалужується» на кілька паралельних робочих потоків. Інструкції в паралельній області виконуються групою робочих потоків. У кінці паралельної області потоки синхронізуються та об'єднуються в єдиний головний потік. Щоб максимізувати продуктивність об'єднано вкладені цикли обчислення інтегралу. Потік керування для циклу додає накладні витрати на необхідну логіку. Об'єднання вкладених циклів в один цикл зменшує ці витрати.

```
!$OMP PARALLEL
!$OMP DO
do 12121 ijk=1,kt123
IK=MOD((ijk-1)/KT2/KT3,KT1)+1
```



Рис. 4. Порівняння швидкості виконання для сіток з різною кількістю скінченних елементів

```
JK=MOD((ijk-1)/KT3,KT2)+1
KK=MOD((ijk-1),KT3)+1
```

```
....
12121 CONTINUE
!$OMP END DO
!$OMP END PARALLEL
```

Пара директив !\$OMP DO!\$OMP END DO забезпечують паралельне виконання циклу. Таким чином цикл do-loop розподіляється між різними потоками: кожен потік обчислює свою частину ітерацій. Наприклад, якщо використовується 10 потоків, то, як правило, кожен потік виконує обчислення 100 ітерацій циклу do-loop: потік 0 обчислює від 1 до 100, потік 1 від 101 до 200 і так далі (рис. 3).

В якості прикладу для перевірки та тестування представлено розрахунок квадратної тришарової плити під дією нормального навантаження, прикладеного до верхньої поверхні плити

$$p_3^{(n)} = \bar{p}_3^{(n)} \sin(\pi x_1/a) \sin(\pi x_2/a).$$

Відносний розмір у плані $a/h=7$, де h – загальна товщина пакета шарів. На бічних гранях плити задовольняються граничні умови типу Нав'є, яким у рамках побудованих моделей відповідають шарнірно рухливе закріплення контуру. Кожний шар являє собою композитний матеріал, армований односпрямованими волокнами. У зовнішніх шарах ($k = 1, 3$) напрямок волокон збігається з віссю x_l , механічні й теплофізичні характеристики наступні:

$$E_1 = 172 \cdot 10^3 \text{ МПа}; E_2 = E_3 = 6,9 \cdot 10^3 \text{ МПа}; G_{12} = G_{13} = 3,45 \cdot 10^3 \text{ МПа}; \\ G_{23} = 1,38 \cdot 10^3 \text{ МПа}; \nu_{21} = \nu_{31} = \nu_{23} = 0,25.$$

Характеристики внутрішнього шару ($k = 2$) виходять заміною нижніх індексів $1 \leftrightarrow 2$, тобто в цьому шарі волокна орієнтовані під кутом 90° до осі x_l . Товщина внутрішнього шару $h_2 = 0,5 h$, товщини зовнішніх шарів $h_1 = 0,4h$, $h_3 = 0,1h$.

Для розрахунку використано обчислювальний комплекс «МІРЕЛА+» із застосуванням моментної схеми скінченних елементів. Тестування виконувалось на пристрої з Intel i7-9750H (6 ядер та 12 потоків) та 16 ГБ RAM.

На рис. 4 представлено порівняльні результати обчислень, де t_0 – час розрахунку за традиційною схемою, t – час роботи з паралельним алгоритмом.

Висновки. Розроблена методика формування матриць жорсткості на основі використання паралельних обчислень інтегральних квадратурних складників дозволяє прискорити процес розв'язування задач механіки конструкцій. Використання системи паралельних обчислень на основі схеми зі спільною пам'яттю підвищує ефективність розробленого пакету прикладних програм «МІРЕЛА+».

Список літератури:

1. Бурман З.И., Артюхин Г.А., Зархин Б.Я. Программное обеспечение матричных алгоритмов и метода конечных элементов в инженерных расчетах. М.: Машиностроение. 1988. 256 с.
2. Воеводин В.В. Математические модели и методы в параллельных процессах. М.; Наука, 1986. 296 с.
3. Ортега Дж. Введение в параллельные и векторные методы решения линейных систем. М.; Мир, 1991. 368 с.
4. Are Magnus Bruaset, Aslak Tveito. Numerical Solution of Partial Differential Equations on Parallel Computers. Springer Berlin Heidelberg, 2006.
5. Жданов А.И., Богданова Е.Ю. Об одной вычислительной реализации блочного метода Гаусса-Зейделя. *Вестн. Сам. гос. тех. ун-та. Сер. Физ.-мат. науки.* 2016. Т. 20, № 4. С. 730-738.
6. Wriggers P. Computational Contact Mechanics. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag. 2006. 520 p.
7. Попов А.В. Параллельные алгоритмы решения линейных систем с разреженными симметричными матрицами. *Проблеми програмування.* 2008. № 2-3. С. 111-118.
8. Исследование некоторых параллельных алгоритмов решения задач линейной алгебры на MIMD-компьютерах / Зубатенко В.С., Майстренко А.С., Молчанов И.Н. и др. *Искусственный интеллект.* 2006. № 3. С. 129-138.
9. C. Vollaire, L. Nicolas and A. Nicolas. Parallel computing for the Finite element method. *Eur. Phys. J. Appl. Physics.* 1998. 1(03). P. 305-314.
10. Каропова Е.Д., Шайдунов В.В., Вдовенко М.С. Параллельные реализации метода конечных элементов для краевой задачи для уравнений мелкой воды. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Математическое моделирование и программирование».* 2009. Т. 17(150), вып. 3. С. 73-85.
11. Matteo Frigo, Steven G. Johnson. FFTW Home Page. 1997. URL: <http://www.fftw.org>.
12. P. Jarzebski, K. Wisniewski, R. L. Taylor. On parallelization of the loop over elements in FEAP // *Comput Mech.* 2015. 56. P. 77-86.
13. Fialko S (2010) PARFES: a method for solving finite element linear equations on multi-core computers. *Adv Eng Softw.* 41. P. 1256-1265.
14. Метод конечных элементов в механике твердых тел / под общей ред. А. С. Сахарова и И. Альтенбаха. К.: Вища школа, 1982. 480 с.
15. Киричевский В.В., Сахаров А.С. Нелинейные задачи термомеханики конструкций из слабосжимаемых эластомеров. К.: Будівельник, 1992. 216 с.
16. Метод конечных элементов в вычислительном комплексе «МІРЕЛА+» / под ред. В.В. Киричевского. К.: Наукова думка. 2005. 402 с.

Homeniuk S.I., Kozub V.Yu. PARALLEL ALGORITHM FOR FORMATION OF THE STIFFNESS MATRIX OF A FINITE ELEMENT

Calculations of structures require a comprehensive analysis of deformation processes under the action of operational loads. Numerical methods are usually used to solve such problems, of which the finite element

method is the most common. The accuracy of the method is determined by the size of the calculation grids. In addition, different types of finite elements can be used simultaneously in calculation schemes. One of the stages of problem solving is the formation of stiffness matrices of finite elements. In the traditional approach, these calculations are performed sequentially. For a small size of calculation schemes, the solving time is quite insignificant. In the case of large grid sizes, the number and time of calculations increase, which requires optimization of calculations using parallel calculation algorithms. For the parallelization of the finite element method, it is necessary to organize the management of the work of a sufficiently large number of processes, to organize the exchange of data between processes. When performing calculations, there are delays caused by incomplete execution of some stages by all processors. The slowest parallel task determines the execution time of the program. When forming stiffness matrices, it is necessary to perform integration over the area of the finite element. When using the moment scheme of finite elements, displacements and deformations are approximated by the same polynomials, which simplifies the calculation of integrals. This procedure ends with the formation of a stiffness matrix block, and this block is partially shared by neighboring finite elements. In a system with shared memory, information is exchanged between processors using variables stored in shared memory. To ensure the determinism of program execution, gradual program parallelization is implemented. Parallel programming algorithms have been developed for constructing stiffness matrices of finite elements and calculating the stress-strain state for the «MIRELA+» program package. Parallel data processing is implemented using the OpenMP library, which provides faster development due to ease of use. On the basis of computational methods of experiments, the use of parallel computing algorithms at the beginning of solving problems by traditional finite element algorithms for large grids has been established.

Key words: *finite element method, stiffness matrix, parallel computing, OpenMP, stress-strain state.*

Киричек Г.Г.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Тягунова М.Ю.

Національний університет «Запорізька політехніка»

Латишев А.В.

Національний університет «Запорізька політехніка»

МОДЕЛЮВАННЯ РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕЗШОВНОЇ МЕРЕЖІ НА БАЗІ ТЕХНОЛОГІЇ MIKROTIK CAPSMAN

На даний час TamoGraph Site Survey є потужним та зручним інструментом для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. Для впровадження та експлуатації бездротових мереж потрібні професійні програмні продукти, які дозволяють значно спростити виконання таких складних та трудомістких завдань як побудова карт покриття, аналіз інтерференції та рівня сигналу, розподіл Wi-Fi-каналів тощо. Метою роботи є реалізація безпроводової безшовної мережі для створення публічної зони бездротового доступу або мережі Wi-Fi (зони безшовного покриття), що охоплює всю територію навчального закладу, а також проведення дослідження стандарту IEEE 802.11ax, методом моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPSMAN, із метою підвищення рівня інформатизації при наданні сучасних послуг. Об'єктом дослідження є процес моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі стандарту IEEE 802.11ax. Предметом дослідження є моделі, методи, програмні та інструментальні засоби моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPSMAN. У рамках дослідження запропоновано модель сегмента мережі для стандарту IEEE 802.11ax, яка враховує витрати часу на доступ до фізичного рівня та рівня каналу передачі даних. Модель також враховує сценарії передачі як для одного, так і для декількох користувачів як низхідної, так і висхідної лінії зв'язку під час розрахунку пропускну здатності каналу в мережах IEEE 802.11ax. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує втрати фізичного рівня та вплив різномірного трафіку. Крім того, багато припущень, таких як однакова відстань усіх станцій, відсутність прихованих вузлів і умови насичення мережі, також можуть змінити загальну пропускну здатність мережі. В роботі для кожного діапазону частот аналізуються три випадки для трьох показників, такі як: рівень сигналу; відношення сигнал/шум та прогнозована фізична швидкість.

Ключові слова: IEEE 802.11ax, CAPSMAN, Mikrotik, Wi-Fi, WinBox, MIMO.

Постановка проблеми. Сьогодні бездротові мережі стали невід'ємною частиною повсякденного життя бо дозволяють пристроям спілкуватися один з одним без проводів [1]. Це позитивно впливає на багато факторів. Ноутбуки, смартфони, планшети, телевізори, системи пожежної безпеки та багато інших пристроїв підтримують бездротове підключення [2]. Популярність бездротових мереж за останні роки спонукала розробників реалізовувати нові стандарти зв'язку, які пропонують вищу швидкість з'єднання. Отже, якщо швидкість з'єднання, яка підтримується бездротовими пристроями, спочатку становила лише 1 і 2 Мбіт/с (чого було явно недостатньо), то тепер максимальна швидкість з'єднання досягла 11 Гбіт/с і вже може конкурувати із традицій-

ними дротовими мережами [3]. Існує декілька типів бездротових мереж, які відрізняються за площею покриття, підтримуваною швидкістю з'єднання та методами кодування даних. Стандарт IEEE 802.11ax є новим для користувачів та спрямований на підвищення ефективності мережі в цілому [4]. Маючи достатньо точок доступу та велику кількість пристроїв, які підключаються до них, маємо важливе і складне завдання забезпечити ефективну роботу мережі для кожного з цих пристроїв. Для вирішення цього завдання розгорнемо безшовну мережу Wi-Fi та проведемо дослідження специфікації IEEE 802.11ax на прикладі встановлення обладнання та використання для цього приміщень навчального закладу. Також дослідим характеристики цього стандарту,

які можна досягти поточною мережею, шляхом проведення моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN [5].

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Фізичний рівень, який використовується в розширеннях 802.11ax, зазвичай успадковується від розширень 802.11n і 802.11ac. Мережі 802.11ax також використовують мультиплексування з ортогональним частотним розподілом (OFDM) і підтримують канали 20, 40, 80, 80+80 і 160 МГц, а додаткова функція дозволяє використовувати множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) [4; 6]. Щоб збільшити кількість піднесучих і забезпечити кращу вибірковість при використанні методів OFDMA, розмір символу OFDM, який використовується для передачі блоків даних користувача, збільшено в 4 рази, тобто 12,8 мкс замість 3,2 мкс. 802.11ax також збільшує захисний інтервал між символами OFDM, щоб зменшити міжсимвольні перешкоди. Тому, через збільшення накладних витрат у разі використання довшого захисного інтервалу, додана довжина захисного інтервалу пропонує три варіанти: стандартні 0,8 мкс і додаткові 1,6 мкс і 3,2 мкс [7]. Передача службових кадрів споживає досить багато ресурсів каналу. Щоб якось зменшити накладні витрати через наявність службового трафіку, 802.11ax забороняє передачу службових кадрів на швидкості нижче 5,5 Мбіт/с у діапазоні 2,4 ГГц [8].

CAPsMAN - це Controlled Access Point System Manager (CAP (Controlled Access Point) з багатьма маршрутизаторами Mikrotik та MAN (manager)) або керований диспетчер системи точок доступу, який дозволяє централізувати управління бездротовою мережею та обробку даних. Вбудований в маршрутизатор контролер є бонусом, і в поєднанні з безліччю функцій RouterOS стає потужним рішенням при апаратному розгортанні Mikrotik. Функції, які виконувала точка доступу (контроль доступу, автентифікація клієнта), тепер виконуються CAPsMAN [5]. Пристрій CAP тепер повинен забезпечувати лише шифрування/дешифрування рівня бездротового зв'язку.

TamoGraph Site Survey є потужним та зручним інструментом для збору, візуалізації та аналізу даних у мережах Wi-Fi стандарту IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. Його основні функції: пасивні та активні дослідження; радіочастотне планування, створення віртуальних моделей та планування WLAN; проведення комплексного аналізу WLAN із візуалізацією рівнів сигналу, перешкод, зон покриття точки доступу, швидко-

сті передачі даних та проблем із мережею; автоматичне визначення розміщення точки доступу; детальна інформація по кожній точці доступу (канал, максимальна швидкість передачі даних та тип шифрування); можливість використання GPS для роботи на відкритому просторі; повна підтримка мереж 802.11ax, а також стандартів IEEE 802.11a/b/g/n/ac; детальні звіти у форматах PDF, HTML та Microsoft Word. Ця система допомагає суттєво скоротити час та витрати на планування та обслуговування мережі, збільшити її продуктивність та розширити покриття, навіть без придбання додаткового обладнання, а також дозволяє проводити реактивні, проактивні та прогнозовані дослідження [9].

Постановка завдання. Метою роботи є реалізація бездротової безшовної мережі та дослідження стандарту IEEE 802.11ax методом моделювання робочих характеристик безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN з метою підвищення рівня інформатизації при наданні сучасних послуг. Об'єкт дослідження - процес моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі стандарту IEEE 802.11ax. Предметом дослідження є моделі, методи, програмні та інструментальні засоби моделювання робочих характеристик, безшовної мережі на базі технології Mikrotik CAPsMAN.

В якості вихідних даних беремо мережу IEEE 802.11ax, що складається із точки доступу і N абонентських станцій. Усі станції знаходяться в межах прямої видимості точки доступу та усіх інших станцій (немає прихованих станцій). Вони можуть надсилати та отримувати дані, використовуючи однакову схему модуляції та кодування та мають однакові параметри. Окрім того ми маємо, що ідеальні умови каналу передачі на фізичному рівні, головним чином забезпечуються на MAC рівні [10].

У рамках дослідження запропоновано модель сегмента мережі для стандарту IEEE 802.11ax, яка враховує витрати часу на доступ до фізичного рівня та рівня каналу передачі даних. Модель також враховує сценарії передачі як для одного, так і для декількох користувачів як низхідної, так і висхідної лінії зв'язку під час розрахунку пропускної здатності каналу в мережі стандарту IEEE 802.11ax. Недоліком цієї моделі є те, що вона не враховує втрати фізичного рівня та вплив різного трафіку. Крім того, багато припущень, таких як однакова відстань до усіх станцій, відсутність прихованих вузлів і умови насичення мережі, також можуть змінити загальну пропускну здатність мережі [11; 12].

Виклад основного матеріалу. В роботі для кожного діапазону частот аналізуються приклади для трьох показників, таких як: рівень сигналу; відношення сигнал/шум та прогнозована фізична швидкість. Спочатку розглянемо налаштування у діапазоні 5 ГГц та, використовуючи візуалізацію, порівняємо результат із використанням діапазону 2.4 ГГц при візуальній оцінці різниці у рівні сигналу.

На прикладі програмного продукту TamoGraph Site Survey розглянемо рівень сигналу в проєктованому приміщенні. Для цього завантажуюмо план приміщення, вказуємо радіус зони покриття однієї точки доступу та розташовуємо інші точки доступу відповідно до плану їх розміщення.

На рисунках показано порівняння площі покриття та рівня сигналу однієї точки доступу, яка розташована у приміщенні «Rm1» із використанням частотних діапазонів 2.4 ГГц (рис. 1) та 5 ГГц (рис. 2).

Рівень сигналу або карта покриття є однією із найважливіших характеристик, які впливають на продуктивність мережі Wi-Fi. За даними зображення можна візуально визначити, що сигнал на частоті 5 ГГц згасає швидше ніж на частоті 2,4 ГГц, але перевага 2,4 ГГц у цій області компенсується блокуванням у цьому діапазоні. З іншого боку, покриття мережі із частотою 5 ГГц легко розширити шляхом встановлення додаткових точок доступу [13]. Далі наведено рівень сигналу усіх встановлених точок доступу у частотному

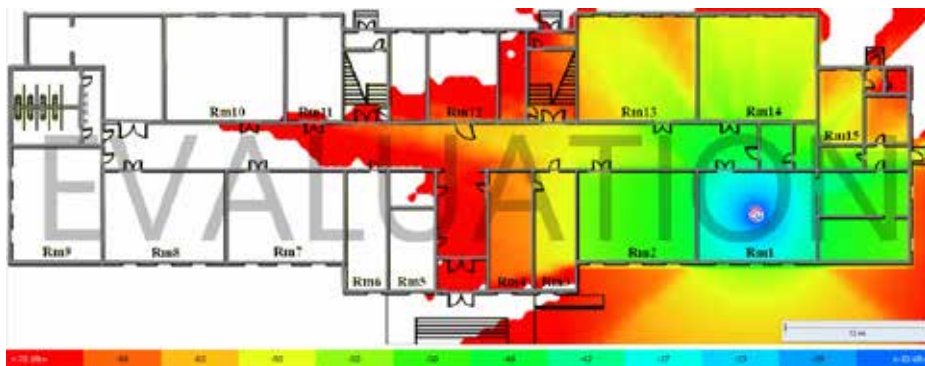


Рис. 1. Рівень сигналу в діапазоні 2.4 ГГц

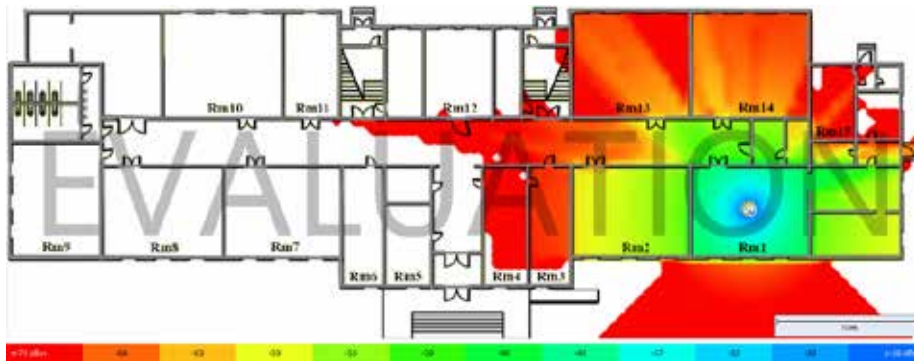


Рис. 2. Рівень сигналу в діапазоні 5 ГГц

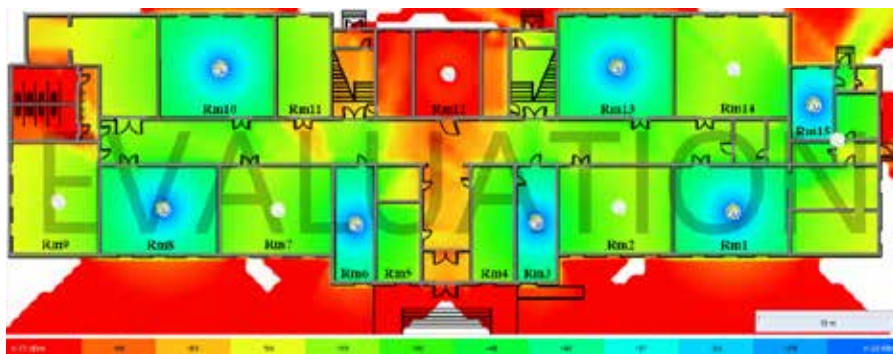


Рис. 3. Рівень сигналу на першому поверсі в діапазоні 5 ГГц

діапазоні 5 ГГц на першому (рис. 3) та другому (рис. 4) поверхах, згідно плану розміщення мережевого обладнання.

Бачимо, що зоною із найнижчою потужністю сигналу на першому поверсі є приміщення «Rm12». На другому поверсі рівень потужності сигналу у всіх робочих приміщеннях є задовільним.

Після налаштування рівня сигналу перевіряємо рівень сигнал/шум. Ця характеристика вимірюється в децибелах (dB) і вказує на те, наскільки рівень сигналу вище рівня шуму. У зонах із низьким співвідношенням сигнал/шум клієнтські пристрої не можуть зв'язатися з точкою доступу [10; 13]. На рисунках показано відношення сигнал/шум для даних точок доступу на першому (рис. 5) та другому (рис. 6) поверхах.

Фізична швидкість безпосередньо пов'язана із пропускну здатністю, яка є середньою швид-

кістю, з якою клієнт обмінюється з точкою доступу даними прикладного рівня (файлами). Пропускна здатність є нижчою за фізичну швидкість із таких причин як: повторна передача (дублювання) даних та надсилання технічних або службових даних, які не несуть корисного навантаження. Низька фізична швидкість завжди означає низьку пропускну здатність, яка призводить до низької продуктивності мережі.

Далі зображено прогнозовану фізичну швидкість для даних точок доступу на першому (рис. 7) та другому (рис. 8) поверхах будівлі.

Також розглянемо та порівняємо із попередніми (рис. 3–8) результати застосування точок доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц. На рисунках проілюстровано співвідношення сигнал/інтерференція точок доступу на першому (рис. 9) та другому (рис. 10) поверхах.

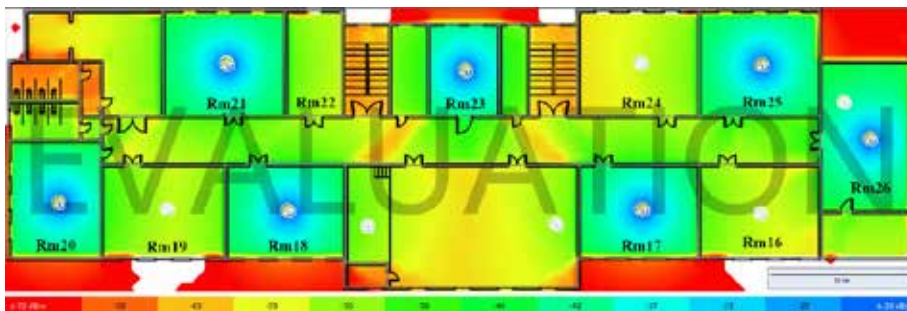


Рис. 4. Рівень сигналу на другому поверсі в діапазоні 5 ГГц

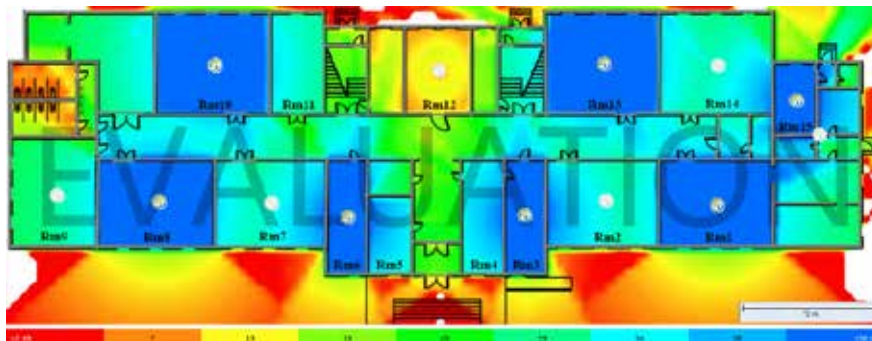


Рис. 5. Відношення сигнал/шум на першому поверсі (5 ГГц)

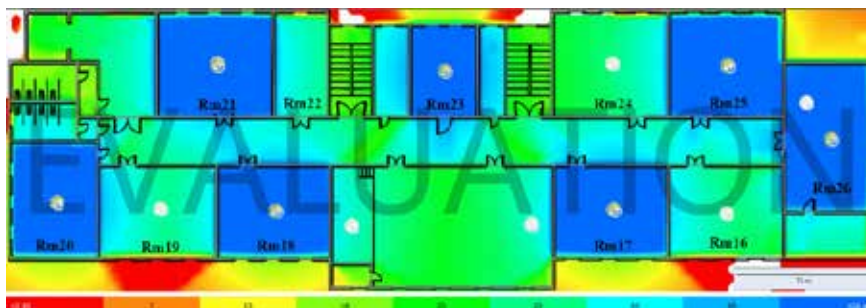


Рис. 6. Відношення сигнал/шум на другому поверсі (5 ГГц)

На рисунках чітко видно вплив сусідніх точок на один канал. Перешкоди найвищі, коли сусідні пристрої працюють на тому ж самому каналі. Для частотного діапазону 2,4 ГГц перешкоди сусідніх каналів досить значні та зникають, якщо канали, які використовують точки доступу розділені 5 або більшою кількістю каналами. При цьому у діапа-

зоні 5 ГГц практично немає інтерференції суміжних каналів.

Далі наведемо рівень сигналу точок доступу в діапазоні 2,4 ГГц на першому (рис. 11) та другому (рис. 12) поверхах.

В разі використання частотного діапазону 2,4 ГГц в порівнянні із 5 ГГц, зона «Rm12», яка

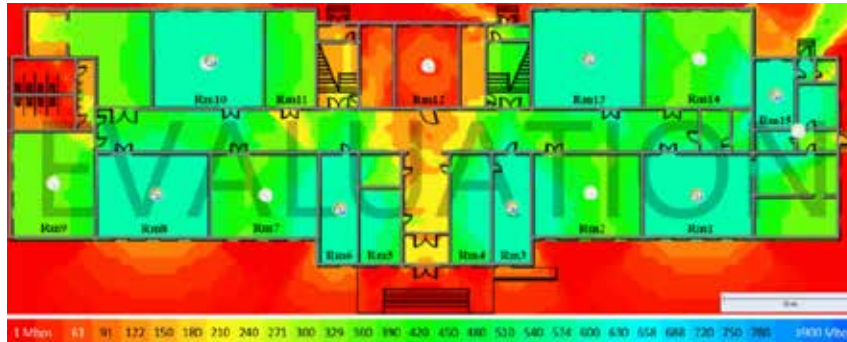


Рис. 7. Прогнозована швидкість на першому поверсі (5 ГГц)

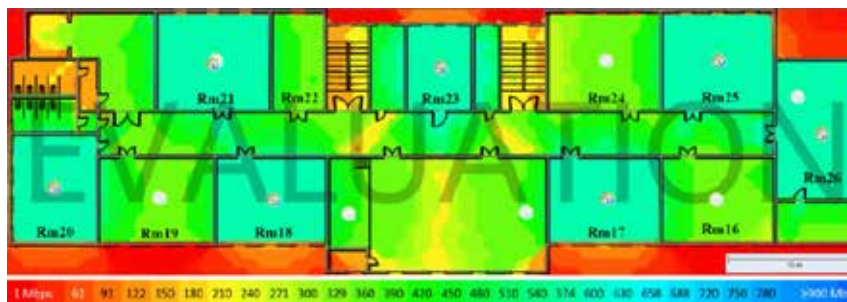


Рис. 8. Прогнозована швидкість на другому поверсі (5 ГГц)

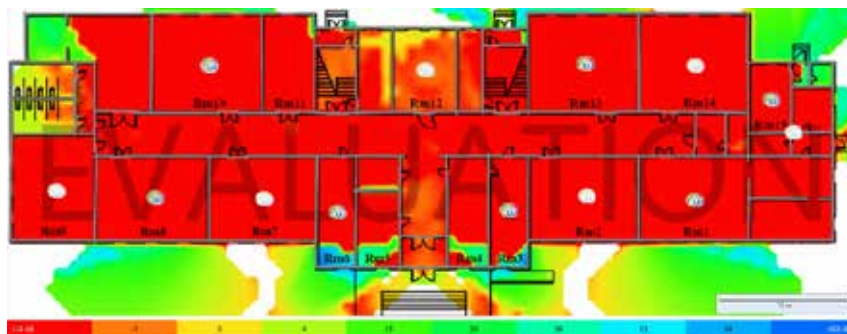


Рис. 9. Відношення сигнал/інтерференція (перший поверх)

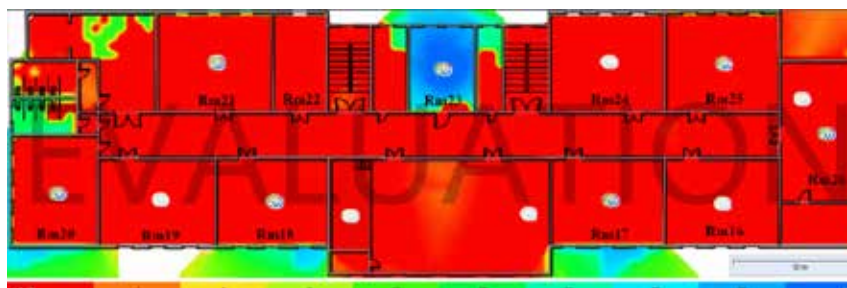


Рис. 10. Відношення сигнал/інтерференція (другий поверх)

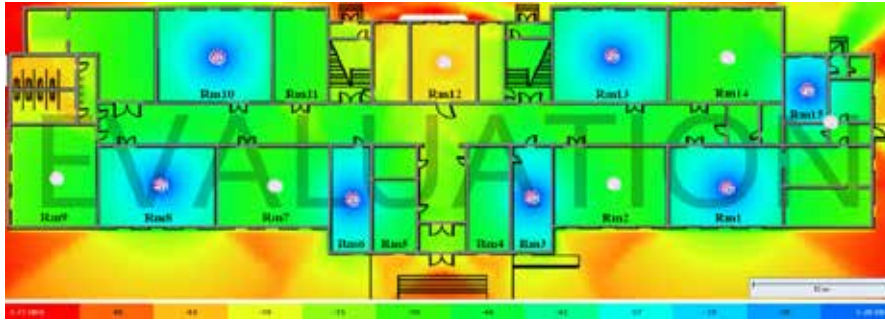


Рис. 11. Рівень сигналу на першому поверсі (2.4 ГГц)

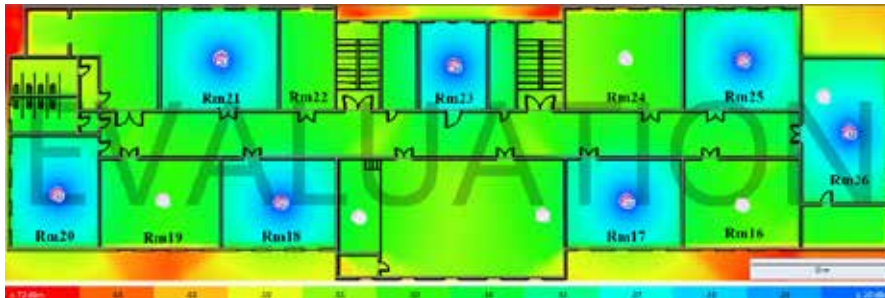


Рис. 12. Рівень сигналу на другому поверсі (2.4 ГГц)

мала найнижчу потужністю сигналу (рис. 3) вже має рівень сигналу близький до середнього (рис. 11). При використанні офіційних характеристик стандарту IEEE 802.11ax бачимо, що змодельовані характеристики точок доступу значно відрізняються від офіційних. Візьмемо максимальну фізичну швидкість передачі 9608 Мбіт/с та фізичну швидкість передачі змодельованої мережі в 600 Мбіт/с, маємо різницю яка дорівнює 16 разів. При цьому, точка доступу досягає максимальної фізичної швидкості у частотному діапазоні 5 ГГц, використовуючи 8 просторових потоків, ширину каналу 160 МГц та модуляцію 1024QAM.

Якщо за середнє беремо пристрої, які підтримують MIMO 2x2, тобто шляхом підрахунку можна визначити початкову, після першого скринінгу, фізичну швидкість: $9608/8 = 1201$ Мбіт/с (базова швидкість) і множимо на 2 просторових потоки, отримуємо $1201 \times 2 = 2402$ Мбіт/с. З шириною каналу теж не все так просто. Стандарт 802.11ax дійсно допускає використання ширини каналу 160 МГц, але навіть ширина у 80 МГц використовується не часто, тому що перешкоди можуть завадити роботі сусідніх мереж та користувачів. Тому найпоширенішим поки залишається використання каналів 20 МГц. Ширина каналу, яка використовується при моделюванні, становить 40 МГц, тому фізична швидкість розраховується наступним чином: коефіцієнти для ширини

каналу 40, 80 і 160 МГц дорівнюють 2,1, 4,5 і 9 відповідно.

Висновки. У роботі проведено дослідження актуальних на сьогодні методів та алгоритмів оптимізації технології передачі даних у бездротових локальних мережах та визначено властивості, які дозволяють забезпечити необхідні вимоги для систем доступу на базі стандарту IEEE 802.11ax. Стандарт IEEE 802.11ax є новою технологією, яка забезпечує вищу швидкість передачі даних серед усіх попередніх стандартів IEEE 802.11. Програмне забезпечення TamoGragh Site Survey ідеально підходить для попереднього моделювання майбутніх мереж Wi-Fi. Для цього в програмі є все, що потрібно, від роботи із планами приміщень до отримання приблизної фізичної швидкості проєктованої мережі. Діапазони 2,4 та 5 ГГц можуть використовуватись для різних робочих завдань. Точки доступу в діапазоні частот 2,4 ГГц мають більшу зону покриття але відносно нижчу швидкість передачі даних (порівняно із діапазоном 5 ГГц). Окрім того, перешкоди у вигляді тонких стін мало впливають на швидкість передачі та рівень сигналу. З іншого боку, точки доступу, які працюють в діапазоні 5 ГГц мають невелику зону покриття але мають високу швидкість передачі. Цей діапазон є дуже чутливим навіть до невеликих перешкод, що може призвести до погіршення рівня сигналу та різкого падіння швидкості.

Список літератури:

1. Рудьковський О.Р., Киричек Г.Г. Програмний комплекс з підтримки розподіленої взаємодії мережевих пристроїв та додатків. *Вчені записки ТНУ ім. В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки»*. 2021. Вип.32(71). №2. С.229–234.
2. Tiahunova M., Tronkina O., Kirichek G., Skrupsky S. The Neural Network for Emotions Recognition under Special Conditions. *In CEUR Workshop Proceedings 2864*. 2021. P. 121-134.
3. Lazebnyi V.S., Yin C. Estimation of probabilistic processes in wireless networks of 802.11 standard. 2017. 22(5). P. 47-53.
4. Qu Q., Li B., Yang M., Yan Z., Yang A., Deng D., Chen K. Survey and performance evaluation of the upcoming next generation WLANs standard-IEEE 802.11 ax. *Mobile Networks and Applications*. 2019. 24(5). P. 1461-1474.
5. Febrianti F., Haryani P., Iswahyudi C. Perancangan jaringan wireless multiple SSID menggunakan fitur Mikrotik CAPsMAN. *Jurnal Jarkom*. 2020. 8(2). P. 65-72.
6. Kyrychek H., Tiahunova M., Latyshev A. Data transmission networks modeling process. *Publishing House «Baltija Publishing»*. 2022. P. 10-13.
7. Arena F., Pau G., Severino A. A review on IEEE 802.11 p for intelligent transportation systems. *Journal of Sensor and Actuator Networks*. 2020. 9(2). P. 22.
8. Токарев В.В., Сапарбаєв Т. Методи підвищення продуктивності у мережах Wi-Fi на базі стандарту 802.11ax. 2019. URL: <https://openarchive.nure.ua/server/api/core/bitstreams/0ec254a3-6c44-41a9-94f4-9337fa063801/content>.
9. Khorov E., Kiryanov A., Lyakhov A., Bianchi G. A tutorial on IEEE 802.11 ax high efficiency WLANs. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2018. 21(1). P. 197-216.
10. Yang M., Li B., Yan Z. MAC Technology of IEEE 802.11 ax: Progress and Tutorial. *Mobile Networks and Applications*. 2021. 26(3). P. 1122-1136.
11. Wilhelmi F., Barrachina-Muñoz S., Cano C., Selinis I., Bellalta B. Spatial reuse in IEEE 802.11 ax WLANs. *Computer Communications*. 2021. 170. P. 65-83.
12. Rudkovskiy O.R., Kirichek G.G. Interaction support system of network applications. *In CEUR Workshop Proceedings 2832*. 2020. P. 11-23.
13. Пілінський В.В. Технічна електродинаміка та поширення радіохвиль. 2014. К.: Кафедра. 336 с.

Kyrychek H.H., Tiahunova M.Yu., Latyshev A.V. SIMULATION OF WORKING CHARACTERISTICS A SEAMLESS NETWORK BASED ON MIKROTIK CAPSMAN TECHNOLOGY

Currently, TamoGraph Site Survey is a powerful and convenient tool for collecting, visualizing and analyzing data in Wi-Fi networks of the standard IEEE 802.11 a/b/g/n/ac/ax. The implementation and operation of wireless networks requires professional software products that allow you to significantly simplify the implementation of such complex and time-consuming tasks as the construction of coverage maps, analysis of interference and signal level, distribution of Wi-Fi channels, etc. The aim of the work is the implementation of a wireless seamless network to create a public wireless access zone or a Wi-Fi network (seamless coverage zone) covering the entire territory of the educational institution, as well as conducting research the IEEE 802.11ax standard, using the method of modeling the operating characteristics of a seamless network based on Mikrotik technology CAPsMAN, with the aim of increasing the level of informatization in the modern services provision. The object of research is the process of modeling the operating characteristics of a seamless network based on the IEEE 802.11ax standard. The subject of the research is models, methods, software and tools for simulating operational characteristics of a seamless network based on Mikrotik CAPsMAN technology. As part of the research, a network segment model for the IEEE 802.11ax standard is proposed, which takes into account the time spent on accessing the physical layer and the data link layer. The model also considers both single-user and multi-user transmission scenarios for both downlink and uplink when calculating link capacity in IEEE 802.11ax networks. The disadvantage of this model is that it does not take into account physical layer losses and the impact of heterogeneous traffic. In addition, many assumptions, such as the same distance of all stations, no hidden nodes, and network saturation conditions, can also change the overall network throughput. In the paper, for each frequency range, three examples are analyzed for three indicators, such as: signal level; signal-to-noise ratio and predicted physical speed.

Key words: IEEE 802.11ax, CAPsMAN, Mikrotik, Wi-Fi, WinBox, MIMO.

УДК 519.7

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/14>**Кишенько В.Д.**

Національний університет харчових технологій

Крищенко Д.О.

Національний університет харчових технологій

Ромащук О.М.

Національний університет харчових технологій

Горпинченко А.С.

Національний університет харчових технологій

ОЦІНКА ХАРАКТЕРНИХ ПРОЯВІВ ПОВЕДІНКИ СКЛАДНИХ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

У статті розглядаються технологічні процеси харчових виробництв, які мають всі характерні ознаки складних динамічних систем, в тому числі різнопланову поведінку, що містить наявність детермінованих, стохастичних та хаотичних проявів. Аналіз та ідентифікація таких проявів дозволяє оперативно прийняти відповідні стратегії керування, що забезпечить ресурсоощадне функціонування технологічних об'єктів керування в різних умовах виробництва. Властива для складних технологічних комплексів як об'єктів керування самоорганізація через їх суттєву нелінійність і віддаленість від стану термодинамічної рівноваги і, як наслідок, через утворення дисипативних просторово – часових структур, є основою для забезпечення оптимальних значень в умовах змінювання характеру поведінки, включаючи і хаотичні процеси, що є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку систем автоматизації харчової галузі. Хаотичні процеси, які спостерігаються в поводженні об'єкта та викликані внутрішніми факторами, у багатьох випадках відіграють конструктивну роль в адаптації складних об'єктів через самоорганізацію. Для організації ефективного керування, заснованого на синтезі керуючих стратегій не примусового, а топологічно погодженого ресурсоощадного характеру резонансної дії, необхідно провести дослідження таких об'єктів виробництва методом рекурентного аналізу.

На основі рекурентного аналізу часових рядів основних параметрів функціонування технологічних процесів цукрової та спиртової промисловості виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переривчастістю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів в умовах нестаціонарності. Визначені також кількісні показники рекурентних діаграм як міра детермінованості, міра рекурентності, ентропія, тренд, дивергенція, які характеризують прикмети поведінки об'єкта, а також визначити природу процесів, виявити деякі атрибути поведінки об'єкта (тип режимів, рівень шуму у порівнянні з корисним сигналом, перелом трендів). Отримані рекурентні діаграми та числові значення критеріїв оцінки характеру поведінки технологічних процесів дали можливість реалізації ефективних рішень по керуванню, що забезпечило покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та економію сировинних і енергетичних ресурсів.

Ключові слова: виробництво спирту, цукрове виробництво, об'єкт керування, нелінійна динаміка, детермінований хаос, рекурентний аналіз, часовий ряд.

Постановка проблеми. Технологічні процеси цукрової та спиртової промисловості відносять до складних технологічних комплексів [1] через властиві для таких об'єктів керування особливості як багатофакторність, нестаціонарність, значна невизначеність, нелінійність зв'язків між параметрами, великий рівень шумів та перешкод. Важливим чинником таких складних динамічних систем є те, що вони переважно характеризуються так званою переривчастістю (intermittency), проявами

якої є як випадкові, так і детерміновані хаотичні процеси, що потребує застосування необхідних засобів аналізу оцінки стану та поведінки об'єкта керування для реалізації адекватних реальним виробничим ситуаціям ефективних ресурсоощадних алгоритмів керування.

Забезпечення оптимальних значень технологічних параметрів складних об'єктів керування харчової промисловості в обставинах переривчастості, яка відзначається витвором дисипативних

просторово – часових структур, як впорядкованих, так і хаотичних, внаслідок визначальної нелінійності і віддаленості від рівноважного стану, є актуальною проблемою на сучасному етапі розвитку систем автоматизації виробництва.

Спостереження за такими об'єктами доцільно здійснювати на основі часових рядів, які є дискретною послідовністю значень показників, технологічних параметрів, впорядкованих за часом їх отримання, що в інтегральному сенсі характеризує стан об'єкта в окремі моменти часу. Такий спосіб представлення інформації про ситуацію, поведінку та розвиток об'єкта керування є дуже розповсюдженим, зручним і, в більшості випадків, єдино ефективним.

Застосування статистичних методів при аналізі часових рядів дозволяє розв'язувати в певному наближенні проблеми ідентифікації, визначати форму та зв'язок між факторами, визначати деякі кількісні та якісні характеристики об'єкта, але подати в повному обсязі поведінку та розвиток об'єкта, особливо при наявності суттєвого впливу нелінійностей, що приводить до складного характеру поведінки, є надзвичайно проблематичним. Сьогодні наукових досліджень часових рядів висунуло плідні методи нелінійної динаміки, поміж яких визначальне місце займає рекурентний аналіз. Хаотичні процеси, які спостерігаються в поведінці об'єкта та викликані внутрішніми факторами, у багатьох випадках відіграють конструктивну роль в адаптації складних об'єктів через самоорганізацію. Для організації радикального керування технологічними комплексами, що забезпечує формування керувальних дій, оснований на самоорганізації, тобто погоджених із фізичною природою процесів в об'єктах, і тим самим є ресурсощадним, необхідно провести дослідження таких об'єктів виробництва методом рекурентного аналізу.

Рекурентний аналіз при дослідженні поведінки складних динамічних об'єктів не потребує значного об'єму інформації. Дослідження таких складних систем із застосуванням методу рекурентного аналізу у відповідності із теоремою Такенса дозволено проводити навіть у випадку наявності лише однієї змінної координати, враховуючи те, що по дії змінних в складних системах і їх кількості, можна визначити динаміку всієї системи в цілому.

Рекурентні діаграми допускають можливість відтворювати кардинальні властивості процесу, що досліджується, за їх геометричною структурою. Відомі такі різновиди структур: топологія і текстура. Топологія, що відзначається великим

масштабом, зумовлює тотальне сприймання про природу процесу, а текстура, що має дрібномасштабну структуру, дозволяє встановити окремі нюанси поведінки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. За останні роки був розроблений оригінальний метод, заснований на фундаментальній властивості диссипативних динамічних систем – рекурентності (повторюваності) станів, яка зводиться до того, що, навіть незначні коливання в складній динамічній системі можуть заподіяти в системі відхилення від власного стану експоненціального характеру з подальшим поверненням через декотрий час до стану, який тим або іншим чином є ближнім до колишнього, і переходить при цьому однотипні стадії еволюції. Таку рекурентну поведінку можна зобразити рекурентними діаграмами, запропонованими в 1987 р. Екманом, Кампхорстом і Рюелем [2], які допускають відтворити фазову траєкторію абиякої розмірності на двовимірну квадратну матрицю, формат якої окреслюється довжиною часового ряду і, практично, виражає його рекурентність, тобто його поведінку в колишні випадки пори. Практичне використання цього методу показало його застосованість до недовгих і нестационарних даних, що підвищило його популярність у дослідників. Окрім сильних візуальних відзнак, є метод числового аналізу побудов, які організуються на відображенні рекурентної діаграми. В 2007 році Збілут (Zbilut) і Веббер (Webber) опублікували роботу [3], в якій описали елементи числового аналізу рекурентних діаграм. Новітні дослідження засвідчили, що рекурентна діаграма поміщає усю потрібну інформацію про динаміку системи. Роботи таких вчених, як Норберт Марван [4], Кармен Романо [5], Сун [6], Фачіні [7], Фауер [8], Флеш [9], Фусаролі [10] значно збагатили за останнє десятиліття можливість цього методу в різних галузях науки, підтвердили потужну перспективу такого напрямку досліджень.

Постановка завдання. Мета статті полягає в розробці і обґрунтуванні алгоритмів розрахунку основних характеристик технологічних комплексів цукрової та спиртової промисловості для оперативного визначення особливостей їх поведінки в умовах переривчастості, що дозволить приймати ефективні рішення по керуванню у відповідності із виробничою ситуацією. Завданням проведених досліджень є також підтвердження гіпотези про наявність ефектів переривчастості в поведінці технологічних процесів виробництва цукру та спирту, виявлених нами в пивоварній промис-

ловості [11], що дасть підставу для розширення номенклатури систем синергетичного керування технологічними процесами в харчовій галузі.

Виклад основного матеріалу дослідження.

Досліджувались часові ряди технологічних змінних функціонування технологічних комплексів цукрової та спиртової промисловості: витрати і показників якості сировини, напівфабрикатів та готової продукції, температури та тиску в технологічному обладнанні.

Поведінка об'єкта у вигляді m – мірної фазової траєкторії часового ряду відображувалась на двохмірну квадратичну матрицю розміром $N \times N$, при якому N – відповідає повтору стану при якомусь часі i в декотрий інший час j , а дві координатні осі є осями часу. Графічний показ такого процесу іменують рекурентною діаграмою, або скорочено RP (recurrence plots), яка є проекцією m -мірного псевдофазового простору на площину [2]. Рекурентні діаграми дозволять за часовими рядами технологічних змінних завдяки візуальному розгляду та аналітичних розрахунків встановити характерні прояви поведінки процесів, що забезпечить організацію ефективних рішень по керуванню технологічними процесами.

Рекурентна діаграма визначається відповідною операцією:

$$R_{i,j}^{m,\epsilon} = \Theta(\epsilon_i - \|x_i - x_j\|)$$

де $\{x_i\} = [x_1, x_2, \dots, x_N] \in R^m$, $i, j = 1, 2, \dots, N$,
 N – кількість станів, які аналізуються;
 ϵ_i – розмір округи точки x_i в момент i ,
 $\|x_i - x_j\|$ – відстань між точками,
 $\Theta(\cdot)$ – функція Хевісайда.

Для розгляду поведінки об'єктів за рекурентними діаграмами існують такі класи структури: топологія і текстура зображень. При цьому топологія, зумовлює тотальне сприйняття щодо природи процесу за класами: однорідний, періодичний, дрейф і білі області. Текстура розкриває окремі деталі поведінки і об'єднує відокремлені точки, діагональні, горизонтальні і вертикальні лінії [2].

Текстура зумовлює перспективу оцінювати відстань між станами системи на діаграмі відстаней [2], що відбивається на декотру кольорову палітру:

$$D_{i,j}^m = \|x_i - x_j\|$$

Топологія дає можливість узнати і описати природу процесу. Існують чотири відмінні класи структур: однорідні, періодичні, дрейф, контрастні області і лінії. Для наочності різноманітного характеру поведінки на рис. 1 – рис. 6 представлено рекурентні діаграми різних топологій із текстурами.

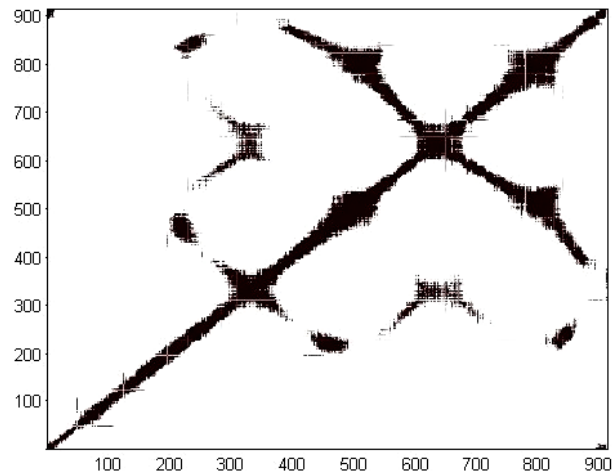


Рис. 1. Відображення рекурентної діаграми величини рН І-сатурації

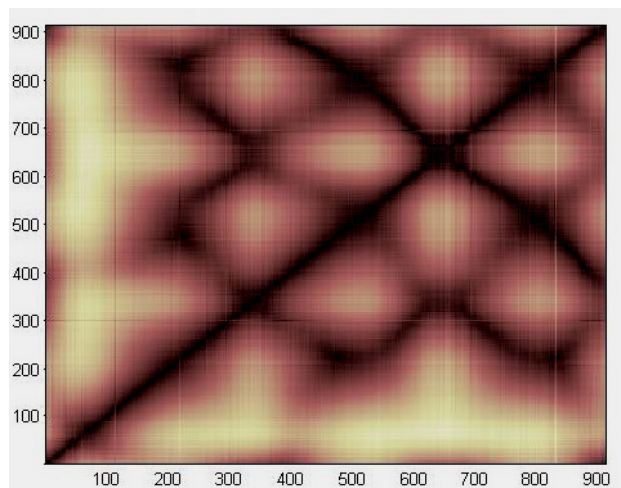


Рис. 2. Відображення текстури рекурентної діаграми величини рН І-сатурації

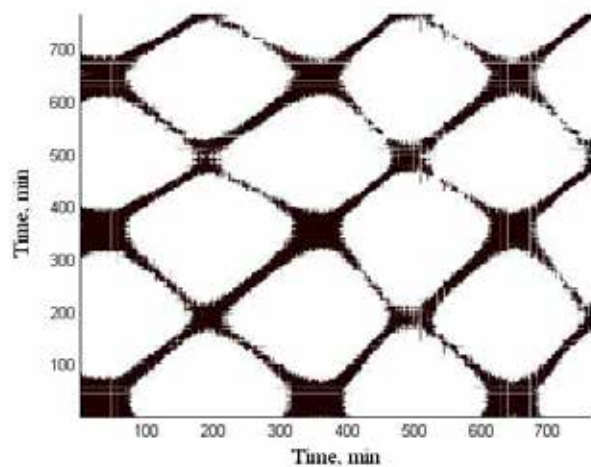


Рис. 3. Відображення рекурентної діаграми температури бражки (періодична топологія, генератор Ван дер Поля)

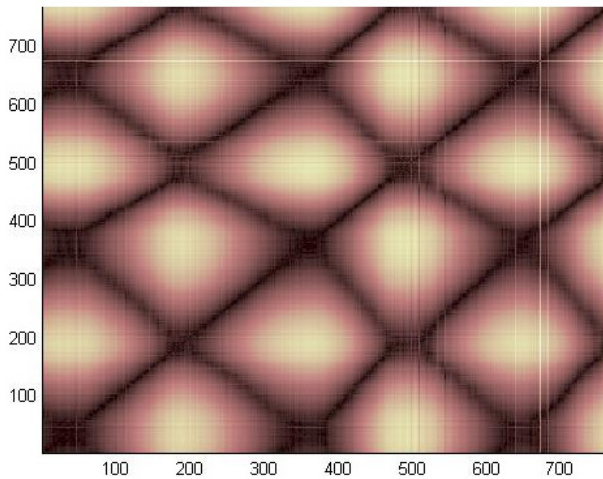


Рис. 4. Відображення текстури рекурентної діаграми температури бражки (періодична топологія, генератор Ван дер Поля)

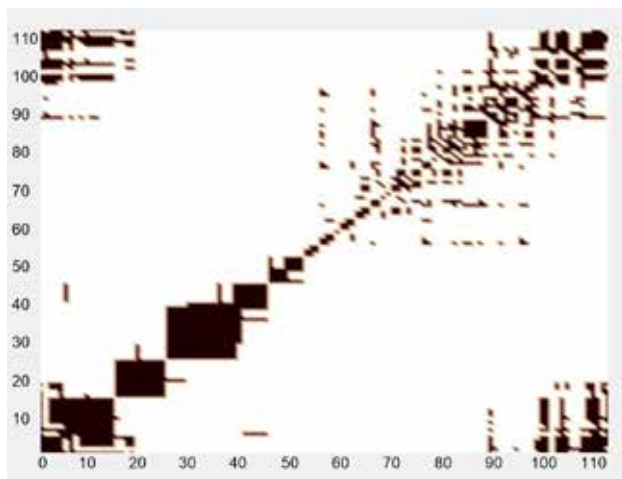


Рис. 5. Відображення рекурентної діаграми концентрації етанолу у бражці (контрастна топологія, загальний броунівський рух)

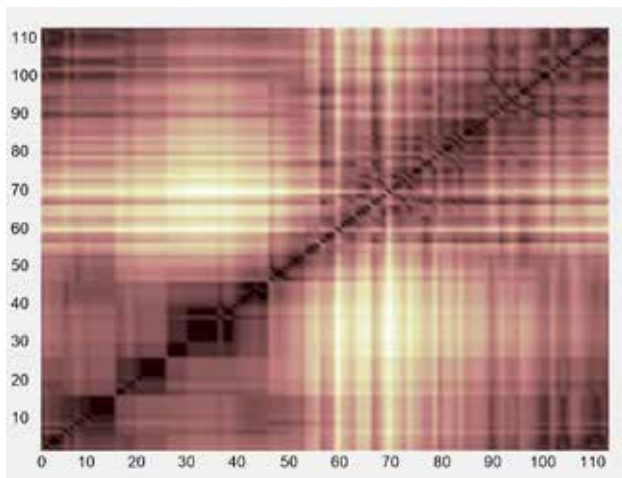


Рис. 6. Відображення текстури рекурентної діаграми концентрації етанолу у бражці (контрастна топологія, загальний броунівський рух)

Оцінку системи можливо здійснити за характерними структурними особливостями рекурентної діаграми. Для прикладу, система з параметрами, що повільно змінюються (наявність дрейфу) характеризується такою рекурентною діаграмою, в якій верхній лівий та правий нижній кути діаграми без рекурентних точок, контрастні білі області або смуги говорять про різкі зміни в динаміці системи.

Аналіз топології діаграми дозволяє провести класифікацію процесів:

- однорідних, типових для процесів з незалежними, ідентично розподіленими (IID – independent and identical distributed) випадковими значеннями;
- дрейфуючих, типових процесам з повільно (лінійно) мінливими параметрами;
- періодичних, повторюваних структур, що відповідають осцилюючим (нелінійним) системам.

Рекурентні діаграми дозволяють провести і числову оцінку деяких особливостей поведінки об'єкта керування згідно із методикою Збілута і Вебера [3] за щільністю рекурентних точок і діагональних структур діаграми. Відзначаються отакі показники числового порядку як [3,11]: міра рекурентності (RR), міра детермінованості (DET), середня довжина діагональних ліній (L), дивергенція (DIV), ентропія ($ENTR$), частотне розподілення довжин діагональних ліній ($RATIO$), тренд ($TREND$). Пізніше Марваном було запропоновані міри розрахунку, що враховують вертикальні та горизонтальні структури рекурентних діаграм: міра замирання (LAM), показник затримки (TT), міра частоти ($CLEAN$), як розуміння балансу між стохастичною і детермінованою складовою [4].

Міра рекурентності розраховується таким чином:

$$RR = \frac{1}{N^2} \sum_{i,j=1}^N R_{i,j}^{m,e}$$

Міра рекурентності позначає гушину рекурентних точок і знаходиться за підрахунком ліній ідентичності: стохастичні процеси формують винятково короткі діагоналі, а процеси із детермінованою поведінкою продукують довгі діагоналі. Ця міра демонструє також імовірність знаходження рекурентної точки в рекурентній діаграмі.

Міра детермінованості або передбачуваності системи визначається за співвідношенням рекурентних точок, що створюють діагональні структури, до загальної кількості точок:

$$DET = \frac{\sum IP_e(l)}{\sum R_{i,j}^{m,e}}$$

Середня довжина діагональної лінії L маркує час, на протязі якого дві частини траєкторії про-

ходять близько одна до одної і напевне розглядається як середній час передбачуваності:

$$L = \frac{\sum_{l=l_{\min}}^N IP^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^e(l)}$$

Показник *DIV* – дивергенція, з'ясовує максимальну довжину діагональних структур або її інверсію:

$$DIV = \frac{1}{L_{\max}}$$

де $L_{\max} = \max(l_i; i = 1 \dots N_l)$.

Визначено, що довжини діагональних ліній пов'язуються із найбільшим позитивним показником Ляпунова, що характеризує прояви детермінізму та хаотичності в системі. Міра ентропії співвідноситься до ентропії Шеннона частотного розподілення довжин діагональних ліній

$$ENTR = - \sum_{l=l_{\min}}^N p(l) \ln p(l)$$

де $p(l) = \frac{P^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^N P^e(l)}$ – показує складність

детермінованої складової системи.

Співвідношення між *DET* і *RR* можна розрахувати із частотного розподілення довжин діагональних ліній.

$$RATIO = N_2 \frac{\sum IP_e(l)}{(\sum IP_n(l))^2}$$

Дану міру можливо використати для встановлення фазових переходів у випадках коли *RR* зменшується, а *DET* – незмінне.

$$LAM = \frac{\sum v P^e(v)}{\sum R^m, \varepsilon_{i,j}}$$

Міра замирання *LAM* помічає співвідношення кількості рекурентних точок, що утворюють горизонтальні лінії до загальної кількості рекурентних точок. Показник атестує присутність станів замирання системи. Замиранням вбачають такий стан

системи, коли рух цієї системи по фазовій траєкторії зупиняється або здійснюється надто повільно.

Середня довжина горизонтальних структур (показник затримки) видається таким чином:

$$TT = \frac{\sum_{v=v_{\min}}^N v P^e(v)}{\sum_{v=v_{\min}}^N P^e(v)}$$

Цей показчик розкриває час стабільного стану системи.

Міра співвідношення кількості точок, що формують діагональну лінію довжиною $l < l_{\min}$ до кількості точок, що формують діагональні лінії $l > l_{\min}$,

$$CLEAN = \frac{\sum_{l=1}^{l_{\min}-1} IP^e(l)}{\sum_{l=l_{\min}}^{N_l} IP^e(l)}$$

іменується мірою частоти і маркує вплив стохастичної складової процесу. При наявності переважної частини цієї складової значення *CLEAN* зростає (табл. 1).

На основі рекурентного аналізу часових рядів основних параметрів функціонування технологічних процесів цукрової та спиртової промисловості виявлені особливості поведінки складних технологічних комплексів, що характеризується переривчастю, яка являє собою чергування детермінованих, стохастичних та хаотичних режимів в умовах нестационарності. Визначені також кількісні показники рекурентних діаграм як міра детермінованості, міра рекурентності, ентропія, тренд, дивергенція, які характеризують прикмети поведінки об'єкта, а також визначити природу процесів, виявити деякі атрибути поведінки об'єкта (тип режимів, рівень шуму у порівнянні з корисним сигналом, перелом трендів).

Висновки. В результаті дослідження встановлено, що поведіння технологічних систем цукрової та спиртової галузі характеризується

Таблиця 1

Кількісна оцінка складності структур рекурентних діаграм

Міра	pH 1-ої сатурації	Витрата соку	Концентрація сухих речовин в бражці	Тиск в бражній колоні
<i>RR</i>	0.086	0.321	0.087	0.294
<i>DET</i>	0.559	0.596	0.517	0.681
<i>DIV</i>	0.028	0.041	0.069	0.141
<i>ENTR</i>	1.670	1.543	1.564	1.581
<i>RATIO</i>	8.247	4.236	4.842	5.738
<i>LAM</i>	0.769	0.527	0.595	0.474
<i>TT</i>	2.643	5.198	3.848	2.163
<i>CLEAN</i>	1,703	4,673	2,162	1,664

ефектом інтермітансу (переривчастості) з наявністю хаотичної складової. детермінованого хаосу.

З огляду на природні особливості процесів приготування спирту-ректифікату та цукру, зокрема, в здатності створення дисипативних просторово-

часових структур самоорганізації, доцільно для ефективного управління цими процесами використовувати синергетичні системи керування, які забезпечують покращення якості продукції, підвищення продуктивності обладнання та економію сировинних і енергетичних ресурсів

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. Eckmann J. P., Kamphorst J. P., Ruelle D. Recurrent Plots of Dynamical System. *Europhysics Letters*. 1987. № 5. P. 973-977.
3. Zbilut J. P., Webber C. L. Recurrence Quantification Analysis: Introduction and Historical Context. *Int. J. Bifurcation Chaos*. 2007. № 17(10). P. 3477-3481.
4. Marwan N. A historical review of recurrence plots. *The European Physical Journal Special Topics*. 2008. № 164 (1). P. 3–12.
5. Romano M. C., Thiel M., Kurths J., von Bloh, W. Multivariate Recurrence Plots. *Physics Letters A*. 2004. 330(3-4). P. 214-223.
6. Sun G., Zhu H., Ding C. Using recurrence plots for stability analysis of ring-on-disc tribopairs. *Industrial Lubrication and Tribology*. 2019. 71(4), P. 532-539.
7. Facchini A., Mocenni C. Recurrence indicators for the identification of spatial patterns, *Proceedings of the 16th IFAC Symposium on System Identification*. 2012. P. 737-1742.
8. Faure P., Lesne A. Estimating Kolmogorov Entropy from Recurrence Plots, In: *Recurrence Quantification Analysis – Theory and Best Practices / Edition by C. L. Webber, Jr., N. Marwan, Springer, Cham*. 2015. P. 45-63.
9. Flach M., Foken T., Hauhs M. Recurrence Analysis of Eddy Covariance Fluxes, In: *Recurrence Plots and Their Quantifications: Expanding Horizons / Edition by C. L. Webber, Jr., C. Ioana, N. Marwan, Springer, Cham*. 2016. P. 301-319.
10. Fusaroli R., Konvalinka I., Wallot S. Analyzing Social Interactions: The Promises and Challenges of Using Cross Recurrence Quantification Analysis, In: *Translational Recurrences – From Mathematical Theory to Real-World Applications*, 103, Edition by N. Marwan, M. A. Riley, A. Giuliani, C. L. Webber, Jr., Springer, Cham. 2014. P. 137-155.
11. Кишенько В.Д., Чернецький М.В. Нелінійний рекурентний аналіз часових рядів процесу затирання солоду як складної системи з переміжністю. *Харчова промисловість*. 2015. № 17. С. 90-96.

Kyshenko V.D., Kryshchenko D.O., Romaschuk O.M., Gorpinchenko A.S. ASSESSMENT OF THE CHARACTERISTIC MANIFESTATIONS OF THE BEHAVIOR OF COMPLEX TECHNOLOGICAL OBJECTS

The article examines the technological processes of food production, which have all the characteristic features of complex dynamic systems, including multifaceted behavior, which includes the presence of deterministic, stochastic and chaotic manifestations. Analysis and identification of such manifestations allows prompt adoption of appropriate control strategies, which will ensure resource-saving functioning of technological control objects in various production conditions. The self-organization property of complex technological complexes as control objects due to their significant nonlinearity and distance from the state of thermodynamic equilibrium and, as a result, due to the formation of dissipative spatio-temporal structures, is the basis for ensuring optimal values in conditions of changing behavior, including chaotic processes, which is an urgent problem at the current stage of development of food industry automation systems. Chaotic processes observed in object behavior and caused by internal factors in many cases play a constructive role in the adaptation of complex objects through self-organization. For the organization of effective management, based on the synthesis of management strategies of not forced, but topologically agreed resource-saving nature of resonant action, it is necessary to conduct a study of such production facilities by the method of recurrent analysis.

On the basis of the recurrent analysis of time series of the main parameters of the functioning of the technological processes of the sugar and alcohol industry, the peculiarities of the behavior of complex technological complexes characterized by intermittency, which is an alternation of deterministic, stochastic and chaotic modes in conditions of non-stationarity, were revealed. Quantitative indicators of recurrent diagrams are also defined as a measure of determinism, a measure of recurrence, entropy, trend, divergence, which characterize the signs of the object's behavior, as well as to determine the nature of the processes, to identify some attributes of the object's behavior (type of modes, noise level compared to useful signal, trend reversal). The obtained recurrent diagrams and numerical values of the criteria for evaluating the nature of the behavior of technological processes made it possible to implement effective management solutions, which ensured the improvement of product quality, the improvement of equipment productivity, and the saving of raw and energy resources.

Key words: alcohol production, sugar production, control object, nonlinear dynamics, deterministic chaos, recurrent analysis, time series.

УДК 681.121.84

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/15>**Кулінченко Г.В.**

Сумський державний університет

Панич А.О.

Сумський державний університет

Журба В.О.

Сумський державний університет

Соколов С.В.

Сумський державний університет

МОДЕЛЮВАННЯ РЕГУЛЯТОРА ТЕМПЕРАТУРИ ПІДІГРІВУ ГАЗУ

Необхідність розробки моделі регулятора температури підігріву газу обумовлена перспективою використання таких регуляторів в установках, що використовуються в технологіях розподілу газу та інших додатках. Потреба підігріву потоку газу виникає при дроселюванні потоку, як при використанні дроселюючих пристроїв, так і детандерів. Детандер-генераторні агрегати (ДГА), забезпечуючи утилізацію надлишкового тиску газу магістралі, одночасно дозволяють покращити екологічний стан навколишнього середовища. Перепоною для підвищення ефективності процесів утилізації надлишкового тиску потоку газу є недосконалість систем керування процесами утилізації, зокрема підігріву газу. Врахування об'ємів використання засобів керування у газорозподільчих мережах України визначає актуальність досліджень, що ведуться у цій галузі.

Альтернативою для підігрівачів, що працюють за рахунок спалювання газу у точці розподілу потоку, є безвогневі підігрівачі. Можливість використання безвогневих підігрівачів базується на генераторах, що під'єднуються до турбіни детандера.

Ідеологія розробки систем керування процесами дроселювання будується відповідно до дії випадкових та детермінованих збурень параметрів потоку газу, що заважають стабілізації режимів функціонування всієї установки.

Досліджено канал керування температурою потоку газу, що надходить до турбіни турбодетандера. Оцінена ступінь впливу збурюючих факторів (витрати газу) на температуру потоку. Для керування нелінійним об'єктом, яким є підігрівач потоку газу, вибрано ШІМ регулятор, що реалізується на мікропроцесорному контролері та потужних комутуючих пристроях. Відповідно до енергозберігаючих принципів керування підігрівачем розроблені алгоритми програмного забезпечення регулятора. Практична значимість отриманих результатів полягає у можливостях вбудовування дослідженого локального регулятора в загальну систему керування установкою утилізації надлишкового тиску.

Ключові слова: енергозбереження, збурення параметрів, тепловий баланс, теплоелектричний нагрівач, ШІМ–регулятор.

Постановка проблеми. Процес розподілу природного газу зазвичай супроводжується зміною тисків на газорозподільних станціях (ГРС) та газорегуляторних пунктах (ГРП), і здійснюється шляхом дроселювання потоків. Один із напрямків енергозбереження процесу розподілу – це застосування детандер–генераторних агрегатів (ДГА) для отримання електроенергії за рахунок використання надлишкового тиску газу. Надлишковий тиск утворюється не тільки на газогонах системи газопостачання, але і в процесі генерації електроенергії на теплоелектростанціях.

Узагальнення завдань керування процесами генерації електроенергії показує, що на якість параметрів електроенергії впливає не тільки стабільність швидкості обертання агрегату турбіна/генератор. Суттєвим чинником впливу на ефективність процесів перерозподілу потоків газу, що супроводжуються ефектом дроселювання, є температура потоку та пов'язані з нею газофізичні параметри потоку, що дроселюється. Природними є заходи, які сприяли стабілізації параметрів потоку газу в умовах дії збурень по температурі потоку та його витрат.

Досить прийнятним у практичному використанні став процес підігріву газу, який дозволяє

значно зменшити випадання гідратів та вологи у вузлі дроселювання, а також покращити умови обертання турбіни. Це важливо і з огляду на те, що газові турбіни працюють не тільки на ГРП та ГРС, але й на різних рухомих об'єктах.

Спроби узагальнення підходу до керування підігрівом газу, що надходить до турбіни, не завжди видаються вдалимими, оскільки ці об'єкти керування відрізняються як конструктивно-технологічними параметрами, так і різними параметрами газових потоків. Тому при вирішенні питань побудови схеми підігріву газом головним питанням є методи підігріву. Виходячи із принципів організації теплового контакту носія тепла з потоком нагріву, формуються критерії подальшого удосконалення засобів керування процесом.

Крім завдань підвищення ефективності процесів обігріву, актуальним завданням для нашого часу залишається покращення екологічного стану навколо промислових об'єктів. Тому основні тенденції організації процесу обігріву газу базуються на використанні проміжних носіїв теплової енергії.

Конкуруючий напрямком побудови схем обігріву – від проектів, спрямованих на спрощення експлуатаційних заходів, спрямовується на дистанційне та автоматизоване керування об'єктами газопроводів [1]. Відповідно, розбудова засобів автоматизованого керування, що забезпечують ефективне керування енергопотоків, визначає актуальність завдань досліджень сьогодення.

Характер дії збурень параметрів керованого потоку газу, ускладнює використання класичних підходів до побудови *PID* – регуляторів, тим більше, для опису досліджуваного об'єкта керування (ОК) використовуються нелінійні функції.

Необхідність реалізації мікропроцесорних засобів керування згаданими установками обумовлює заходи по дослідженню моделей регуляторів, які б забезпечували необхідну якість перехідних процесів регулятора. Узагальнення результатів дослідження моделей регуляторів дають можливість практичного впровадження мікропроцесорних регуляторів у суміжних галузях промисловості.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглядаючи підходи до побудови підігрівачів потоку газу, можна констатувати, що вони в основному використовуються на газорозподільчих станціях в утилізаційних турбодетандерних агрегатах (УТДА) [2]. В залежності від місця використання, при підігріві газу використовуються спеціальні підігрівачі з проміжним носієм тепла – водою або парою. На ГРС або ГРП нагрівання зазвичай здійснюється від зовнішніх теплових джерел. У будь

якому варіанті розгляду процесу підігріву потоку газу встає питання ефективності керування цим процесом. Найбільш поширеним у газотранспортній галузі в наш час є підігрівач паливного та пускового газу ПТПГ-30, в якому використовується проміжний теплоносій з непрямым нагріванням [3].

Ігнорування специфічних умов експлуатації при використанні серійних підігрівачів такого типу, призводить до того, що теплова потужність більшості підігрівачів перевищує реальні потреби ГРС. Тому підігрівачі працюють недовантаженими, зменшуючи ККД установок ГРС.

До суттєвих недоліків підігрівачів такого типу можна також віднести певні витрати паливного газу на підігрівач («власні технологічні потреби»), зношення обладнання, викиди в атмосферу, складність в експлуатації паливного обладнання.

Заходи по підвищенню ефективності редукування природного газу на ГРС спрямовані на пошук альтернативних джерел тепла, що використовують енергію вітру, сонця та ін. Проте, залежність цих джерел від природно-кліматичних умов передбачає розробку комбінованих пристроїв, що значно підвищує кошторис проектів, зменшуючи ефективність установок.

Іншим напрямком досліджень процесів підігріву є безвогневі методи підігріву, наприклад, термоакустичного редуктора, який працює з використанням резонансного ефекту Гартмана – Шпренгера [4]. Експерименти, що здійснювалися з генератором Гартмана довели, що затрати на реконструкцію обладнання перебільшують ті здобутки, що отримують від цього пристрою.

Вихровий ефект Ранка – Хілша, що створює умови розділення теплових потоків, також використовується для підігріву потоку газу. Результати досліджень, що реалізовані в газорозподільчій мережі Італії, показують обмеженість практичного впровадження такого обладнання, оскільки воно ефективне в обмеженому діапазоні навколишніх температур та при високих значеннях перепаду тисків [5].

Враховуючи те, що у переважній кількості УТДА використовується для генерації електроенергії [6, 7], тобто турбодетандери використовуються в якості механічного приводу електрогенераторів, здається логічним будувати підігрівачі газу на базі електричних джерел теплової енергії.

До таких підігрівачів можна віднести підігрівач, в якому в якості проміжного теплоносія використовується мастило. Сумське машинобудівне науково-виробниче об'єднання має позитивний

досвід із впровадження таких нагрівачів у республіці Казахстан (УОГ, м. Бозой), Узбекистан (УКПП, м. Шаркий Бердак, м. Мінгбулак).

Тому дослідження моделі регулятора температури підігріву газу слід вести, орієнтуючись на підігрівач із мастильним носієм тепла, де виключені витрати газу на власні потреби та викиди результатів спалюваного газу в навколишнє середовище.

Аналізуючи математичні моделі підігрівачів, що відомі на теперішній час, можна побачити, що деякі з них [8] характеризуються значною мірою деталізації (об'єкт п'ятого порядку), відповідними складнощами по реалізації *PID* – регулятора, який представлено ланкою лише другого порядку. При цьому необхідність застосування *PID* – регулятора ґрунтується на неточних вимірюваннях манометричного термометра та некоректних налаштуваннях релейного регулятора.

В інших моделях, що спрямовані на реалізацію системи керування нагрівачем непрямого нагріву [9], підігрівач представляється як об'єкт автоматизації. Після відповідної лінеаризації моделі такого нелінійного об'єкта можна побудувати регулятор для певного діапазону відхилень від вибраної робочої точки. Наступні кроки реалізації системи керування повинні передбачати заходи структурно-параметричного синтезу регулятора.

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є підвищення енергетичної ефективності роботи ДГА за рахунок використання мікропроцесорних засобів керування установкою підігріву потоку газу, що надходить до дросельного пристрою керування потоком газу. Для досягнення вказаної мети потрібно вирішити наступні завдання:

- оцінити вплив збурень параметрів потоку на стабільність утримання заданої температури;

- проаналізувати ефективність вибраного каналу керування;

- виконати структурно-параметричний синтез регулятора температури підігріву потоку газу.

Матеріали досліджень. Відповідно до прийнятої структури регулятора температури газового потоку, у схемі задіяні мастильний нагрівач на базі теплоелектричний нагрівач 4 (ТЕН) мастила 3, яке через стінки змійовика 2 передає теплову енергію потоку газу. Регулювання температурою потоку здійснюється регулятором 5 відповідно до заданого значення температури $T_{зад}$ та плинної температури потоку T_2 , яка утворилася в результаті нагрівання вхідного потоку з температурою T_1 . Збурення значень температури потоку утворюються внаслідок регулювання витрат потоку дроселем 7 шляхом впливу на дросельну засувку регулятора витрат 8. Регулювання витрат потоку пов'язано із забезпеченням необхідного моменту та швидкості обертання турбіни ДГА.

Структурна схема підігрівача ГРС представлена на рис. 1.

Для отримання математичної моделі мастильного підігрівача складемо рівняння балансу теплових енергій. При цьому вважаємо, що енергія, що акумулюється в просторі підігрівача E_A визначається різницею енергій, які надходять до нього та залишають його:

$$E_A = E_E + E_{In} - E_{Out} \quad (1)$$

де E_E – енергія, що передається в підігрівач від ТЕНА;

E_{In} – енергія, що надходить в підігрівач з потоком газу;

E_{Out} – енергія, яку випромінює підігрівач у навколишнє середовище.

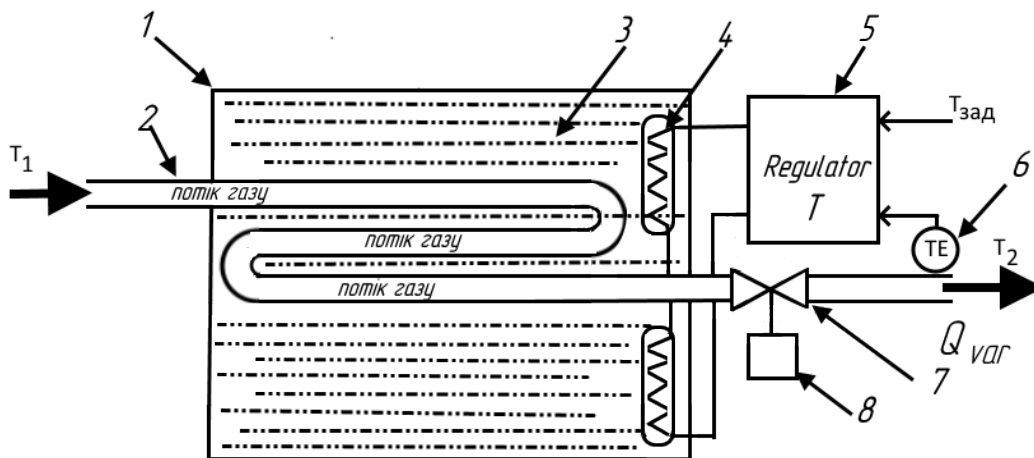


Рис. 1. Структурна схема підігрівача

1 – мастильний підігрівач; 2 – змійовик; 3 – мастило; 4 – ТЕН; 5 – регулятор температури; 6 – давач температури; 7 – дросель потоку газу; 8 – регулятор витрат турбіни

При цьому $E_E = U^2/R$

$$E_{Out} = g * A * (T_{out} - T_c) \quad (2)$$

$$E_{In} = Q * C_r * (T_{in} - T_{out}) = - Q * C_r * (T_{out} - T_{in})$$

- де U – напруга, що підводиться до ТЕНа;
 R – опір ТЕНа; g – коефіцієнт конвекції;
 A – площа поверхні підігрівача;
 T_{out} – температура потоку газу, що надходить у дроселюючий пристрій;
 T_c – температура навколишнього середовища;
 T_{in} – температура потоку газу, що надходить у підігрівач; Q – швидкість потоку газу;
 C_r – питома теплоємність газу.

Записані рівняння відображують обмін енергіями внаслідок зміни температури потоку на вході та виході підігрівача, а втрати енергії відбуваються внаслідок природної конвекції у навколишній простір з температурою T_c .

При такому описі підігрівач, він же теплообмінник, представляється як об'єкт із зосередженими параметрами, оскільки для отримання необхідної температури на виході обігрівача потреби в інформації щодо розподілу теплового поля у його просторі немає. При цьому вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів. Крім того вважаємо, що сталі часу теплових процесів набагато більше ніж тривалість керуючих впливів.

Якщо прийняти, що середня температура потоку T_{out} , що витікає із підігрівача, наближена до температури мастила у просторі підігрівача, то це дає змогу записати рівняння теплового балансу у вигляді диференційного рівняння:

$$m_m * C_m \frac{dT_{OUT}}{dt} = \frac{U^2}{R} - Q * C_r * (T_{OUT} - T_{IN}) - g * A * (T_{OUT} - T_c) \quad (3)$$

де C_m, m_m – питома теплоємність та маса мастила у підігрівачу.

Використовуючи позначення:

$$T_i = C_m, m_m; \quad k_c = g * A \quad (4)$$

та рівняння (3), в середовищі MATLAB Simulink будується математичну модель досліджуваного обігрівача, схема якої зображена на рис. 2.

Як видно із рівнянь і отриманої моделі, ОК описується аперіодичною ланкою першого порядку. Затримка сигналу по каналу вимірювання температури, яка характерна для давачів температури, суттєво на динаміку об'єкта керування не впливає.

Перший крок побудови моделі полягає в отриманні перехідної характеристики об'єкта, що дозволяє скорегувати коефіцієнти моделі на основі експериментальних даних. Практична оцінка параметрів моделі здійснювалася шляхом виміру часу, який необхідний для нагрівання робочого тіла нагрівача до певної температури [10]. Як і очікувалося, характер кривої відповідає аперіодичному процесу, а стала часу нагрівача залежить від маси мастила m_m , яке завантажено у підігрівач, тобто від необхідного значення енергії теплового потоку. Слід зауважити, що зазвичай передатні функції теплообмінників представляються аперіодичними ланками другого порядку. Причина відмінності опису класичного теплообмінника і термopідігрівача пояснюється мінімальними кінематичними зрушеннями потоку гріючого агента. Крім того, сам нагрівач представляється об'єктом із зосередженими параметрами.

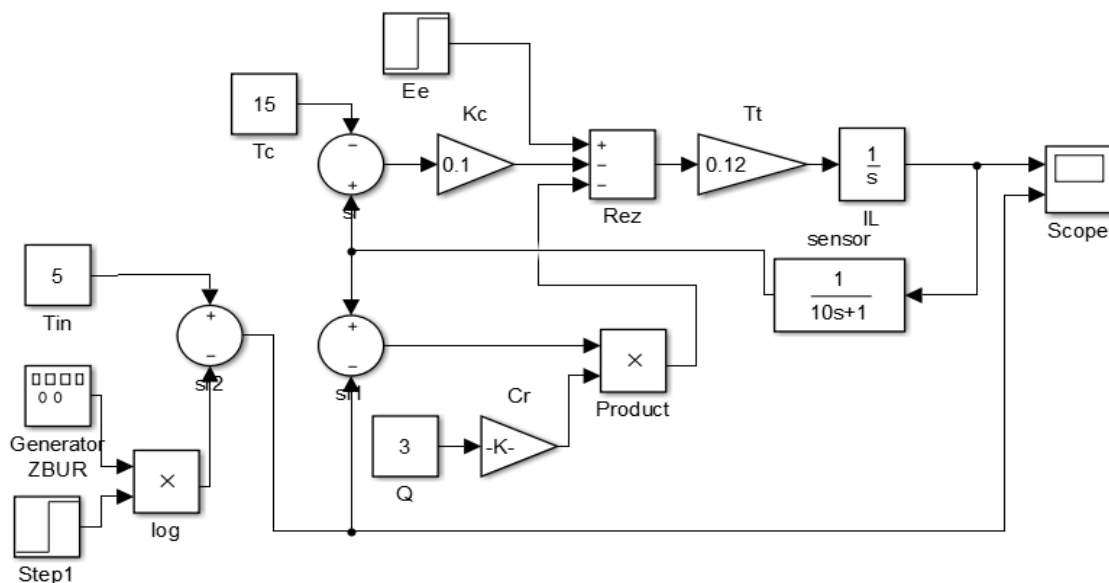


Рис. 2. Схема моделі підігрівача

Наступний крок дослідження моделі передбачає оцінку ступеня впливу збурень параметрів об'єкту на вихідну температуру потоку, що надходить на дроселювання. Збурюючими впливами на температуру T_{out} є зміни витрат потоку Q та вхідна температура потоку T_{in} підігрівача.

В моделі, що зображена на рис. 2, введено симулятор збурень, який вмикається у час закінчення перехідного процесу (100 с) після вмикання термоелектричного нагрівача (ZBUR). На рис. 3 показані зміни вихідного сигналу в результаті дії зазначених збурень.

Із приведених осцилограм видно, що при однакових відносних змінах параметрів впливу, чутливість до збурень каналу «витрати потоку/вихідна температура» більша, ніж каналу « T_{in}/T_{out} ».

Звертаючись до структури регулятора каналу керування «електротермонагрівач/температура», що стабілізує температуру підігрівача, основним

питанням є метод регулювання. Цей метод визначається виконавчим механізмом, який керує тепловим потоком, а також сталими часу ОК, які визначаються на етапі ідентифікації його параметрів.

З огляду на значення сталих часу нашого ОК, цілком прийнятним було б використання PD -регулятора, оскільки використання інтегральної складової в реальному регуляторі не має сенсу. Проте, керуючись міркуваннями енергозбереження, досить перспективним здається застосування ШІМ (Широтно імпульсна модуляція) – контролера в комбінації з PD -регулятором [11].

Додавання пропорційної складової дає змогу зменшити амплітуду автоколивань, як видно із результатів моделювання схеми ШІМ регулятора (рис. 4а), та осцилограми вихідного сигналу (рис. 4б).

Такий регулятор досить просто реалізується на контролері МІК-127/301(Ів– Франківськ) [12] на мові FBD та ПЛК фірми Siemens –S7-400.

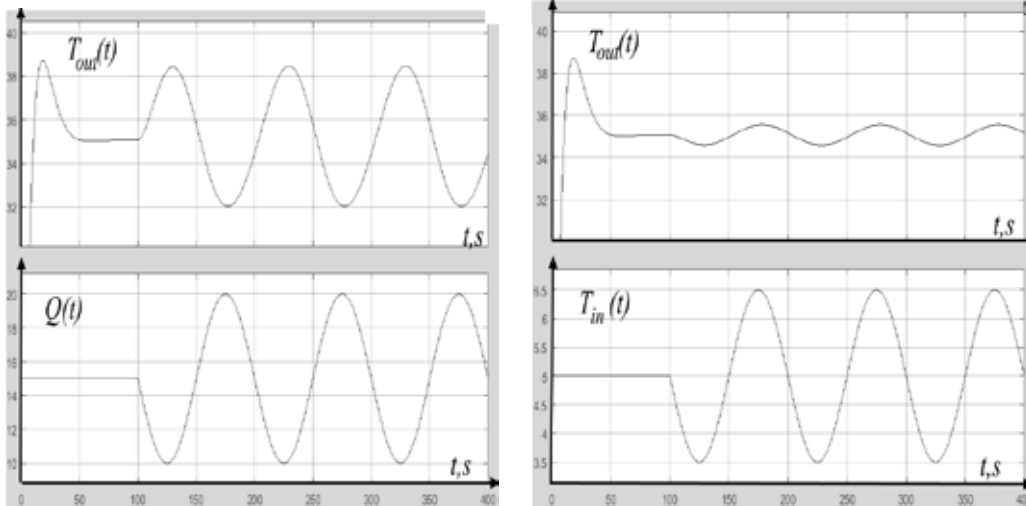


Рис. 3. Осцилограми результатів дії збурень на температуру потоку

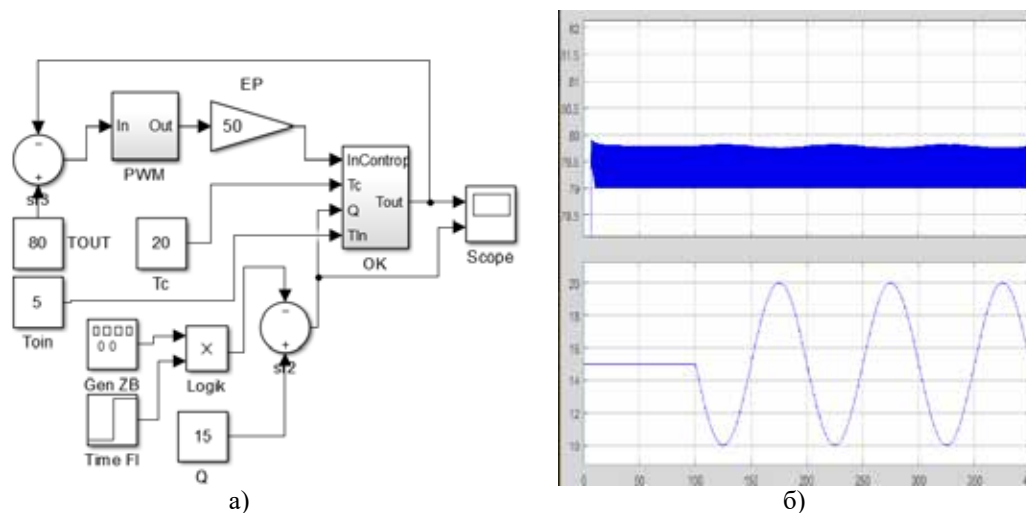


Рис. 4. Схема моделювання процесу ШІМ регулятора (а) та осцилограма вихідного сигналу (б)

Висновки. Відповідно до поставленої мети, яка передбачає подальше підвищення ефективності функціонування утилізаційних ДГА, розроблена модель підігрівача потоку газу. Актуальність досліджень визначається перспективою впровадження таких регуляторів не тільки в схемах з використанням ДГА, а й на ГРС та ГРП, де задіяні технологічні операції дроселювання потоків газу.

Використання безвогневого підігрівача дає змогу скоротити витрати газу на власні потреби та покращити екологічні параметри установки.

Побудова моделі підігрівача, який по опису його моделі є нелінійним, не передбачає кроків

по лінеаризації опису моделі. Такий підхід зумовлений тим, що на етапі впровадження загальної мікропроцесорної системи керування процесом утилізації надлишкового тиску прогнозується використання ШІМ регулятора температури. Цей регулятор передбачається підпорядкувати зовнішньому контуру керування витратами потоку газу, що надходить на дроселювання або ДГА.

В дослідженнях оцінені результати компенсації збурень параметрів потоку газу і підтверджена доцільність вибору ШІМ регулятора температури безвогневого обігрівача. Розглянута можливість побудови регулятора на мікропроцесорних засобах, що наявні на ринку.

Список літератури:

1. Крупка В.О., Іваник Є.Б., Марчук О.М., Федотова С.Ю. Сучасна техніка і технології ремонту лінійної частини магістральних трубопроводів. Нафтогазова енергетика. 2011. № 3(16). С. 12–29.
2. Ярошенко В. М. Ексергетичний аналіз процесів енергозбереження в газотранспортній системі. Холодильна техніка та технологія, 58 (1), 2022. С. 40–49.
3. Посмак М.П., Райнов Б.М., Сычев С.Л., Черемисин О.Р. Каскадное управление подогревателями газа на ГРС. Трубопроводный транспорт. 2013. 3(81) 2013. С. 28–31.
4. Schipachev, A.M., Dmitrieva, A.S. Application of the resonant energy separation effect at natural gas reduction points in order to improve the energy efficiency of the gas distribution system. Journal of Mining Institute. 2021, 248(2), pp. 253–259
5. Danieli P., Masi M., Lazzaretto A., Carraro G. Volpato G. A smart energy recovery system to avoid preheating in gas grid pressure reduction stations. Energies 2022, 15, 371 <https://doi.org/10.3390/en15010371>.
6. Черных А.П., Васильев А.И. Использование перепада давления газа, редуцируемого на ГРС и ГРП для получения электроэнергии и тепла. Восточно-Европейский журнал передовых технологий. 2013. 3/12 (63). С. 73–75.
7. Мавжудова Ш.С., Усмонов Н.О. Использование потенциальной энергии сжатого природного газа для выработки электрической энергии. Наука, техника и образование, 2016. С. 49–52.
8. Федоришин Р.М. Моделирование системы подогреву природного газа на автоматизованих газорозподільних станціях. Видавництво Національного університету «Львівська політехніка» 2006. С. 22–33.
9. Горбійчук М.І., Когутяк М.І, Гарасимів В.М. Математична модель підігрівача з проміжним теплоносієм. Методи та прилади контролю якості. 2021. № 2 (47). С. 83–95. DOI:10.31471/1993-9981-2021-2(47)-83-95
10. Defendi R.O., Paraiso P.R., Jorge L.M.M. Modeling, simulation, and validation of an electric heater model operating in the transient regime. Engvista. 2021. V. 17. №. 3, p. 421–432.
11. Yajie Zhu et al. Design and Implementation of Micro Temperature Control System Based on PWM. IOP. 2019. Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 677, 032004. DOI:10.1088/1757-899X/677/3/032004
12. http://www.microl.ua/PDF/PDF_MIK-127/301_Trexfordturnyi_PID-SHIM_reg

Kulinchenko H.V., Panych A.O., Zhurba V.O., Sokolov S.V. MODELING OF THE GAS HEATING TEMPERATURE REGULATOR

The need to develop a gas heating temperature regulator model is due to the prospect of using such regulators in installations used in gas distribution technologies and other applications. The need to heat the gas flow arises when throttling the flow, both when using throttling devices and expanders. Expander-generator units (DGA), ensuring the disposal of excess pressure of main gas, simultaneously allow to improve the environmental condition of the environment. An obstacle to improving the efficiency of the processes of utilization of excess pressure of the gas flow is the imperfection of the management systems of the utilization processes, in particular, gas heating. Taking into account the volumes of use of control tools in gas distribution networks of Ukraine determines the relevance of research conducted in this field.

An alternative to heaters that work by burning gas at the flow distribution point are flameless heaters. The possibility of using flameless heaters is based on generators connected to the expander turbine.

The ideology of developing control systems for throttling processes is built according to the action of random and deterministic disturbances of gas flow parameters, which interfere with the stabilization of the operation modes of the entire installation.

The temperature control channel of the gas flow entering the turboexpander turbine was investigated. The degree of influence of disturbing factors (gas flow) on the temperature of the flow is estimated. To control a non-linear object, which is a gas flow heater, a PWM controller implemented on a microprocessor controller and powerful switching devices was chosen. In accordance with the energy-saving principles of heater control, the algorithms of the controller software were developed. The practical significance of the obtained results lies in the possibilities of embedding the investigated local regulator into the general control system of the overpressure utilization plant.

Key words: *energy saving, parameter perturbation, heat balance, thermoelectric heater, PWM controller.*

Левкін Д.А.

Державний біотехнологічний університет

Жерновникова О.А.

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди

Штонда О.Г.

Харківський національний педагогічний університет імені Г.С. Сковороди

УПРАВЛІННЯ ЯКІСТЮ ТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ В БІОТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСАХ

У статті досліджені деякі аспекти контролінгу параметрів біотехнологічних систем під дією джерел навантаження. З метою підвищення якості біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона потрібно здійснити попередній аналіз структури мікробіологічного об'єкта та технічних характеристик лазерних випромінювачів. Врахувавши особливості біотехнологічного процесу, здійснюється розрахунок траєкторій лазерного поділу ембріона, інтенсивності лазера, швидкості руху лазерного джерела поверхнею ембріона та інших характеристик модельованої системи. Корекція інтенсивності лазерної дії забезпечена за рахунок реалізації прикладної оптимізаційної математичної моделі мінімізації величини неузгодженості між припустимою температурою в зоні дії лазерного променя на ембріон та її розрахованими значеннями. В існуючих засобах моделювання відсутні операції визначення радіуса джерела лазерного променя, тобто n 'ятна, і розрахунку швидкості руху лазерного джерела поверхнею ембріона. Для отримання інформації про температурний режим лазерної дії застосований тепловізор, що відчутно зменшує точність корекції інтенсивності та інших технічних параметрів лазерних випромінювачів. Це призводить до зменшення точності розрахунку та оптимізації основних параметрів біотехнологічного процесу та, як результат цього, погіршується якість управління та обґрунтованого вибору технічних рішень в біотехнологічних процесах.

Авторами розроблена методика управління якістю технічних рішень для забезпечення функціонування технічних і біотехнологічних систем під дією рухомих джерел сканованого лазерного випромінювання. Визначено, що використання запропонованої методики для досягнення якісних показників біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона, підвищує точність контролінгу потужності та часу термічної дії на 20%.

Ключові слова: біотехнологічний процес, засоби моделювання, управління, технічні рішення, якісні показники.

Постановка проблеми. Для трансплантації ембріонів і збільшення племінних високоцінних корів потрібно використовувати високоякісний матеріал. Тому стає актуальною задача якісного визначення життєздатних ембріонів з метою подальшої трансплантації.

Під час оцінки якості ембріонів виконавцям доводиться працювати з мікроскопічними об'єктами, тобто, візуальний контроль виконується за безпосередньою участю тривалого аналізатора людини. Оператор розміщує об'єкт, що досліджується, під мікроскоп і за морфологічними критеріями визначає клас досліджуваного ембріона. Під час оцінки якості ембріонів виконавцям доводиться працювати з мікроскопічними об'єктами, тобто, візуальний контроль виконується

за безпосередньою участю тривалого аналізатора людини. Основні недоліки використання зорового аналізатора людини – низька надійність, висока трудомісткість, швидка стомлюваність, що є причиною розладу органів зору. Цими та іншими факторами обумовлена низька достовірність результатів оцінки ембріонів оператором – близько 50% досліджуваних ембріонів, здатних до розвитку, оцінюються як непридатні. Тому виникає необхідність створення автоматизованої системи аналізу матеріалу для штучного запліднення з метою підвищення якості оцінки та звільнення людини від одноманітної стомлювальної роботи, або принаймні заміни зорового аналізатора людини.

Побудова автоматизованої системи візуального контролю стала можливою завдяки розвитку сис-

тем технічного зору, що забезпечують сприйняття відеоінформації про навколишнє середовище через автоматичну обробку та аналіз зображень. Одна з основних переваг, яка притаманна системам технічного зору, полягає в реалізації практично 100% контролю. Системи знайшли широке застосування в галузі автоматизованого контролю та управління технологічними процесами, при виготовленні виробів у машинобудуванні, електронній техніці, дефектоскопічному аналізі, для зчитування та обробки символічної інформації, зорового контролю довільних маніпуляторів, що становлять основу робототехнічних комплексів нового покоління, при розв'язанні задач ідентифікації об'єктів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В публікаціях [1, 2] розроблений та реалізований алгоритм керування складними системами в якості веб-програми. Врахувавши зони заборони, обмеження на припустимі відстані між об'єктами, авторами публікацій [3–5] розв'язана задача оптимального компонування еліптичних об'єктів в обмеженій області. Побудована та реалізована математична модель задачі компонування об'єктів в контейнері [4, 5]. Наведений математичний опис структури та встановлені особливості формування виробів зі сталі для підвищення якості виготовленої продукції в публікації [6]. В статті [7] здійснене математичне моделювання біотехнологічного процесу електропорації мембрани клітини. Для побудови адекватної математичної моделі електропорації мембрани застосований ймовірносний підхід до утворення електропор. Авторами публікацій [8, 9] отримані умови адекватності математичних моделей для трибосистем та розроблена методика діагностування трибосистем під час їх експлуатації. Автоматизація технологічного процесу в сільському господарстві вимагає запровадження нових пристроїв, що в сучасних умовах функціонування біотехнологічних підприємств є можливим лише за рахунок інвестування коштів з внутрішніх та зовнішніх джерел. Загальну характеристику процесу інвестування в АПК та в суміжні підприємства розглянуто в роботах [10–12].

Постановка завдання. Розробити методику до дотримання якісних показників прийняття технічних рішень при забезпеченні біотехнологічних процесів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Автори розв'язують основну оптимізаційну задачу, яка полягає в пошуку оптимальних параметрів лазерних випромінювачів при дії лазерного променя на ембріон з врахуванням обмежень на результуюче температурне поле, для підвищення якості лазерного поділу мікробіологічного

об'єкта. Це значить, що потрібно відшукати такі параметри вектора z^* лазерної дії, які б забезпечували виконанню екстремуму температурного поля в заданій області матеріала:

$$\underset{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{\text{extr}} T(x, y, z, t, z^*), \quad (1)$$

де $T(x, y, z, t, z^*)$ – температурне поле;
 $(x, y, z) \in \Omega^*$ – область ембріона Ω ;
 t_0 – початковий момент часу t ;
 t^* – кінцевий момент часу t ;
 T_i^* – припустиме значення температурного поля.

Це значить, що потрібно відшукати такі параметри вектора z^* лазерної дії, які б забезпечували виконання екстремуму температурного поля в заданій області матеріала:

$$z_0^* = \arg \underset{\substack{(x,y,z) \in \Omega^* \\ t \in [t_0; t^*] \\ z^* \in Z}}{\text{extr}} T(x, y, z, t, z^*), \quad (2)$$

де z_0^* – вектор параметрів лазера.
 Обмеження на функцію мети (температурне поле):

$$G_i T(x, y, z, t, z^*) \Big|_{\Omega} \leq (\geq) T_i^*, \quad (3)$$

де G_i – довільний оператор.
 Вектор параметрів лазерної дії z^* :

$$z^* = (x, y, z, t, u, E, s(t), v(t), Q(x, y, z, t), S), \quad (4)$$

де u – інтенсивність лазерного джерела;
 E – енергія термічного навантаження;
 $s(t)$ – траєкторія руху лазерного джерела;
 $v(t)$ – швидкість руху лазерного джерела;
 $Q(x, y, z, t)$ – густина термічного навантаження;
 S – розміри лазерного джерела.

Виходячи з технічних характеристик випромінювачів і особливостей ембріона, задані параметри вектора z^* .

Для розрахунку температури лазерної дії потрібно розв'язати крайову задачу системи нелінійних, багатовимірних рівнянь теплопровідності в багаточаровому середовищі:

$$\begin{cases} 5.46 \frac{\partial T_1}{\partial t} = 0.71 \left(\frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} + \frac{2}{r_1} \frac{\partial T_1}{\partial r} \right) + 55.02; \\ 5.44 \frac{\partial T_2}{\partial t} = 0.96 \left(\frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} + \frac{2}{r_2} \frac{\partial T_2}{\partial r} \right) + 94.1; \\ 5.3 \frac{\partial T_3}{\partial t} = 0.94 \left(\frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} + \frac{2}{r_3} \frac{\partial T_3}{\partial r} \right) + 390.25; \\ 5.1 \frac{\partial T_4}{\partial t} = 0.91 \left(\frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} + \frac{2}{r_4} \frac{\partial T_4}{\partial r} \right) + 452.4. \end{cases} \quad (5)$$

Врахувавши температуру лазерної дії на зовнішню оболонку ембріона (зону пелюцида) та клітини зародків, запишемо граничні умови:

$$\begin{cases} T(0; 0) = 100 \text{ } ^\circ\text{C}; \\ T(53; 2550) = 37 \text{ } ^\circ\text{C}. \end{cases} \quad (6)$$

Граничні умови теплового потоку на межі розділу зони пелюцида та живильного середовища, в якому знаходиться ембріон:

$$-0,67 \frac{\partial T_1}{\partial r}(0, t) = 4, 4 . \quad (7)$$

Рівності розділу середовищ:

$$\begin{cases} T_1(20; 400) = T_2(30; 403), -0,71 \frac{\partial T_1}{\partial r} = -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r}, r \in [20; 30]; \\ T_2(30; 403) = T_3(40; 1500), -0,96 \frac{\partial T_2}{\partial r} = -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r}, r \in [30; 40]; \\ T_3(40; 1500) = T_4(50; 2250), -0,94 \frac{\partial T_3}{\partial r} = -0,91 \frac{\partial T_4}{\partial r}, r \in [40; 50]; \\ T_4(50; 2250) = T_5(60; 2500), -0,91 \frac{\partial T_4}{\partial r} = -0,9 \frac{\partial T_5}{\partial r}, r \in [50; 60]. \end{cases} \quad (8)$$

Рівності неперервності температурних полів в ембріоні:

$$\begin{cases} T(20; 400 - 0) = T(20; 400 + 0); \\ T(30; 403 - 0) = T(30; 403 + 0); \\ T(40; 1500 - 0) = T(40; 1500 + 0); \\ T(50; 2250 - 0) = T(50; 2250 + 0); \\ T(60; 2550 - 0) = T(60; 2550 + 0). \end{cases} \quad (9)$$

Обґрунтуємо коректність однорідної крайової задачі:

$$\begin{cases} \frac{\partial T_1}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_1}{\rho_1 c_1} \right) \frac{\partial^2 T_1}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [0; r_1], t \in [0; t_1]; \\ \frac{\partial T_2}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_2}{\rho_2 c_2} \right) \frac{\partial^2 T_2}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_1; r_2], t \in [t_1; t_2]; \\ \frac{\partial T_3}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_3}{\rho_3 c_3} \right) \frac{\partial^2 T_3}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_2; r_3], t \in [t_2; t_3]; \\ \frac{\partial T_4}{\partial t} = \left(\frac{\lambda_4}{\rho_4 c_4} \right) \frac{\partial^2 T_4}{\partial r^2} \quad \text{при } r \in [r_3; r_4], t \in [t_3; t_4]. \end{cases} \quad (10)$$

В загальному виді крайові умови (6), (7):

$$B_0 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, 0) + B_1 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_1) + B_2 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_2) + B_3 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_3) + B_4 \left(\frac{\partial}{\partial r} \right) T(r, t_4) = \varphi(r). \quad (11)$$

Для крайової задачі (10), (11) виконані умови параболічності, отже, розрахункова математична модель процесу лазерної дії на ембріон буде коректною в просторі узагальнених функцій степеневого зростання [13–15]. В залежності від специфічних особливостей модельованих систем обрані методи доцільно застосувати для управління якістю техніко-технологічних рішень [16].

На рисунку запропоновано алгоритм для управління якістю техніко-технологічних рішень в умовах невизначеності.

Підготовка пристрою (рис. 1) до роботи розпочинається з введення вихідної інформації. З блоку 9 на вхід блоку 3 надходить припустиме значення контрольованого фізичного параметра, наприклад, припустиме значення температурного поля в найближчих точках лазерного джерела дії. У блок 7 завдання параметрів сіткової моделі надходять вихідні значення відповідних параметрів для встановлення на сітковій моделі 6. З блоку 9 на вхід блоку 4 розрахунку параметрів лазера надходить інформація про вихідні значення параметрів дії лазера на ембріон, а саме: інтенсивність джерела лазерного променя, енергію та час термічної дії, траєкторію та швидкість руху лазерного джерела, густину термічної дії, геометричні розміри лазерного джерела. На цьому підготовку пристрою до роботи закінчено.

Вихідні параметри лазера з блоку 4 надходять на вхід блоку 5, що дає можливість забезпечити моделювання в блоці 6 процесу дії лазера на ембріон. Значення температурного поля з контрольованих точок сіткової моделі блоку 6 надходять на вхід блоку виділення максимуму 1 температурного поля, а потім на вхід блоку порівняння 2. У цьому блоці здійснюється порівняння максимального значення температурного поля з заданим припустимим значенням. Якщо температурне поле сіткової

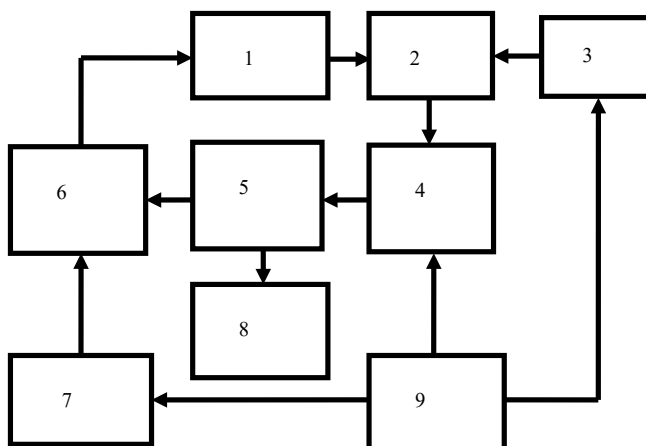


Рис. 1. Алгоритм для управління якістю техніко-технологічних рішень в умовах невизначеності:

- 1 – блок виділення максимуму;
- 2 – блок порівняння;
- 3 – блок припустимого значення;
- 4 – блок розрахунку параметрів лазера;
- 5 – блок виконавчих механізмів;
- 6 – блок сіткової моделі;
- 7 – блок завдання параметрів;
- 8 – блок ресстрації;
- 9 – блок вводу вихідної інформації

моделі вище наперед заданого, то з блоку 2 в блок розрахунку параметрів лазера 4 надходить сигнал, за яким здійснюється корекція параметрів лазера, а саме: інтенсивності джерела лазерного променя, енергії та тривалості термічної дії, траєкторії та швидкості руху лазерного джерела, густини термічної дії, геометричних розмірів лазерного джерела. Блок реєстрації 8 фіксує відповідні параметри лазера. Таким чином, за кілька ітерацій визначають оптимальні параметри лазерного променя.

Висновки. У статті закладено основи для розробки моделюючих пристроїв з метою дотримання якісних показників прийняття технічних рішень при математичному моделюванні стану біотехнологічної системи, яка містить зосереджені, дискретні джерела термічного навантаження. Авто-

рами розроблена методика для підвищення якості біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона, яку можна застосовувати для дотримання якісних показників довільних технологічних і біотехнологічних систем під дією зосереджених, дискретних джерел навантаження. Це означає, що змінюючи методи реалізації крайових задач і методи здійснення оптимізації управляючих параметрів систем, цей підхід можна застосовувати для підвищення якості довільних технологічних і біотехнологічних процесів. Як показано в цій статті, застосування результатів наведених авторами досліджень, дало змогу підвищити точність контролінгу потужності та часу термічної дії при забезпеченні біотехнологічного процесу лазерного поділу ембріона на 20%.

Список літератури:

1. Sklyar G., Barkhayev P., Ignatovich S., Rusakov V. Implementation of the algorithm for constructing homogeneous approximations of nonlinear control systems. *Mathematics of Control, Signals, and Systems*. 2022. Pp. 1–25. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00498-022-00330-5>
2. 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
3. Стоян Ю.Г., Гиль Н.И. Методы и алгоритмы размещения плоских геометрических объектов. К.: Наук. думка, 1976. С. 32–62.
4. Stoyan Y.G., Romanova T.E., Pankratov O.V., Stetsyuk P.I., Maximov S.V. Sparse Balanced Layout of Ellipsoids. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2021. Vol. 57. Issue. 6. Pp. 864–873. <https://doi.org/10.1007/s10559-021-00412-3>
5. Grebennik I.V., Kovalenko A.A., Romanova T.E., Urniaieva I.A., Shekhovtsov S.B. Combinatorial Configurations in Balance Layout Optimization Problems. *Cybernetics and Systems Analysis*. 2018. Vol. 54. Issue. 2. Pp. 221–231. <https://doi.org/10.1007/s10559-018-0023-2>
6. Скобло Т.С., Белкин Е.Л., Романюк С.П. Методика математической оценки фазового состава стали. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка*. 2014. Вип. 146. С. 8–24.
7. Shigimaga V.A., Kosulina N.G., Chorna M.A., Kosulin S.V. Cell Conductivity in Pulsed Electric Field as a Probabilistic Process of Membrane Electroporation. *New Frontiers in Physical Science Research*. Vol. 1. Pp. 72–91. DOI: 10.9734/bpri/nfpr/v1/3616A
8. Войтов В.А., Фененко К.А., Кравцов А.Г. Експериментальні дослідження інформативних амплітуд акустичної емісії трибосистем при зміні конструктивних, технологічних та експлуатаційних факторів. *Проблеми тертя та зношування*. 2021. № 4(93). С. 4–15. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.4\(93\).16248](https://doi.org/10.18372/0370-2197.4(93).16248)
9. Войтов В.А., Войтов А.В. Методичний підхід до визначення реологічних властивостей структури сполучених матеріалів у трибосистемі. *Проблеми тертя та зношування*. 2020. № 2 (87). С. 4–10. DOI: [https://doi.org/10.18372/0370-2197.24\(87\).14719](https://doi.org/10.18372/0370-2197.24(87).14719)
10. Yarmoliuk A.V., Reznik N.P. Use of investment strategies of risk management of agricultural products on the stock exchange market. *International Journal of Innovative Technologies in Economy*. 2021. No. 1(33). Pp. 1–4. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ijite/30032021/7392
11. Негода Ю.В. Оцінка та підвищення інвестиційної привабливості аграрного сектору економіки країни. *Агросвіт*. 2019. № 15. 2019. С. 14–19. DOI: 10.32702/2306-6792.2019.15.14
12. Levkin A., Levkina R., Petrenko A., Kolomiets N. Biotechnological Processes Digitalization in Animal Husbandry. *International scientific and practical conference «Digitalization of Agrarian management» ISPCDAM-2019*. Kiev: NULES of Ukraine, 2019. Pp. 52–54.
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. Левкин Д.А. Адекватность расчетной математической модели процесса лазерного воздействия на эмбрион. *Вчені записки Таврійського Національного Університету імені В.І. Вернадського. Серія: «Технічні науки»*. Київ, 2018. Т. 29 (68), № 3, Ч. 1. С. 166–169.

15. Левкін Д.А., Жерновникова О.А. Розробка математичних моделей прикладних задач геометричного проектування технічних систем. *Вісник Хмельницького національного університету. Серія: «Технічні науки»*. Хмельницький, 2022. № 4 (311). С. 133–136.

16. Kravtsov A., Suska A., Biekurov A., Levkin D. Development of a rheological model of stress relaxation in the structure of an oil film on the friction surface with fullerene additives. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. Vol. 3. No. 7 (111): Applied mechanics. Pp. 93–99. DOI: 10.31891/2307-5732-2022-311-4-133-136

Levkin D.A., Zhernovnykova O.A., Shtonda O.H. QUALITY MANAGEMENT OF TECHNICAL SOLUTIONS IN BIOTECHNOLOGICAL PROCESSES

This article investigates some aspects of the biotechnological system parameters control under the influence of load sources. To improve the quality of the biotechnological process of laser embryo separation, a preliminary analysis of the structure of the microbiological object and the technical characteristics of laser emitters should be carried out. Considering the biotechnological process peculiarities, the trajectories of the laser division of the embryo, the laser intensity, the speed of movement of the laser source over the surface of the embryo, and other characteristics of the modeled system were calculated. The correction of the intensity of the laser action is ensured by the implementation of an applied optimization mathematical model to minimize the amount of inconsistency between the permissible temperature in the zone of action of the laser beam on the embryo and its calculated values. The existing modeling tools exclude operations for determining the radius of the laser beam source, i.e., the spot, and calculating the speed of movement of the laser source across the surface of the embryo. To obtain information about the temperature regime of the laser action, a thermal imager is used, which significantly reduces the accuracy of intensity correction and other technical parameters of laser emitters. This decreases the accuracy of the calculation and optimization of the main parameters of the biotechnological process and, decreases the quality of management and the justified choice of technical solutions in biotechnological processes.

The authors have developed a technique for managing the quality of technical solutions to ensure the functioning of technical and biotechnological systems under the influence of moving sources of scanned laser radiation. It was determined that the use of the proposed technique to achieve quality indicators of the biotechnological process of laser embryo separation increases the accuracy of controlling the power and time of thermal action by 20%.

Key words: *biotechnological process, modeling tools, management, technical solutions, quality indicators.*

УДК 681.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/17>

Лісовець С.М.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Кисельов В.Б.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Ківа І.Л.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Фуртат О.В.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

ДОСЛІДЖЕННЯ КОНТУРУ КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ ПРИВОДОМ ПРОМИСЛОВОГО РОБОТА ПО ШВИДКОСТІ

Слідкуючі системи, які використовуються в електричних (електромеханічних) приводах промислових роботів, в залежності від призначення таких роботів мають різну конструкцію і постійно вдосконалюються. В загальному випадку вони складаються з двох частин: внутрішнього контуру керування, який відповідає за роботу електричного двигуна, і зовнішнього контуру керування, який відповідає за позиціонування ланок промислового робота (лінійне або кутове). Підтримання одночасно і високої швидкодії, і високої точності роботи електричного приводу при збереженні всіх інших його характеристик, таких як імовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов або параметр потоку відмов, не завжди можливо. В проведеному дослідженні було розглянуто контур керування електричним приводом промислового робота по швидкості, як один з можливих варіантів проектування слідкуючих систем промислових роботів. Особливістю такого дослідження було те, що змінюючи одночасно ступені стійкості і коливальності перехідного процесу в такому контурі, можливо зменшувати час регулювання за рахунок появи незначного переулювання і навпаки. При цьому статична помилка в такому контурі відсутня. Перевагами такого підходу є достатньо прості розрахунки, які вимагають визначення лише двох коефіцієнтів настроювання регулятора: коефіцієнта підсилення і коефіцієнта інтегрування, а також можливість реалізації запропонованого алгоритму керування за допомогою стандартних засобів автоматизації. До недоліків можна віднести деяку обмеженість такого алгоритму керування, яка не дозволяє враховувати, наприклад, обмеження на максимально можливий керувальний вплив або на максимально можливу швидкість протікання перехідного процесу. Симуляція створеної моделі контуру керування електричним приводом промислового робота по швидкості і порівняння її з результатами розрахунків показала їх практичне співпадіння.

Ключові слова: діаграма Вишнеградського, електричний привід, контур керування, передатна функція, перехідний процес, слідкуюча система.

Постановка проблеми. Слідкуючі системи промислових роботів визначають їх найважливіші характеристики, зокрема точність і швидкодію. Для досягнення високих значень наведених характеристик необхідно подолати ряд складнощів. Не зважаючи на різноманіття технічних реалізацій слідкуючих систем, їх структура є достатньо типовою. Вони використовуються переважно в промислових роботах, приводи яких є електричними (електромеханічними) [1, 2, 3].

Один з варіантів структури слідкуючої системи промислового робота, який має електричний привід і шарнірні з'єднання, наведена на рис. 1. Якщо промисловий робот має, наприклад, чотири ступеня свободи, то він може мати чотири такі або аналогічні слідкуючі системи, які будуть відрізнятися лише певними технічними характеристиками (зокрема, типом електричних двигунів), але загальна структура таких систем останеться однаковою.

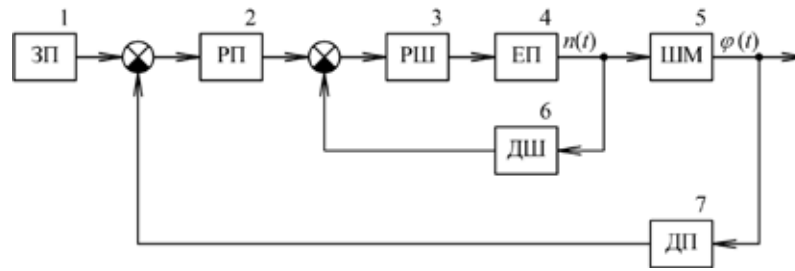


Рис. 1. Структура слідкуючої системи промислового робота

Такі слідкуючі системи керування можуть бути, наприклад, повністю аналоговими. Але часто вимоги сучасного виробництва потребують, щоб в них використовувалися засоби обчислювальної техніки у вигляді мікропроцесорів або мікроконтролерів чи іншого подібного обладнання. Однією з вимог до слідкуючих систем промислових роботів є те, щоб перехідні процеси в усіх контурах керування таких систем були (за деяким виключенням) аперіодичними. Іншими словами, всі ланки повинні переміщуватися плавно, без коливань. Слідкуючі системи промислових роботів звичайно складаються з внутрішнього контуру керування по швидкості і зовнішнього контуру керування по положенню.

Регулятор швидкості (РШ) 3 (складається з формувача керувального впливу і підсилювача керувального впливу), електричний привід (ЕП) 4 (складається з електричного двигуна) і датчик швидкості (ДШ) 6 утворюють внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості. Його завдання – керувати обертами електричного приводу 4 (тобто обертами електричного двигуна). Задатчик положення (ЗП) 1 (визначає, яке лінійне або кутове положення повинна прийняти поточна ланка відносно сусідньої ланки), регулятор положення (РП) 2, внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості, шарнірний механізм (ШМ) 5 (складається з редуктора, кріплень до шарнірного механізму шарніру, ланки і вантажу, маса якого може змінюватися в будь-який момент часу від нуля до значення, визначеного в документації) і датчик положення (ДП) 7 утворюють зовнішній контур керування слідкуючої системи по положенню. Його завдання – керувати положенням шарнірного механізму 5 (тобто положенням поточної ланки відносно сусідньої ланки).

Такі складові слідкуючої системи, як електричний привід 4, шарнірний механізм 5, датчик швидкості 6 і датчик положення 7 звичайно входять до складу промислового робота, і їх зміна (у випадку

потреби) є або неможливою, або занадто дорогою. З іншого боку, технічні характеристики наведених складових є незмінними і чітко визначеними в документації. Згідно з вимогами до сучасних промислових роботів, кількість можливих положень однієї ланки відносно іншої ланки, яку повинен забезпечувати відповідний контур керування, становить приблизно від 10000 до 500000, що вимагає від такого контуру достатньо великої точності. Відповідно, характеристики таких контурів керування, і особливо характеристики датчика положення 7, повинні бути стабільними упродовж всього часу функціонування промислового робота. Крім того, промисловий робот повинен забезпечувати фіксацію захоплюючого пристрою (або іншого робочого органу) упродовж довільно заданого часу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій показує, що вдосконалення контурів керування слідкуючих систем промислових роботів (зокрема, які використовують електричні (електромеханічні) приводи) полягає, переважно, у використанні більш сучасної елементної бази, яка покращує технічні характеристики таких систем (наприклад, підвищення точності позиціонування, зменшення енергоспоживання, збільшення напрацювання на відмову) [1]. При цьому загальна структура таких контурів загалом остається незмінною.

В електричному приводі 4 в якості електричного двигуна звичайно використовуються електричні двигуни постійного струму (як колекторні, так і безколекторні). Наприклад, колекторні двигуни, при керуванні за рахунок зміни напруги на якорі, звичайно описуються передатними функціями другого порядку, до складу яких входять електромеханічні і електромагнітні сталі часу. При цьому вдосконалення конструкції колекторних двигунів звичайно не змінює структури їх передатних функцій, а впливає лише на значення параметрів (коефіцієнтів передатки, сталих часу) таких передатних функцій.

Постановка завдання. Метою проведеного дослідження було створення моделі/моделей

і виконання симуляції типового внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості, що передбачає попередній розрахунок параметрів регулятора швидкості 3. Також метою проведеного дослідження було отримання оптимальних (згідно з кількома різними критеріями) параметрів налагодження такого регулятора. В якості середовища для створення моделей було обрано, враховуючи його широке застосування, пакет Simulink, який є частиною пакета MatLAB відомого розробника MathWorks.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розглянемо внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості. В якості регулятора швидкості 3 найчастіше використовується ПІ-регулятор. В такому регуляторі ПІ-закон керування визначає формувач керувального впливу, а інерційністю підсилювача керувального впливу (якщо використовується, наприклад, ШІМ-перетворення) часто можна нехтувати. Таким чином, передатна функція $W_3(s)$ такого регулятора матиме наступний вигляд:

$$W_3(s) = \frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (1)$$

де $K_{\text{П}}$ – коефіцієнт підсилення;
 $K_{\text{І}}$ – коефіцієнт інтегрування;
 s – оператор Лапласа.

Передатна функція $W_4(s)$ електричного приводу 4 визначається його електромеханічною $T_{\text{ЕМЕХ}}$ і електромагнітною $T_{\text{ЕМАГ}}$ сталими (при цьому одночасно може враховуватися і момент опору, який прикладається до валу електричного двигуна зі сторони редуктора). Так як умова $T_{\text{ЕМЕХ}} > 4T_{\text{ЕМАГ}}$ виконується досить часто, то передатна функція $W_4(s)$ може бути аперіодичною передатною функцією другого порядку і мати наступний вигляд:

$$W_4(s) = \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (2)$$

де $K_{\text{ЕП}}$ – коефіцієнт передачі електричного приводу 4.

Але якщо, зокрема, буде виконуватися умова $T_{\text{ЕМЕХ}} < 4T_{\text{ЕМАГ}}$, то передатна функція $W_4(s)$ буде коливальною передатною функцією.

Датчик швидкості 6 також може бути практично безінерційним. Часто в його якості замість тахометра використовується інкрементальний енкадер, момент інерції якого є набагато меншим за момент інерції якоря електричного двигуна. Крім того, якщо завдання для регулятора швидкості 3, наприклад, формується у вигляді цифрового коду і поточне значення обертів електричного приводу 4 також формується у вигляді цифрового коду, то можна прийняти, що передатна функція $W_6(s)$ датчика швидкості 6 буде мати наступний вигляд:

$$W_6(s) = 1. \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (3)$$

Отже, внутрішній контур керування слідкуючої системи по швидкості (з урахуванням передатних функцій складових такого контуру) буде мати вигляд, наведений на рис. 2.

Тобто датчик швидкості 6, по суті, буде реалізовувати одиничний від’ємний зворотний зв’язок. Таким чином, передатна функція $W_{\text{ВП}}(s)$ внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості буде наступною:

$$\begin{aligned} W_{\text{ВП}}(s) &= \frac{W_3(s)W_4(s)}{1 + W_3(s)W_4(s)W_6(s)} = \frac{\frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s} \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}}{1 + \frac{K_{\text{П}}s + K_{\text{І}}}{s} \frac{K_{\text{ЕП}}}{(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1)}} = \\ &= \frac{(K_{\text{П}}s + K_{\text{І}})K_{\text{ЕП}}}{s(T_{\text{ЕМЕХ}}s + 1)(T_{\text{ЕМАГ}}s + 1) + (K_{\text{П}}s + K_{\text{І}})K_{\text{ЕП}}} = \\ &= \frac{\frac{K_{\text{П}}}{K_{\text{І}}}s + 1}{\frac{T_{\text{ЕМЕХ}}T_{\text{ЕМАГ}}}{K_{\text{І}}K_{\text{ЕП}}}s^2 + \frac{T_{\text{ЕМЕХ}} + T_{\text{ЕМАГ}}}{K_{\text{І}}K_{\text{ЕП}}}s + 1}. \end{aligned} \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (4)$$

Така передатна функція має третій порядок. Тому для дослідження перехідних процесів у такому внутрішньому контурі можна використати діаграми Вишнеградського, які для практичного застосування є достатньо точними [4, 5, 6].

Перехідний процес в такому внутрішньому контурі переважно визначається характеристичним рівнянням

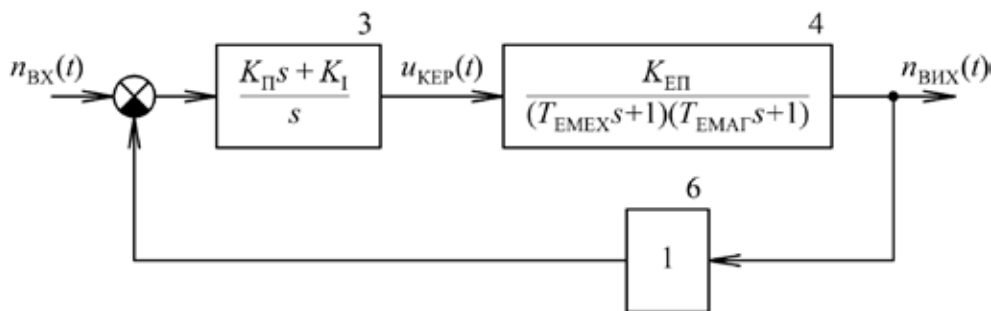


Рис. 2. Структура внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості

$$\frac{T_{EMEX}T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} s^3 + \frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} s^2 + \frac{K_{II} K_{EP} + 1}{K_I K_{EP}} s + 1 = 0, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (5)$$

яке може бути приведене до вигляду

$$D^3 + A_1 D^2 + A_2 D + 1 = 0, \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (6)$$

де D – допоміжна змінна,

$$D = \sqrt[3]{\frac{T_{EMEX} T_{EMAG}}{K_I K_{EP}}}; \quad \backslash * \text{MERGEFORMAT} \quad (7)$$

A_1 – безрозмірний коефіцієнт,

$$A_1 = \frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{\sqrt[3]{K_I K_{EP} T_{EMEX}^2 T_{EMAG}}}; \quad (8)$$

A_2 – безрозмірний коефіцієнт,

$$A_2 = \frac{K_{II} K_{EP} + 1}{\sqrt[3]{K_I^2 K_{EP}^2 T_{EMEX} T_{EMAG}}}. \quad (9)$$

Маючи фіксоване значення K_{EP} і задаючи потрібні значення безрозмірного ступеня стійкості h_0 і ступеня коливальності μ (наприклад, якщо перехідний процес у внутрішньому контурі керування не повністю аперіодичний, а з невеликою коливальністю), можна визначити K_{II} і K_I (див. рис. 3 і рис. 4). Припустимо, що $K_{EP} = 20$ рад/(В · с), $T_{EMEX} = 0,035$ с, $T_{EMAG} = 0,008$ с, $h_0 = 0,5$ і $\mu = 1$. Оберемо на діаграмах Вишнеградського, наприклад, значення $A_1 = 2,5$ і $A_2 = 2,5$.

З одного боку, такі значення A_1 і A_2 знаходяться в області, яка з усіх боків обмежується межею $h_0 = 0,5$ (див. рис. 3). Таким чином, в цій області будь-які перехідні процеси у внутріш-

ньому контурі керування будуть мати значення h_0 , не більше ніж 0,5.

З іншого боку, такі значення A_1 і A_2 знаходяться в області, яка з усіх боків обмежується межею $\mu = 1$ (див. рис. 4). Таким чином, в цій області будь-які перехідні процеси у внутрішньому контурі керування будуть мати значення μ , не більше ніж 1.

Отже, з формули (8) можна отримати, що

$$K_I = \frac{(T_{EMEX} + T_{EMAG})^3}{A_1^3 K_{EP} T_{EMEX}^2 T_{EMAG}} = \frac{(0,035 + 0,008)^3}{2,5^3 \cdot 20 \cdot 0,035^2 \cdot 0,008^2} = 3,2452, \quad (10)$$

а з формули (9) можна отримати, що

$$K_{II} = \frac{A_2 \sqrt[3]{K_I^2 K_{EP}^2 T_{EMEX} T_{EMAG}} - 1}{K_{EP}} = \frac{2,5 \cdot \sqrt[3]{3,2452^2 \cdot 20^2 \cdot 0,035 \cdot 0,008} - 1}{20} = 0,0821. \quad (11)$$

Ступінь стійкості h має наступний вигляд:

$$h = \sqrt[3]{\frac{K_I K_{EP}}{T_{EMEX} T_{EMAG}}} h_0 = \sqrt[3]{\frac{3,2452 \cdot 20}{0,035 \cdot 0,008}} \cdot 0,5 = 30,7143. \quad (12)$$

Виконаємо розрахунок коефіцієнтів передатної функції $W_{ВП}(s)$ (див. формулу (4)):

$$\frac{K_{II}}{K_I} = \frac{0,0821}{3,2452} = 2,529 \cdot 10^{-2}, \quad (13)$$

$$\frac{T_{EMEX} T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} = \frac{0,035 \cdot 0,008}{3,2452 \cdot 20} = 4,3141 \cdot 10^{-6}, \quad (14)$$

$$\frac{T_{EMEX} + T_{EMAG}}{K_I K_{EP}} = \frac{0,035 + 0,008}{3,2452 \cdot 20} = 6,6252 \cdot 10^{-4}, \quad (15)$$

$$\frac{K_{II} K_{EP} + 1}{K_I K_{EP}} = \frac{0,0821 \cdot 20 + 1}{3,2452 \cdot 20} = 4,0698 \cdot 10^{-2}. \quad (16)$$

Отже, передатна функція $W_{ВП}(s)$ буде мати наступний вигляд

$$W_{ВП}(s) = \frac{2,529 \cdot 10^{-2} s + 1}{4,3141 \cdot 10^{-6} s^3 + 6,6252 \cdot 10^{-4} s^2 + 4,0698 \cdot 10^{-2} s + 1}. \quad (17)$$

Зокрема, для такої передатної функції перехідний процес $n_{ВИХ}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слідкуючої системи по швидкості (отриманий в результаті розрахунку) буде мати наступний вигляд (див. рис. 5):

$$n_{ВИХ}(t) = 1 + 1,1071e^{-61,4286t} - 2,1071e^{-46,0714t} \cos(40,6312t) - 0,7155e^{-46,0714t} \sin(40,6312t). \quad (18)$$

Максимальне значення перехідного процесу становитиме 1,0999 і буде досягнуто в момент часу 0,0596 с. Час регулювання (за умови входження в зону $\pm 5\%$ від усталеного значення) становитиме 0,0851 с, час регулювання (за умови входження в зону $\pm 2,5\%$ від усталеного значення) становитиме 0,0973 с.

Модель внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведена на рис. 6.

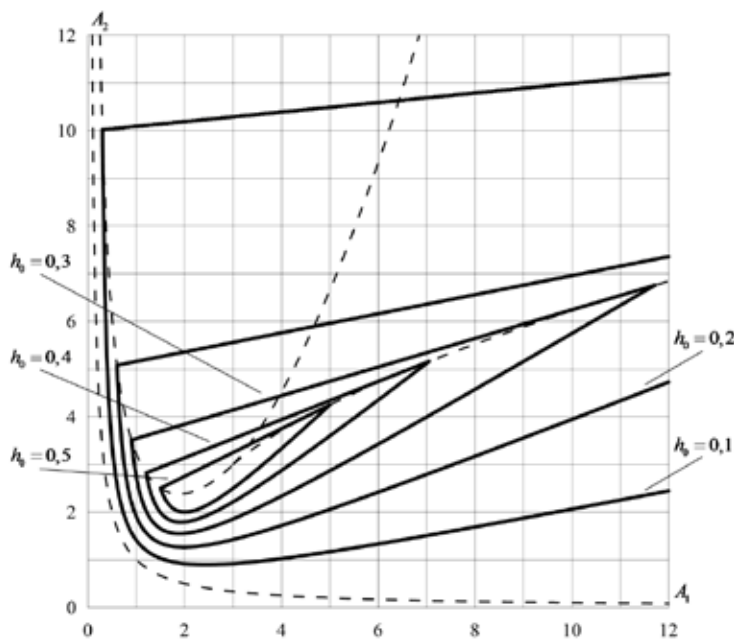


Рис. 3. Діаграма Вишнеградського для h_0

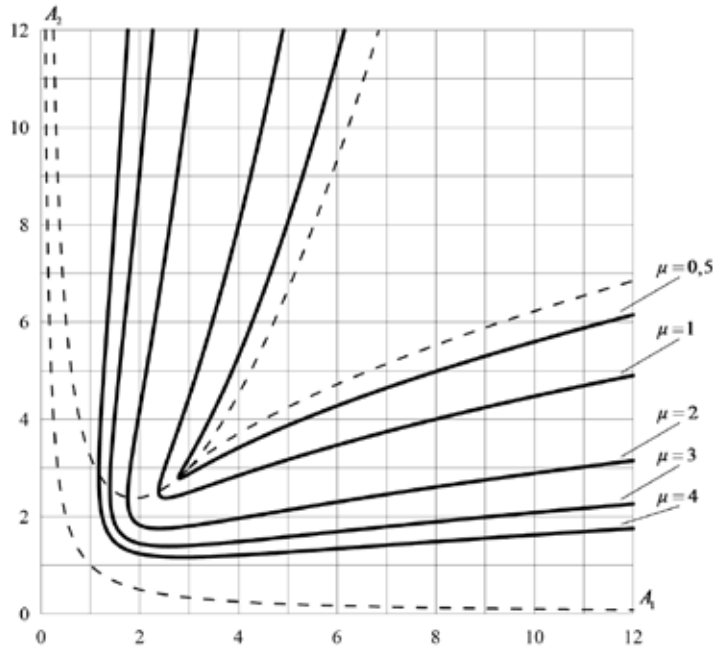


Рис. 4. Діаграми Вишнеградського для μ

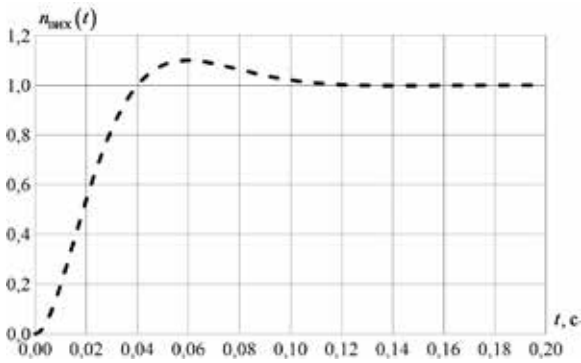


Рис. 5. Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в результаті розрахунку)

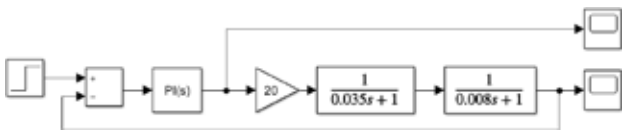


Рис. 6. Модель внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості

Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слідкуючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведено на рис. 7.

Порівнюючи перехідний процес, отриманий в результаті розрахунку (див. рис. 5), з перехідним процесом, отриманим в пакеті Simulink (див. рис. 7), можна побачити, що вони співпадають.

Керувальний вплив $u_{\text{КЕР}}(t)$ (в нормованому вигляді) у внутрішньому контурі керування слід-

куючої системи по швидкості (в пакеті Simulink) наведено на рис. 8.

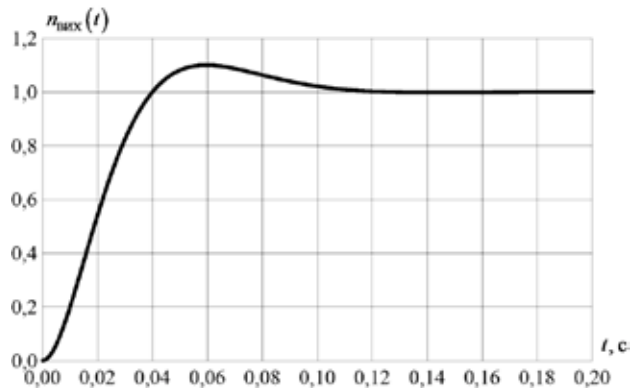


Рис. 7. Перехідний процес $n_{\text{вих}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в пакеті Simulink)

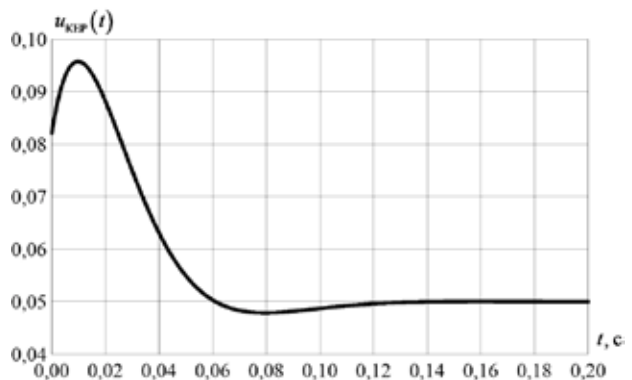


Рис. 8. Керувальний вплив $u_{\text{КЕР}}(t)$ (в нормованому вигляді, отриманий в пакеті Simulink)

Висновки. В статті показано, що розрахунок параметрів регулятора швидкості внутрішнього контуру керування слідкуючої системи по швидкості може бути здійснений з використанням діа-

грам Вишнеградського для безрозмірного ступеня стійкості h_0 і ступеня коливальності μ . Результати розрахунків підтверджуються результатами симуляції в пакеті Simulink.

Список літератури:

1. Пелевін Л.Є. Синтез робототехнічних систем в машинобудуванні: Підручник / Л.Є. Пелевін, К.І. Почка, О.М. Гаркавенко, Д.О. Міщук, І.В. Русан. – К.: ТОВ “НВП “Інтерсервіс””, 2016. – 258 с.
2. Пелевін Л.Є. Гідравліка, гідромашини та гідропневмоавтоматика / Л.Є. Пелевін, Д.О. Міщук, В.П. Рашківський, Є.В. Горбатюк, Г.О. Аржаєв, В.Ф. Красніков. – К.: КНУБА, МОНУ, 2015. – 340 с.
3. Пелевін Л.Є. Мехатронні системи гідропневмоавтоматики / Л.Є. Пелевін, М.М. Балака, Г.О. Аржаєв. – К.: Аграр Медіа Груп, 2014. – 192 с.
4. Гоголюк П.Ф. Теорія автоматичного керування. Навч. посіб. / П.Ф. Гоголюк, Т.М. Гречин. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2009. – 279 с.
5. Ладанюк А.П. Методи сучасної теорії управління: Підручник / А.П. Ладанюк, Н.М. Луцька, В.Д. Кишенько, Л.О. Власенко, В.В. Іващук. – К.: Видавництво Ліра-К, 2018. – 368 с.
6. Мокін Б.І. Математичні методи ідентифікації електромеханічних процесів. Навч. посіб. / Б.І. Мокін, В.Б. Мокін, О.Б. Мокін. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2005. – 300 с.

Lisovets S.M., Kyselov V.B., Kiva I.L., Guida O.G., Furtat O.V. RESEARCH OF CONTROL CIRCUIT OF ELECTRIC DRIVE OF INDUSTRIAL ROBOT BY SPEED

Tracking systems used in electric (electromechanical) drives of industrial robots, depending on the purpose of such robots, have different designs and are constantly being improved. In general, they consist of two parts: an internal control circuit, which is responsible for the operation of the electric motor, and an external control circuit, which is responsible for positioning the links of the industrial robot (linear or angular). It is not always possible to simultaneously maintain high speed and high accuracy of electric drive operation while preserving all its other characteristics, such as the probability of failure-free operation, the intensity of failures or the failure flow parameter. In the conducted study, the control circuit of the electric drive of an industrial robot based on speed was considered as one of the possible options for the design of tracking systems of industrial robots. The peculiarity of this research was that by simultaneously changing the degrees of stability and fluctuation of the transition process in such a circuit, it is possible to reduce the adjustment time due to the appearance of a slight overshoot and vice versa. At the same time, there is no static error in such a circuit. The advantages of this approach are fairly simple calculations that require the determination of only two adjustment coefficients of the regulator: the gain coefficient and the integration coefficient, as well as the possibility of implementing the proposed control algorithm using standard automation tools. The disadvantages include some limitations of such a control algorithm, which does not allow taking into account, for example, restrictions on the maximum possible control influence or on the maximum possible speed of the transition process. The simulation of the created model of the control circuit of the electric drive of the industrial robot in terms of speed and its comparison with the results of the calculations showed their practical coincidence.

Key words: *Vyshnegradsky diagram, electric drive, control circuit, transfer function, transient process, tracking system.*

УДК 004.42

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/18>**Марчук Д.К.**

Державний університет «Житомирська політехніка»

Кравченко С.М.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Левченко А.Ю.

Державний університет «Житомирська політехніка»

Лежньов І.Я.

Державний університет «Житомирська політехніка»

ВИКОРИСТАННЯ ЧАСОВИХ РЯДІВ ПРИ ПРОГНОЗУВАННІ ГРОШОВОЇ ВАРТОСТІ АВТОМОБІЛІВ

У статті розглянуто задачу прогнозування грошової вартості автомобілів за параметрами з використанням часових рядів. В даний час завдання прогнозування є актуальним для різного практичного застосування. Це можуть бути такі сфери діяльності як економіка, фінанси, бізнес, торгівля, політика тощо. Прогнозування часового ряду вирішується на основі створеної моделі, яка описує досліджуваний процес. Об'єктом дослідження є застосування моделей авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA) для прогнозування вартості автомобіля з використанням часових рядів. Моделі ARIMA здатні моделювати широкий спектр сезонних даних. В процесі дослідження створено власний датасет за допомогою онлайн сервісу, який складався із 10 000 записів, дані якого збережені у форматі CSV. В якості інструменту реалізації було обрано мову програмування Python, а саме бібліотеки: *pandas*, *numpy*, *matplotlib*, *seaborn*, *statsmodels*, *itertools* і *keras*. Результати дослідження представлені візуально. Було проведено аналіз за різними параметрами: вартістю автомобіля, роком випуску, видом коробки передач, типом палива. Аналіз проведено різними засобами та методами ARIMA. В результаті аналізу можна зробити висновок, що обрана модель задовольняє умовам прогнозування часових рядів. Аналізуючи графіки можна побачити сезонність та стрімкий ріст вартості автомобілів на майбутні роки, причому щорічно буде певний спад ціни в певному сезоні кварталу. За отриманими результатами сезонності та тенденцій можна зробити висновок, що ціна автомобіля має сезонність зростання ціни, що дає можливість спрогнозувати свої дії та прийняти зважене рішення щодо купівлі або продажу автомобіля.

Ключові слова: автомобіль, прогнозування, часовий ряд, ARIMA, тренд, сезонність.

Постановка проблеми. Щоденно відбувається безліч купівель та продажів. Серед них не є винятком автомобіль як об'єкт продажу та купівлі. При купівлі автомобіля людина звертає увагу на низку факторів, таких як: пробіг, комплектація, тип двигуна, тип палива, об'єм, рік випуску тощо.

Для того щоб купити автомобіль також потрібно розуміти за яку ціну його можна буде купити з плином часу чи продати через певний час. Саме тому потрібно розуміти майбутню ринкову ціну. Для цього можна використовувати інструменти прогнозування.

Актуальність теми полягає в необхідності прийняття відповідного рішення, щодо купівлі чи продажу автомобіля. Знаючи вартість на поточний момент та ймовірну вартість на ринку у май-

бутньому людина може прийняти рішення про продаж автомобіля зараз чи відкласти це питання на потім, коли вартість автомобіля буде вигідна порівняно з поточною чи відкласти продаж.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Метою аналізу даних є виявлення корисної інформації, здійснення висновків і прийняття рішень. Аналіз даних може здійснюватися різними методами математичними, статистичними, інтелектуальними, візуальними.

У статті [1] досліджуються алгоритми інтелектуального аналізу даних, які на основі правил і обчислень дозволяють створити модель, що аналізує дані, здійснюючи пошук певних закономірностей і тенденцій. Шляхом дослідження алгоритмів інтелектуального аналізу даних було

розроблено моделі та методи для встановлення впливу одних хронічних захворювань на інші. Проведені дослідження свідчать про перспективність використання методів інтелектуального аналізу даних для підвищення якості медичної допомоги пацієнтам.

У статті [2] описано новий підхід до використання інтелектуальних технологій для певних бізнес-рішень, а саме для дослідження цінової політики вартості будинків залежно від їх розмірів. У статті розглядається метод математичного програмування, а саме метод градієнтного спуску.

У статті [3] описано дослідження можливостей застосування платформи ML.NET для прогнозування оцінки кредитоспроможності фізичних осіб. Метою роботи є розробка системи, яка на основі проведеного аналізу даних визначатиме кредитоспроможність фізичних осіб.

У роботі [4] авторами продемонстровано програмний продукт для проведення аналізу кадрів відеоданих з метою пошуку вільного місця на парковці.

При прогнозуванні часто застосовують моделі авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA). Наприклад для оцінки цін на зерно автори в статті [5] використовували методи авторегресійної інтегрованої ковзної середньої, а точність прогнозів перевіряли з використанням стандартних стандартів середньої квадратичної помилки і середньої абсолютної помилки у відсотках. Моделі ефективності ARIMA як інструмент прогнозування цін були ефективно продемонстровані реалістичними моделями прогнозованих цін на 2020 рік.

У дослідженнях [6-9] модель авторегресійної інтегрованої ковзної середньої використовувалася для аналізу часової динаміки поширення COVID-19 на основі попередньо зібраних статистичних даних.

На основі даних часових рядів зібраних з 1978 року по 2017, автори статті [10] зробили прогноз на витрати на охорону здоров'я в Китаї з 2018 по 2022 рік, а також показали теоретичні основи для коригування політики охорони здоров'я.

Постановка завдання. Метою роботи є дослідження особливостей інтелектуального аналізу даних та реалізації прогнозування вартості автомобіля. Встановлена мета обумовлює наступні завдання:

- формування датасету;
- вибір моделей для прогнозування;
- реалізація прогнозування вартості автомобіля за різними ознаками;
- аналіз результатів.

Виклад основного матеріалу дослідження. Якісний, кількісний, системний, комбінований це основні підходи для прогнозування. Деякі базуються на математичних моделях, деякі на історичних даних, деякі на досвіді або інтуїції експертів. Але важливо правильно зробити оцінку отриманому прогнозу. Для оцінки якості прогнозу існує багато методів, до яких можна віднести Mean Average Deviation, Running Sum of Forecast Error або Tracking Signal.

Для вирішення поставленого завдання доцільно використовувати часові ряди, тобто це послідовність даних дискретного часу. Зазвичай часові ряди представляються лінійними графіками. Прогнозування за часовими рядами – це використання різних моделей, які можуть зробити прогноз за даними попередніх періодів. Популярними і широко застосовуваними статистичними методами прогнозування часових рядів є моделі ARIMA (англ. Autoregressive integrated moving average). Моделі ARIMA націлені на опис автокореляцій у даних, які розглядаються. Існують сезонні та несезонні моделі.

Використовується стандартне позначення ARIMA(p, d, q), де параметри замінюються цілочисельними значеннями для швидкої вказівки конкретної використовуваної моделі ARIMA.

Параметри моделі ARIMA визначаються наступним чином:

1. p - число спостережень відставання, включених в модель, такзване порядком відставання.
2. d - кількість разів, коли вихідні спостереження розрізняються, також називається ступенем відмінності.
3. q - розмір вікна ковзної середньої, також званий порядком ковзної середньої.

У загальному вигляді модель ARMA (p, q), де

p - порядок авторегресії,
q - порядок змінного середнього, виглядає наступним чином:

$$y'_t = a_1 y_{t-1} + \dots + a_p y_{t-p} + \varepsilon_t + \theta_1 y_{t-1} + \dots + \theta_q y_{t-q}$$

Значення 0 може бути використано для параметра, який вказує, що цей елемент моделі не використовується. Таким чином, модель ARIMA може бути налаштована для виконання функції моделі ARMA і навіть простої моделі AR, I / або MA.

Ухвалення моделі ARIMA для тимчасового ряду передбачає, що базовий процес, який справив спостереження, є процесом ARIMA. Це може здатися очевидним, але допомагає мотивувати необхідність підтвердження припущень моделі в необроблених спостереженнях і в залишкових помилки прогнозів з моделі.

Для проведення аналізу даних було сформовано датасет із використанням онлайн сервісу [11] (Таблиця 1).

Таблиця 1

Параметри датасету

№	Назва	Тип даних	Опис
1	Id	Int (index)	Індекс айди
2	Name	String	Назва авто
3	Fuel_type	String(choocie)	Тип палива
4	Engaine_liter	Float	об'єм двигуна
5	horse_power	Int	Кінські сили
6	Kpp	String(choocie)	Тип коробки передач
7	Body_style	String(choocie)	Тип кузова
8	Drive_wheels	String(choocie)	Тип приводу
9	Color	String(choocie)	Колір
10	Specification	String(choocie)	Комплектація
11	Year_vupusk	Date	Дата випуску
12	Price	float	Ціна
13	probeg	int	Пробіг

Генерування даних було із можливістю збереження у CSV-форматі. Результатом став файл датасету із генерованими даними, де знаходиться 10 000 записів, які у часовому розрізі являють собою останні тридцять років.

Для первинного аналізу дата сету було використано описову статистику(рис. 1).

Описова статистика включає ті функції, що підсумовують центральну тенденцію, дисперсію та форму розподілу набору даних, виключаючи NaN значення.

Для аналізу зв'язку між змінними використана функція кореляції, дані якої представлені на рисунку 2.

Для подальшого аналізу всі дані було відфільтровано та залишено ключові поля для time series – дату та значення. Обрано було параметрами тип палива та комплектація, тому що за аналізом датасету це є важливі характеристики при купівлі продажу автомобіля.

Часові ряди мають очевидну сезонність, а також загальну тенденцію до зростання. Можна візуалізувати дані за допомогою методу, який називається seasonal_decompose – розкладанням часових рядів. Часовий ряд можна розкласти на три різні компоненти: тенденцію, сезонність та шум.

Головне при підборі даних часових рядів в сезонної моделі ARIMA – знайти значення ARIMA (p, d, q) (P, D, Q) s, які оптимізують необхідний показник. Для кожної комбінації параметрів функція SARIMAX () з модуля statsmodels може підібрати нову сезонну модель ARIMA і оцінити її загальну якість. Оптимальним набором параметрів буде той, в якому потрібні критерії найбільш продуктивні. Для початку згенеруємо різні комбінації параметрів:

id	name	fuel_type	engaine_liter	horse_power	kpp	body_style	drive_wheels	color	specification	year_vupusk	price	probeg	
0	100	nissan	gas	4.4	148	automatic	coupe	4wd	none	individual	2019-03-11	109964.40	138861
1	101	saab	gas	2.9	601	headdrive	universal	bwd	white	luxaary	1993-09-17	20966.05	54162
2	102	bmw	gas	3.8	114	automatic	sedan	bwd	light-grey	luxaary	1994-04-08	184429.63	111976
3	103	bmw	gas	1.1	626	automatic	coupe	bwd	yellow	avrage	2017-06-09	286730.29	90717
4	104	mazda	diesel	1.0	512	headdrive	cabriolet	bwd	blue	individual	1999-01-04	157914.11	55381

Рис. 1. Дані датасету

id	name	fuel_type	engaine_liter	horse_power	kpp	body_style	drive_wheels	color	specification	year_vupusk	price	probeg	
0	1.0	5831.5	7510.5	6867.0	914.5	2462.5	3009.5	1568.5	4917.5	5797.5	9740.0	3634.0	9132.0
1	2.0	7427.5	7510.5	3872.0	6891.5	7462.5	9002.5	4889.0	8909.5	7485.0	1180.0	623.0	2931.0
2	3.0	1436.0	7510.5	5656.5	402.5	2462.5	7004.5	4889.0	4003.0	7485.0	1384.5	6192.0	7017.0
3	4.0	1436.0	7510.5	222.5	7224.0	2462.5	3009.5	4889.0	9542.0	834.5	9175.0	9582.0	5465.0
4	5.0	4615.0	2610.5	57.5	5719.5	7462.5	1021.0	4889.0	2166.5	5797.5	2993.0	5247.0	2715.0
...
9995	9996.0	5831.5	7510.5	2440.5	8881.0	2462.5	7004.5	8291.0	7961.0	834.5	9817.0	1296.0	5954.0
9996	9997.0	2824.5	7510.5	834.5	8065.0	7462.5	1021.0	8291.0	6745.0	4111.0	6485.0	7392.0	7908.0
9997	9998.0	6637.0	7510.5	222.5	2697.0	7462.5	1021.0	4889.0	1330.0	834.5	7446.0	4076.0	8906.0
9998	9999.0	2824.5	7510.5	3852.5	3540.5	2462.5	9002.5	4889.0	2166.5	7485.0	3680.5	7882.0	3546.0
9999	10000.0	8197.0	7510.5	2834.5	4726.5	2462.5	4991.0	8291.0	2166.5	834.5	2687.0	8896.0	9571.0

Рис. 2. Результат кореляція

```

1. p = d = q = range(0, 2)
2. pdq = list(itertools.product(p, d, q))
3. seasonal_pdq = [(x[0], x[1], x[2], 12) for x in list(itertools.pr
oduct(p, d, q))]
4.
5. print('Приклади комбінацій параметрів для сезонного ARIMA ...')
6. print('SARIMAX: {} x {}'.format(pdq[1], seasonal_pdq[1]))
7. print('SARIMAX: {} x {}'.format(pdq[1], seasonal_pdq[2]))
8. print('SARIMAX: {} x {}'.format(pdq[2], seasonal_pdq[3]))
9. print('SARIMAX: {} x {}'.format(pdq[2], seasonal_pdq[4]))

```

Тепер можна використовувати певні триплети параметрів для автоматизації процесу оцінки моделей ARIMA по різним комбінаціям. При оцінці і порівнянні статистичних моделей, що відповідають різним параметрам, враховується, наскільки та чи інша модель відповідає даним і наскільки точно вона здатна прогнозувати майбутні точки даних.

Використаємо значення AIC (Akaike Information Criterion), які підходять для роботи з моделями ARIMA на основі statsmodels. AIC оцінює, наскільки добре модель відповідає даним, беручи до уваги загальну складність моделі.

Чим менше функцій використовує модель, щоб досягти відповідності даним, тим вище її показник AIC. Тому потрібно знайти модель з найменшим значенням AIC (рис. 3).

Відповідно до отриманих даних, SARIMAX (1, 1, 1) x (0, 1, 1, 12) отримує найменший показник AIC (7819.115). Отже, ці параметри можна вважати оптимальними. Цю модель можна проаналізувати більш детально. Додаємо оптимальні параметри в модель SARIMAX. Для отримання інформації про модель можна скористатися методом summary. Атрибут summary повертає багато інформації, але треба зосередитися на таблиці коефіцієнтів (рис. 4).

При підборі сезонних моделей ARIMA важливо проводити діагностику моделі, щоб переконатися, що жодне з припущень, зроблених моделлю, не було порушено.

Для початку потрібно порівняти прогнозовані значення з реальними значеннями часового ряду, що допоможе зрозуміти точність прогнозів. Про-

	coef	std err	z	P> z	[0.025	0.975]
ar.L1	-0.0358	0.154	-0.233	0.816	-0.337	0.265
ma.L1	-1.1473	0.020	-58.250	0.000	-1.186	-1.109
ar.S.L12	-0.0396	0.194	-0.204	0.838	-0.420	0.341
ma.S.L12	-0.8107	0.100	-8.072	0.000	-1.007	-0.614
sigma2	1.021e+10	1.14e-12	8.97e+21	0.000	1.02e+10	1.02e+10

Рис. 3. Комбінації параметрів

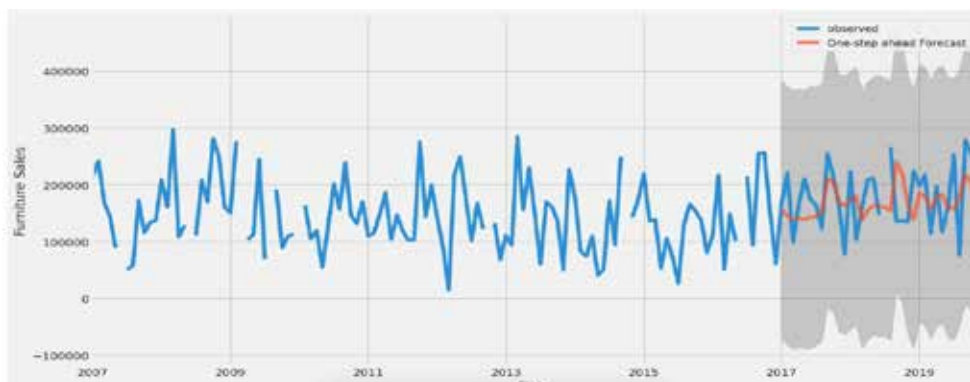


Рис. 4. Результат метода summary

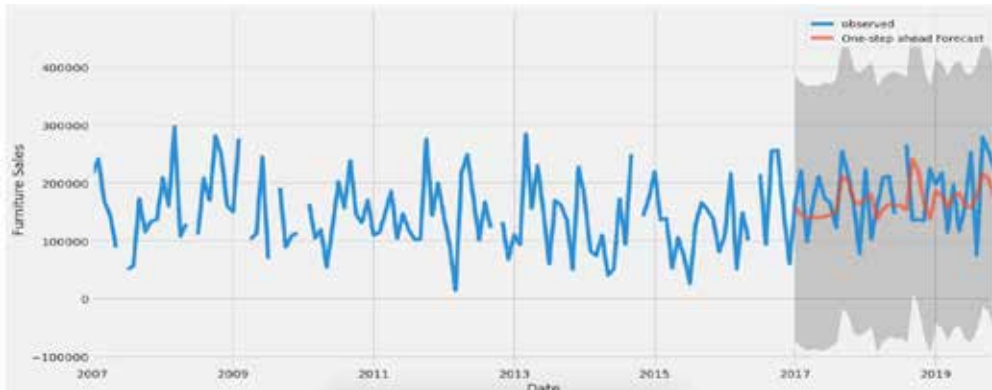


Рис. 5. Графік прогнозування значень з реальними значеннями

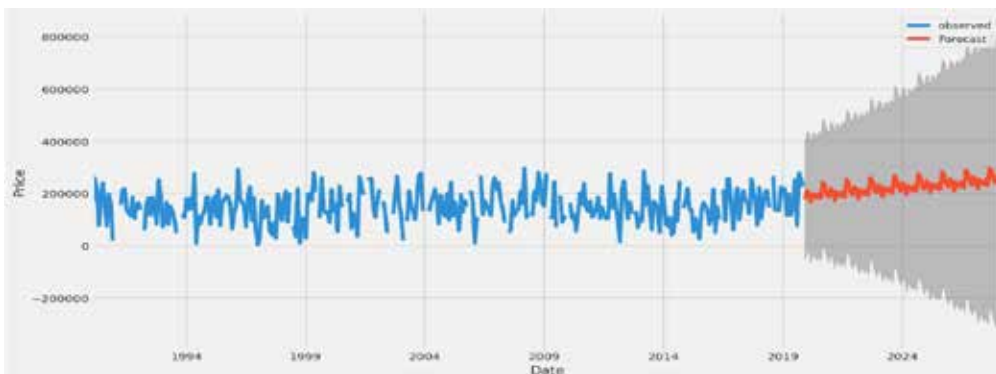


Рис. 6. Графік прогнозування

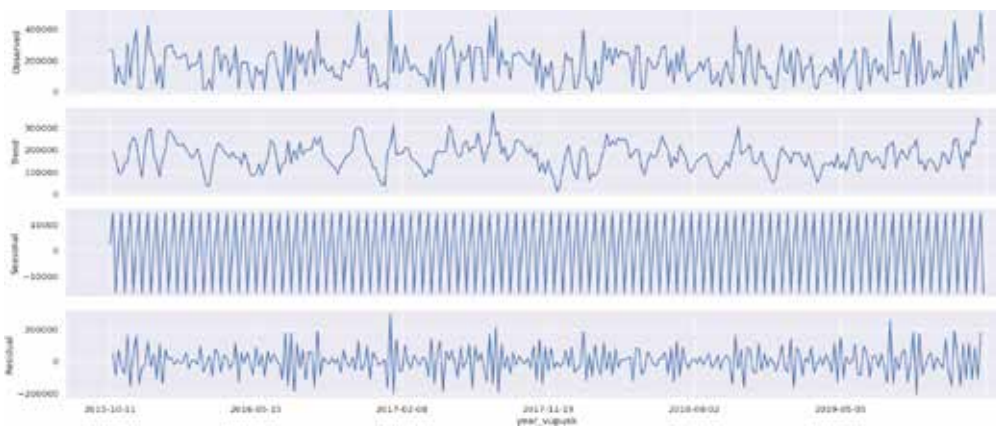


Рис. 7. Графік трендів та сезонності

гнозування почнеться із 2017 року. Буде використано покрокове прогнозування, а це означає, що прогнози в кожній точці генеруються з використанням повної історії аж до цієї точки (рис. 5).

Тепер можна використовувати модель ARIMA для прогнозування майбутніх значень. Отримані дані(рис.6) показують, що тимчасові ряди мають свою характерну тенденцію росту та спаду, що дає розуміння певного шаблону коливання ціни на авто, що вказує на періодичне продовжуване стабільне зростання, що повторюватиметься час від часу.

Результати. Для порівняльного аналізу були взяті дані по автомобілях що мають однаковий тип коробки передач та тип палива. Було отримано їх сезонність та трендовість. Результати порівняння наведено на рисунку 7.

Схожі дані були отримані при прогнозуванні (рис. 8). Графік описує тренд, який зростає, відповідно зростає і ймовірна вартість автомобіля. Для того щоб побачити можливу статистичну залежність можна побудувати парні графіки, що буде попарні залежності ознак набору даних.

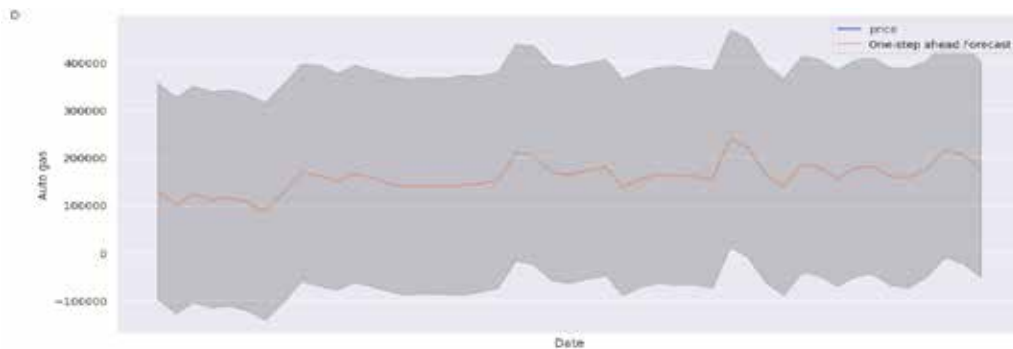


Рис. 8. Графік прогнозування

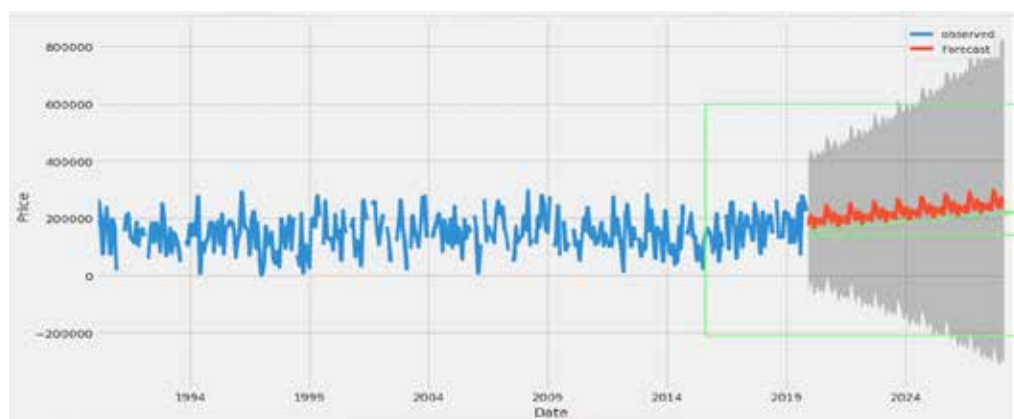


Рис. 9. Графік росту

Аналізуючи графік прогнозування (рис. 9) можна побачити коливання ціни в залежності від сезону та його ріст на майбутні роки, причому щорічно буде певний спад ціни в певному сезоні кварталі.

Проведене дослідження дозволяє зробити висновки про те, що обрана модель добре підходить для аналізу і прогнозування даних часових рядів.

Можна побачити періодичне зростання ціни і ці зростання повторюються з певним часом, що можна побачити на графіках тенденції та сезонності, а також на графіках тимчасових рядків. Можна з певною точністю сказати що взяті параметри є одними із ключових при формування ціни на продаж та купівлю авто.

Висновки. Для аналізу було сформовано джерело даних на 10 000 записів, за допомогою онлайн сервісу. Це дало змогу отримати більш точні результати порівняно з тим, якщо б записів було б значно менше, адже недостатність даних дає не повну картину. Була використана модель прогнозування авторегресійної інтегрованої ковзної середньої (ARIMA). Для вирішення поставленого завдання обрано алгоритм часових рядків. Мовою реалізації поставленого завдання було обрано Python. Отриманні результати дають можливість зробити висновки, що ціна автомобіля має сезонність зростання ціни, що дає можливість спрогнозувати свої дії та прийняти зважене рішення щодо купівлі або продажу авто.

Список літератури:

1. Levkivskiy, V., Lobanchykova, N., Marchuk, D. Research of algorithms of Data Mining. E3S Web of Conferences. Vol. 166. 05007. 2020. The International Conference on Sustainable Futures: Environmental, Technological, Social and Economic Matters (ICSF 2020). URL: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202016605007>.
2. Годлевський, Ю.О., Марчук, Г.В., Панаріна, І.В. 2022. Аналіз, моделювання та прогнозування ціни будинків залежно від їх розмірів. Технічна інженерія. 2(90) (Груд 2022), 79–86. DOI:[https://doi.org/10.26642/ten-2022-2\(90\)-79-86](https://doi.org/10.26642/ten-2022-2(90)-79-86).
3. Антонюк, Д.С., Вакалюк, Т.А., Марчук, Г.В., Дідківський, В.В. Прогнозування оцінки кредитоспроможності фізичних осіб із використанням можливостей ML. NET. Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені Адмірала Макарова: Наукове видання. № 3 (481) 2020. – С. 63-71. DOI: [https://doi.org/10.15589/znp2020.3\(481\).8](https://doi.org/10.15589/znp2020.3(481).8).

4. Алгоритмічно-програмне забезпечення обробки та аналізу потоку кадрів відеоданих, що надходять з камер міста : комп'ютерна програма / В.Л. Левківський, Г.В. Марчук, В.В. Ципоренко, Д.К. Марчук. – 2021 [Electronic resource]. – Access mode : <https://cutt.ly/jMxy1sq>.
5. Surindar Gopalrao Wawale, Malik Jawarneh, P. Naveen Kumar, Thomas Felix, Jyoti Bhola, Roop Raj, Sathyapriya Eswaran, Rajasekhar Boddu, "Minimizing the Error Gap in Smart Framing by Forecasting Production and Demand Using ARIMA Model", Journal of Food Quality, vol. 2022, Article ID 1139440, 9 pages, 2022. <https://doi.org/10.1155/2022/1139440>
6. Chyon F. A., Suman M. N. H., Fahim M. R. I., Ahmmed M. S. , Time series analysis and predicting COVID-19 affected patients by ARIMA model using machine learning, Journal of Virological Methods 301 (2022) 114433. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jviromet.2021.114433>
7. Tandon H, Ranjan P, Chakraborty T, Suhag V. Coronavirus (COVID-19): ARIMA-based Time-series Analysis to Forecast near Future and the Effect of School Reopening in India. Journal of Health Management. 2022;24(3):373-388. doi:10.1177/09720634221109087
8. L. R. de Araújo Morais, G. S. da Silva Gomes, Forecasting daily Covid-19 cases in the world with a hybrid ARIMA and neural network model, Applied Soft Computing 126 (2022) 109315. URL: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109315>
9. Kiarie J., Mwalili S., Mbogo R., Forecasting the spread of the COVID-19 pandemic in Kenya using SEIR and ARIMA models, Infectious Disease Modelling 7 (2022) 179–188. URL: <https://doi.org/10.1016/j.idm.2022.05.001>
10. Zheng A, Fang Q, Zhu Y, Jiang C, Jin F, Wang X. An application of ARIMA model for predicting total health expenditure in China from 1978-2022. J Glob Health. 2020 Jun;10(1):010803. doi: 10.7189/jogh.10.010803. PMID: 32257167; PMCID: PMC7101215.
11. CSV generator, 2023. URL: <https://extendsclass.com/csv-generator.html>

Marchuk D.K., Kravchenko S.M., Levchenko A.Yu., Lezhnyov I.Ya. USING TIME SERIES IN FORECASTING THE CASH VALUE OF CARS

The article considers the problem of forecasting the monetary value of cars by parameters using time series. Currently, the task of forecasting is relevant for various practical applications. These can be such areas of activity as economy, finance, business, trade, politics, etc. Time series forecasting is decided on the basis of the created model that describes the process under study. The object of the study is the application of autoregressive integrated moving average (ARIMA) models for forecasting the value of a car using time series. ARIMA models are capable of simulating a wide range of seasonal data. In the process of research, an own dataset was created with the help of an online service, which consisted of 10,000 records, the data of which was saved in CSV format. The Python programming language was chosen as the implementation tool, namely the following libraries: pandas, numpy, matplotlib, seaborn, statsmodels, itertools and keras. Research results are presented visually. The analysis was carried out according to various parameters: the cost of the car, the year of manufacture, the type of gearbox, and the type of fuel. The analysis was carried out using various ARIMA tools and methods. As a result of the analysis, it can be concluded that the selected model satisfies the conditions of time series forecasting. Analyzing the graphs, you can see the seasonality and rapid growth in the cost of cars for the coming years, and every year there will be a certain decline in the price in a certain season of the quarter. Based on the results of seasonality and trends, it can be concluded that the price of a car has a seasonal increase in price, which makes it possible to predict your actions and make an informed decision about buying or selling a car.

Key words: car, forecasting, time series, ARIMA, trend, seasonality.

Олещенко Л.М.

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

Вернік М.О.

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

ПРИНЦИПИ РОЗРОБЛЕННЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТАЕВРЕСТИЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ

Більшість метаевристичних алгоритмів оптимізації засновані на ройовій поведінці тварин або біологічних взаємодіях живих організмів. Саме це надає метаевристичним алгоритмам простоту програмної реалізації, яка базується на ініціалізації початкової генерації, формування вектора, до якого застосовується цільова функція та створюється критерій зупинки. Перевага використання запропонованого підходу для розроблення рекомендаційних систем полягає в тому, що з часом дослідник розробляє кращі та досконаліші методи оптимізації, при цьому сама база буде оновлюватися шляхом додавання нових алгоритмів і, відповідно, не відбуватиметься процес стагнації системи рекомендацій. У даному дослідженні розглянуто алгоритми, які дозволяють точніше створювати рекомендаційні системи, а отже, й покращувати конверсію користувачів та їхню взаємодію з системою на основі отриманих даних, що дозволяє покращити точність аналізу даних для отримання цільової множини користувачів системи. Запропонований метод створення рекомендаційної системи з використанням методів метаевристичної оптимізації забезпечує більшу точність у порівнянні з класичною реалізацією у середньому на 4-6%. Модульна структура програмного забезпечення, модулі якої реалізують зазначені алгоритми метаевристичної оптимізації, полегшує реалізацію запропонованого програмного методу в цілому. Для апробації розробленої методики була створена клієнтська частина програмного забезпечення у вигляді мобільного додатку. Використано технології програмування для клієнтської частини програмного забезпечення запропонованої системи рекомендацій: Flutter, Firebase API, REST API, React JS. Для розробки серверної частини програмного забезпечення використані технології: .NET Core Web API, AZURE MS SQL, GOOGLE MAPS API, ASP.NET MVC, Python, Tensorflow, MOA, PyTorch, PySwarm. База даних запропонованої системи складається з 45 таблиць і займає ~500 Мб на жорсткому диску серверів US-1 у хмарній системі Azure. Кожен вибір, зроблений користувачем, зберігається в системі, що забезпечує процес навчання для нейронної мережі, тому система може надавати більш точні рекомендації, а також пропонувати людей відповідно з подібним психологічним профілем. Тестування методу проходило на вибірці даних для міста Київ (Україна) в кількості 6000 подій, які були отримані за допомогою сервісів Google Maps API.

Ключові слова: MOA, система рекомендацій, нейронні мережі, матриця факторизації, зворотне поширення, вектор багатозарядного перцептронну, програмне забезпечення.

Постановка проблеми. Метаевристичні методи оптимізації в нейронних мережах дають точніші результати в межах відносної похибки на 10% або на 1–2%, ніж класичні методи. В інтернет-магазинах використовується індивідуальний алгоритм надання рекомендацій для клієнта. У звичайному магазині особисті рекомендації надаються консультантами для зовнішньої оцінки потреб клієнтів, на основі яких вони пропонують рекомендації. Незважаючи на це, більшість людей роблять покупки через взаємодію з людиною та її емоційне забарвлення, а не через саму рекомендацію. Таким чином, актуальною є розробка

програмного забезпечення системи рекомендацій, спрямованої на формування рекомендацій на основі нового методу оптимізації з урахуванням психологічної складової користувача.

Метою дослідження в цій статті є аналіз використання метаевристичних методів оптимізації для побудови системи рекомендацій у сфері відпочинку з побудовою психологічного портрета користувача за допомогою нейронної мережі та матриці факторизації.

Аналіз існуючих програмних рішень. Одним із підходів до проектування рекомендаційних систем (РС), який широко використовується,

є колаборативна фільтрація [1]. Знаходячи користувачів того самого віку або елементи з історією оцінок, подібною до поточного користувача або елемента, генеруються рекомендації з використанням цього сусідства. Методи фільтрації на основі вмісту використовують набір окремих атрибутів і ознак для характеристики елемента в системі. Широко використовуваним алгоритмом є представлення векторного простору, також використовуються методи, що включають аналіз тексту, пошук інформації, мультимодальний аналіз настрою та глибоке навчання.

Системи рекомендацій на основі сеансу використовують взаємодію користувача під час сеансу. Такі системи використовуються на платформах YouTube та Amazon. Вони особливо корисні, коли історія користувача (минулі кліки та покупки) недоступна або не відповідає поточному сеансу користувача. Методи створення рекомендацій на основі сеансів переважно використовують генеративні послідовні моделі. Недоліками таких методів є обчислювальна складність обробки великих даних і низька точність існування розрідженості. Методи рекомендацій, засновані на навчанні з підкріпленням, дозволяють тренувати моделі та оптимізувати на основі показників залученості та зацікавленості користувачів рекомендаційні системи.

Мобільні дані для мобільних систем рекомендацій є більш складними, вони вимагають просторової та часової автокореляції та мають проблеми перевірки. Факторами, які можуть вплинути на мобільні рекомендаційні системи та точність результатів прогнозування, є контекст, метод рекомендації та конфіденційність. Uber і Lyft використовують цей підхід для створення маршрутів руху для водіїв таксі в місті, використовуючи дані GPS про маршрути, якими їдуть водії таксі під час роботи, які включають місцезнаходження (широту і довготу), позначки часу та робочий статус. Ці дані використовуються, щоб рекомендувати список пунктів посадки на маршруті для оптимізації часу завантаження та збільшення прибутку. Багато систем рекомендацій використовують гібридний підхід, використовуючи різні типи фільтрації. Прикладом використання гібридних рекомендаційних систем є Netflix. Деякі методи гібридизації включають:

1. Зважені методи: чисельна комбінація оцінок різних компонентів рекомендацій.
2. Перемикання: вибір компонентів рекомендації та застосування вибраного.
3. Змішані методи: рекомендації з різних настанов представлені разом, щоб дати рекомендацію.

На основі проведених досліджень виділено наступні переваги та недоліки розглянутих методів:

1. Персоналізовану РС складніше реалізувати порівняно з класичною РС, але в той же час персоналізована РС забезпечує більш точні результати, ніж класична РС.

2. Загальна тенденція використання РС – гібридні моделі.

3. Найбільша концентрація розробки на системах з усвідомленням ризиків.

У попередніх дослідженнях розглядалась класична модель побудови психологічного портрета користувача з використанням комбінації багатопланового перцептрона і зворотного поширення [2-6].

Аналіз даних користувачів рекомендаційної системи

Дані користувача та події у даній роботі представлені як окремі вектори даних, де кількість активних користувачів системи становить 110, а кількість подій – 5370. Всього користувачами додано більше 2000 подій. Також понад 10 000 даних про дії користувачів, такі, як час перебування на певній сторінці, запрошені люди, параметри відбору, психологічний портрет. Таким чином, на виході ми маємо понад 12 000 рядків даних про користувачів та їх взаємодію в системі. Цей набір даних можна представити у вигляді 2 наборів даних для навчання та тестування, де 10 000 рядків є навчальними, а 2000 рядків – тестовими. Основою рекомендацій є дані користувача, рекомендаціями можуть бути будь-які характеристики (наприклад, побудована нейронна мережа психологічного портрета користувача для створення рекомендованого списку запрошень користувачеві). Запропонована система рекомендацій використовує модель нейроколаборативного фільтру з модифікацією та оптимізацією процесу навчання нейронної мережі за допомогою 5 метаевристичних алгоритмів оптимізації: Gray Wolf Optimization (GWO), Particle Swarm Optimization (PSO), Whale Optimization Algorithm (WOA), Bee Algorithm (BA), Genetic Algorithm (GA), які взаємодіють з нейронною мережею наступним чином:

1. Нейронна мережа розкладається на одиничний вектор важелів нейронних зв'язків і важелів відхилень.

2. Вектор розкладеної нейронної мережі буде поколінням.

3. Кожен із 5 алгоритмів генеруватиме нове покоління.

4. Серед 5 поколінь вибирається найкраще покоління на основі середньоквадратичної помилки кінцевого результату.

5. Актуалізуються важелі нейронних зв'язків і важелі відхилень.

Система на вході отримує 2 вектори – «Users» та «Events», де вектор користувачів – дані психологічних портретів, а вектор подій – дані параметрів опису подій, відповідно, кожен із яких створює по 2 вектори:

1. MF Users (вектор матриці факторизації користувачів);
2. MF Events (вектор матриці факторизації подій);
3. MLP Users (вектор багатошарового перцептрон користувачів);
4. MLP Events (вектор багатошарового перцептрон подій).

Після обробки та розкладання векторів матрицю факторизації (MF) сформуують вектори «MF Users» та «MF Events», у той же час в багатошаровий перцептрон (MLP) використовуються об'єднані вектори «MLP Users» та «MLP Events». На етапі отримання результатів як з матриці факторизації, так і з MLP, вони об'єднуються у вихідний результат, який буде відправлено в множини методів метаевристичної оптимізації, з яких буде вибрано найкраще покоління для отримання генерації нового покоління (оновлення вагів нейронної мережі), а також знаходження помилки відносно задалегіть відомого результату вибору. Послідовність реалізації загального алгоритму побудови запропонованої РС наступна:

1. Побудова «дерева структури подій».
2. Введення даних користувачів системи.
3. Застосування метаевристичних алгоритмів оптимізації.
4. Персоналізована рекомендаційна система з підбором подій та людей.

На рис. 1 зображено приклад скороченої структури подій в рекреаційній сфері.

Застосування метаевристичних алгоритмів оптимізації

Алгоритм Whale Optimization

Метаевристичний алгоритм оптимізації Whale Optimization Algorithm (WOA) імітує мисливську поведінку горбатих китів та полягає у моделюванні мисливської поведінки з випадковим або кращим пошуковим агентом для переслідування здобичі та використанням спіралі для моделювання пухирчастої сітки. Експлуатаційна модель [5]:

$$D_- = |C_- \cdot X_{p-}(t) - X_-(t)|, \quad (1)$$

$$X_-(t+1) = \bar{X}(t) - \bar{A} \cdot \bar{D}_-, \quad p < 0.5 \quad (2)$$

$$\bar{D}_- * e^{bt} \cos(2\pi t) + \bar{X}(t), \quad p \geq 0.5 \quad (3)$$

Пошукова модель [5]:

$$D_- = |C_- \cdot X_{rand-} - X_-|, \quad (4)$$

$$X_-(t+1) = |C_- \cdot X_{rand-} - A_- \cdot D_-| \quad (5)$$

Алгоритм Genetic Algorithm

Генетичні алгоритми засновані на принципі природного відбору. Генетичні (або еволюційні) методи реалізують процес, пов'язаний з біологічною еволюцією, включають генерацію, рекомбінацію та мутацію хромосом, створення нової популяції з кращими генами та покращеною пристосованістю. Змінні моделі відповідають хромосомам популяції і намагаються через деяку кількість поколінь отримати найкращі хромосоми, що представляють оптимальне рішення проблеми.

Алгоритм Particle Swarm Optimization

Оптимізація зграї частинок базується на поведінці птахів, які збираються навколо джерел їжі. Коли один птах відчуває запах їжі, він голосно цвірінкає, а інші птахи розгойдуються в його напрямку. У контексті оптимізації розташування їжі вказує на вектор моделі для визначення оптимального значення цільової функції [3]:

$$X^i_-(t+1) = X^i_-(t) + V^i_-(t+1), \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \bar{V}^i_k(t+1) = & w * \bar{V}^i_k(t) + c_1 * r_1 * (\bar{p}^i_{k,best} - \bar{p}^i_k(t)) + \\ & + c_2 * r_2 * (\bar{g}^i_{best}(t) - \bar{p}^i_k(t)) \end{aligned} \quad (7)$$

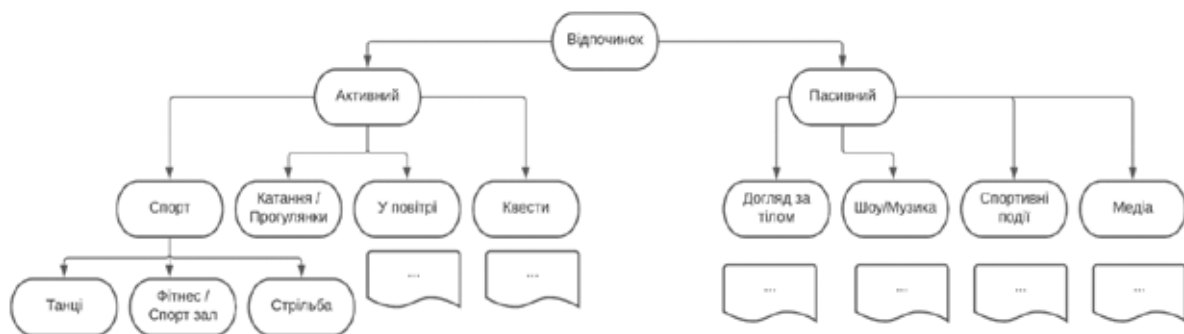


Рис. 1. Фрагмент дерева структури подій

	Fun	0.33	0.12	0.77	0.89					
	Relax	0.1	0.5	0.42	0.17					
					
	Fun	Relax	Intellectual	Sport	...					
	0.33	0.12	0.75	0.1	...	0.44	0.14	0.62	0.88	0.05
	0.6	0.2	0.3	0.5	...	0.33	0.72	0.47	?	0.74
	0.22	0.77	0.02	0.35	...	0.82	0.18	0.55	0.61	0.1
	0.53	0.5	0.13	0.22	...	0.18	0.55	0.1	0.25	0.22

Рис. 2. Матриця факторизацій

У даній роботі розроблено рекомендаційну систему з матрицею факторизацій, де дані користувачів представляють собою психологічний портрет, а дані подій – параметри опису подій після співставлення обох матриць (рис. 2).

Більшість метаевристичних алгоритмів оптимізації засновані на ройовій поведінці тварин або біологічних взаємодіях живих організмів. Саме це надає метаевристичним алгоритмам простоту програмної реалізації, оскільки вони мають однакову реалізацію, яка базується на ініціалізації початкової генерації, яка розкладається на вектор, до якого застосовується цільова функція, створюється критерій зупинки. Перевага використання запропонованого підходу полягає в тому, що з часом дослідник розробляє кращі та досконаліші методи оптимізації, при цьому сама база буде оновлюватися шляхом додавання нових алгоритмів і, відповідно, не відбуватиметься процес стагнації рекомендаційної системи. Результати порівняння використання класичного методу зворотного поширення помилки (MLP + BP) та запропонованого методу з використанням метаевристичної оптимізації (MLP + MOA) наведено в табл. 1. Запропонований метод має перевагу за рахунок того, що метаевристичні алгоритми оптимізації надають нейронній мережі більший пошуковий простір і мають можливість виходити з локальних пасток, на відміну від використання таких класичних методів, як стохастичний градієнт.

Програмна реалізація запропонованої рекомендаційної системи

Для апробації розробленої методики була створена відповідна клієнтська частина програмного забезпечення у вигляді мобільного додатку. Використано наступні технології для створення клієнтської частини програмного забезпечення запропонованої системи рекомендацій:

1. Flutter – для реалізації в Google Play, App Store;
2. Firebase API – для сповіщень системи;
3. REST API – для зв’язку з серверами;
4. React JS – для створення вебдодатку.

Для розробки серверної частини програмного забезпечення використані наступні технології:

1. .NET Core Web API є основним сервером;
2. AZURE MS SQL – для створення бази даних;
3. GOOGLE MAPS API – для відтворення розташування зон відпочинку;
4. ASP.NET MVC – панель адміністратора;
5. Python, Tensorflow, MOA, PyTorch, PySwarm – для створення психологічного портрета користувача системи рекомендацій.

Таблиця 1

Порівняння застосування класичного підходу з використанням зворотного поширення та запропонованого методу з використанням алгоритмів метаевристичної оптимізації

Метод	Точність
Класичний (MLP + BP)	76.68%
Запропонований (MLP + MOA)	81.37%

База даних запропонованої рекомендаційної системи складається з 45 таблиць і займає ~500 Мб на жорсткому диску серверів US-1 у хмарній системі Azure. Після додавання користувача в систему рекомендацій вступає в дію алгоритм формування психологічного портрета користувача та алгоритм рекомендацій, де базовий психологічний портрет користувача будується на основі початкового вибору. Система рекомендацій приймає події, відвідані користувачем, параметри, вибрані користувачем, а також згенерований психологічний портрет як параметри для генерації

рекомендованих подій. Кожен вибір, зроблений користувачем, зберігається в системі, що забезпечує процес навчання для нейронної мережі, тому система може надавати більш точні рекомендації, а також пропонувати людей відповідно з подібним психологічним профілем. Тестування проходило на вибірці даних для міста Київ (Україна) в кількості 6000 подій, які були отримані за допомогою сервісів Google Maps API та додано >30 місць і подій через створене адміністрування даних системи рекомендацій «Планувальник розваг».

Висновки та подальша робота. У даному дослідженні розглянуто алгоритми, які дозволяють точніше створювати рекомендаційні системи,

а отже, й покращувати конверсію користувачів та їхню взаємодію з тією чи іншою системою на основі отриманих даних, що, в свою чергу, дозволяє покращити точність аналізу даних для отримання цільової множини користувачів системи. Запропонований програмний метод створення рекомендаційної системи з використанням методів метаевристичної оптимізації забезпечує більшу точність у порівнянні з класичною реалізацією у середньому на 4–6%. Модульна структура програмного забезпечення, модулі якої реалізують зазначені алгоритми метаевристичної оптимізації, полегшує реалізацію запропонованого програмного методу в цілому.

Список літератури:

1. Vasileios Perifanis, Pavlos S. Efraimidis, Federated Neural Collaborative Filtering, Knowledge-Based Systems, Volume 242, 2022, 108441, ISSN 950-7051, <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2022.108441>.
2. Mirjalili, Seyedali & Mirjalili, Seyed & Lewis, Andrew. (2014). Grey Wolf Optimizer. *Advances in Engineering Software*. 69. 46–61. 10.1016/j.advengsoft.2013.12.007.
3. M. Cells, B. Rylander, Neural network learning using particle swarm optimization, *Advances in Information Science and Soft Computing*, 2002, pp. 224–226.
4. Y. Tian, S. Peng, X. Zhang, T. Rodemann, K. C. Tan and Y. Jin. A Recommender System for Metaheuristic Algorithms for Continuous Optimization Based on Deep Recurrent Neural Networks. *IEEE Transactions on Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 1, pp. 5-18, Aug. 2020, doi: 10.1109/TAI.2020.3022339.
5. Mirjalili, S. and A. Lewis. The Whale Optimization Algorithm. *Advances in Engineering Software*, 95 (2016) 51–67.
6. L.D. Mech. Alpha status, dominance, and division of labor in wolf packs. *Canadian Journal of Zoology*, vol. 77, pp. 1196- 1203, 1999.

Oleshchenko L.M., Vernik M.O. PRINCIPLES OF RECOMMENDER SYSTEMS DEVELOPMENT USING METAHEURISTIC OPTIMIZATION

Most metaheuristic optimization algorithms are based on swarm behavior of animals or biological interactions of living organisms. This is what gives metaheuristic algorithms the simplicity of software implementation, which is based on the initialization of the initial generation, the formation of a vector to which the objective function is applied and the stopping criterion is created. The advantage of using the proposed approach for the recommender systems development is that over time the researcher develops better and more advanced optimization methods, while the base itself will be updated by adding new algorithms and, accordingly, the process of stagnation of the recommendation system will not occur. Algorithms that allow for more accurate creation of recommender systems and, therefore, to improve user conversion and their interaction with a particular system based on the obtained data, are considered in this study, which allows to improve the accuracy of data analysis to obtain the target set of system users. The proposed method of creating a recommender system using metaheuristic optimization methods provides greater accuracy compared to the classical implementation by an average of 4-6%. The modular structure of the software, the modules of which implement the specified metaheuristic optimization algorithms, facilitates the implementation of the proposed software method as a whole. To test the developed methodology, the client part of the software was created in the form of a mobile application. Programming technologies were used for the client part of the software of the proposed recommendation system: Flutter, Firebase API, REST API, React JS. The following technologies were used to develop the server part of the software: .NET Core Web API, AZURE MS SQL, GOOGLE MAPS API, ASP.NET MVC, Python, Tensorflow, MOA, PyTorch, PySwarm. The database of the proposed system consists of 45 tables and occupies ~500 MB on the hard disk of US-1 servers in the Azure cloud system. Each choice made by the user is stored in the system, which provides a learning process for the neural network, so the system can provide more accurate recommendations and also suggest people with a similar psychological profile accordingly. The method was tested on a sample of data for the city of Kyiv (Ukraine) in the amount of 6,000 events, which were obtained using Google Maps API services.

Key words: MOA, recommendation system, neural networks, factorization matrix, backpropagation, multilayer perceptron vector, software.

Falkevych V.G.

Zaporizhzhia National University

Lisniak A.O.

Zaporizhzhia National University

METHODOLOGY OF CACHE INVALIDATION IN MICROSERVICES ARCHITECTURE OF THE WEB APPLICATIONS

In the article are considered existing approaches, methods of using caching in scalable web systems and decisions proposed in related works. Created a methodology of cache invalidation in microservices architecture. The object of researching is a process of creating a methodology of cache invalidation. Methods of researching are based on modeling cache management processes and services cooperation. Defined requirements for cache invalidation systems: splitting of area responsibilities, invalidation only part of caching, prevention of repeating cache invalidation by time, non-blocking operation. Described all steps of the system's components cooperation that includes API gateway, cache service, cache, application services. Described examples of using an application with cache service for keeping cache fresh. In the article are included 1 figure with schematic components of the application architecture, 2 sequence diagrams with steps of system elements cooperation in time. Defined main principles in the microservices architecture with cache system: cache invalidation abstraction from the inside services to the cache service by creation cache schema for every services; describing rules of preparation API responses; requesting to the cache from services only through the cache service; using API gateway as a router between services; changing cache schema should not affect to the work of the cache service. Researched base necessary rules for cache invalidation: cache schema, response schema (or response prepare handler), action. Cache schema describes an object as value from the service depend on type and name of the request; response handler or response schema – are rules or ready for using function (after decoding) for preparing response before client receives response. Action – is a type of command that should be done (створити, оновити, видалити).

Key words: cache, PASS, Redis, Memcached, ElastiCache, Memorystore, API, cache invalidation, microservice.

Problem definition. Nowadays the understanding of using microservices approaches in the development of scalable projects have become a necessity. Code splitting, areas of responsibility, business logic and views is a common using practice for modern developers. Users become more templated, systems are more demanded of resources. Ways of optimization are improved everyday, same as technologies which allow us to achieve these goals [1]. Using caching methodologies and different ways allow to decrease loading for servers, help to make systems more effective and scalable, reduce count of requests to databases and catching deadlocks, time for making selection data for next calculation before response [2]. A key-value storage is one of the best ways to get access to useful data without heavy selection demand of resources. But nothing is taken nowhere and does not lead anywhere. Every improvement resolving some field of problem brings another inconvenience. For instance, managing cache storage, making additional infrastructure which allows it to work with this storage, scaling storage,

mechanisms of synchronization with databases. Another inconvenience we can face with – is getting expired data.

Analysis of recent research and publications. Considering cache systems and approaches can be highlighted the most popular and common using of them: Memcached or Redis. Cache – is a key-value storage which keeps data in memory without saving it like persistent files [3]. It allows you to avoid a process of reading/writing data from files to RAM. So Redis or Memcached allows you to get stored data as fast as RAM memory can do it. Many companies offer ready solutions like cloud caching like PASS (platform as service), for example, Amazon ElastiCache, Google Memorystore etc.

Describe the principle as cache works. When an application tries to get some data from a database, make a request to the cache. If the data by key exists, return it. In another way return data from the database and store in the cache to further requests. Saving data in cache is necessary to set up time for caching. It can be a timestamp with the date when cache by key was

written [4]. Having timestamp different approaches can be implemented for keeping data in the cache fresh. For instance, cache can be invalidated by comparing actual time with timestamp when a request is made by an application. Another way implies using planning tools like CRON for invalidation cache bypassing all keys step by step comparing actual date with timestamp [5].

First way of cache invalidation can seem more preferable than bypassing all values. But it can also have disadvantages. To point them consider using caching in MVC systems (model view controller). Model is responsible for getting data. It can be data from a database or data from API. Writing models developers should make decisions about what data should be stored in cache, what data can be updated [5]. Similar approach can be proposed in modern front-end development using UI building libraries like React, Angular, VueJS on the rope with local cache management using Apollo GraphQL. In both cases developers should make decisions about which data should be updated in cache. It would be good to have an opportunity for flexible tools for caching. But returning to the principle of code and duties splitting, the logic of caching and business logic intertwines in the code [6, p. 136].

The main reason why developers make decisions about the necessity of updating cache is that no one wants to get expired data. Should be another way for working with cache. Microsoft has offered to use NCache instead Redis for caching. This technology allows synchronization with databases [2]. Developers should not describe caching mechanisms in their code that allow them to follow the fifth rule of SOLID principle (Dependency Inversion. Depend upon abstractions, not concretics).

Take a look at NCache in detail. There are some available features using this technology:

1. Pub/Sub Messaging;
2. cache distribution;
3. SQL searching and grouping;
4. database synchronization.

The publishing-subscribing messaging pattern allows senders of messages, called publishers, to be sent directly to specific receivers, called subscribers, but instead categorize published messages into classes without knowledge of which subscribers. The events are published outside the microservice, to the NCache message broker [2]. Each subscriber microservice contains an event handler to handle the appropriate event once the publisher microservice has published it.

NCache being In-memory distributed cache allows microservices to provide scalability and handle a larger number of transactions.

When so much data is being stored in cache by microservices for their app data caching needs, then having the ability to quickly find relevant data through SQL searching or grouping make it very easy to process it [1].

Another feature proposed by Microsoft is database synchronization. When the database receives some changes, the specific field in the cache also updates. To use this opportunity it is necessary to set up a connection with the database first using API and describe procedures of cache and database synchronization, which consist of next steps:

1. creating a dependency with stored procedure;
2. getting an item from the database;
3. generation a unique id for the item;
4. creating a new cache item and adding dependency to it.

Using database synchronization mechanism it is possible to describe all entities that should be updated in cache when database updates. It avoids using expired cache and supports splitting responsibilities comparing the way developers should make decisions when cache should be updated [7, p. 14]. The main disadvantage in using this approach is binding to certain databases and stack of technologies. If a developer changes NCache to Redis or Memcached he loses an opportunity to use database synchronization. It is necessary to have a unified mechanism of keeping cache fresh [8, p. 43].

The main purpose of this article is considering existing approaches, methods of using caching in scalable web systems and decisions proposing in related works. Will be found and offered a methodology of cache invalidation in microservices architecture. The object of researching is a process of creating a methodology of cache invalidation. Methods of researching are based on modeling cache management processes and services cooperation.

Main research material. Moving ahead in considering systems and technologies for caching becomes obvious that cache should be invalidated to prevent working with expired data. Developers should follow the fifth principle of SOLID (dependency inversion) and split areas of responsibilities [9, p. 230].

One of the ways to do that is creating an independent mechanism for cache invalidation using cache service and providing cache schema from the services.

Define requirements for cache invalidation methodology:

- splitting of area responsibilities;
- invalidation only part of caching;
- prevention repeating cache invalidation by time;
- non-blocking operation.

According to the inverse dependency principle, cache invalidation implementation should not depend on microservices logic like microservices logic and vice versa [10, p. 179].

Invalidation mechanism should not affect cache that should not be updated. Simultaneously all levels of caching should be invalidated by time. If the part of cache is invalidated by event, the timestamp when cache was rewritten should be updated also. An operation for cache updating is sent after service has been worked and should obey similar rules. If a request to the service and next response initiates the cache updating, finite users should not await when cache updates. Another similar operation that can be sent by service at the same time when cache updating should not rewrite or interrupt to work for the system [11, p. 1156].

To achieve these requirements, take a look at figure 1. The diagram is described here, has next components:

- API gateway;
- cache service;
- cache;
- application services.

API gateway receives all requests from the client and redirects them to services. Services should have schemas that describe a memoization value in the cache. That schemas can be changed and cache invalidation continues working correctly. All services get cache using API gateway through cache service for connection to the cache system. Using cache schema cache service can update, add or delete memoized values. At the same time when the first service responds, the data is sent from the service can be used in another service without waiting for cache service updates.

Cache service – is an essence that has responsibilities:

- updating cache using service`s cache schema with data;
- getting data from cache for service.

A process of updating cache should be in parallel with working application services. That means no one services and API gateway should not wait when cache will be updated [12, p. 157].

Consider in detail how the cache invalidation system works (figure 1). For instance, there is a request that creates a new book in the database. After this action happens we would like to add this book to the cache without rewriting all books. Making a POST request /books/create by client through API gateway the request is redirected to the service responsible for this route and method [13, p. 54].

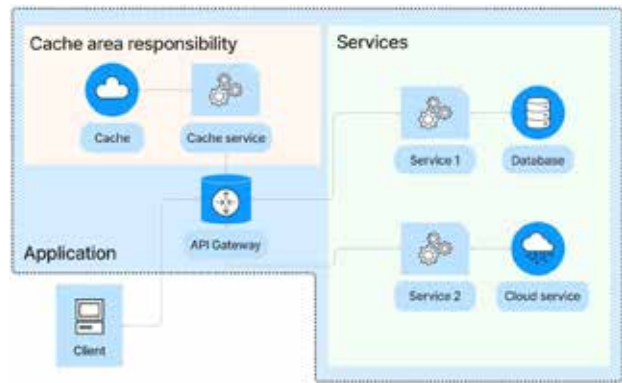


Fig. 1. application architecture with a cache system

Next step – is processing input data by Book service and creating a new book in the database. After that the service responds to the API gateway and provides a cache schema with data about the created book. The gateway makes routing to the service responsible for cache invalidation and provides new data and the schema. Cache service reads the schema and connects with cache and calculates updates depending on input data [14, p. 28; 15, p. 519].

The schema for caching should include comprehensive information about type of request (create, update, delete), structure for caching and also can be provided rules for data normalization before response is returned to the client. That means the API should not include overhead information in the response about the action that happened. But at the same time the cache service needs data to work with, however this data is not to be used in the response. Describing rules for preparation response we can move the logic of preparation of the data for response on another level of abstraction. For example, it is possible to create a service, responsible only for data preparation before response received by client [16, p. 89; 17, p. 52].

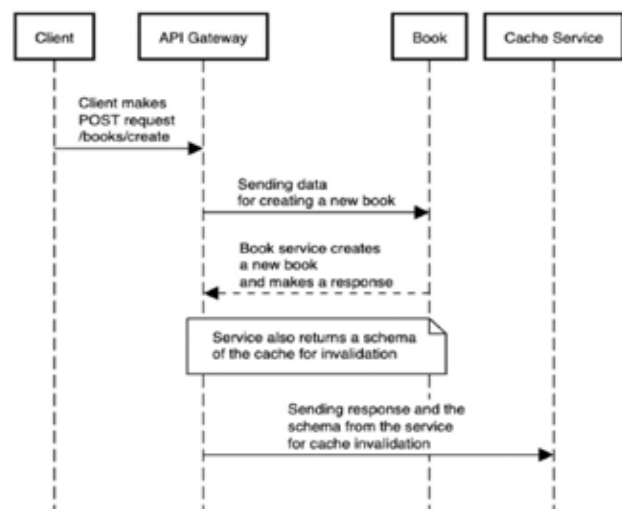


Fig. 2. A process of cache updating using cache service

That service receives data, rules for data preparation, makes preparation and responses to the client through API gateway [18, p. 360].

Cache updating process can take time and there is not any guarantee that this process is finished before the next request is called. Considering this aspect of asynchronous mechanism cache invalidation and working services during one request, it is necessary to create a queue in the cache service and keep processes here. Only after the first process finishes, the next can be started [19, p. 375].

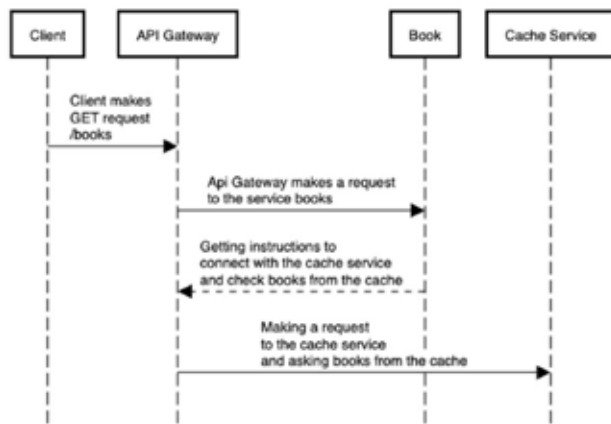


Fig. 3. A process of getting a list of books from the cache

Take a look at the next example: we make a GET request/books for getting a list of books (figure 3). First step – is making a request from client to the API gateway and it makes route to the Book service. This service makes a request to the cache service for checking books in the cache through API gateway. If books are found in the cache, the Book service creates a response. Otherwise this service makes a request from the database and gets books from it. Responding without schema of cache invalidation API gateway understands that response is finite and it is not necessary to call cache service [20, p. 87].

Considering peculiarities of working services with cache must be mentioned working services with

each other how data can be delivered from service to service. For example, an author has private books and additional fields that can not be delivered to the not authorized user and the author wants to add new characteristic values to one of his books. In the case when we should be routed to the Auth service (a service responsible for authorization), get user's data (if credentials succeed) and get books as authorized author from another service, the Auth service calls the Book service through API gateway. Then the last service creates a new characteristic to the one of the author's book, prepares rules for normalizing the response to the client, sending schema for the cache invalidation [21, p. 169].

Conclusions. Considered existing approaches, methods of using caching in scalable web systems and decisions are proposed in related works. Created a methodology of cache invalidation in microservices architecture. Have formulated the requirements for cache invalidation methodology consists of:

- splitting of area responsibilities;
- invalidation only part of caching;
- prevention repeating cache invalidation by time;
- non-blocking operation.

Have proposed a full flow of cache invalidation. Considered components of the application architecture with the cache invalidation mechanism:

- API gateway;
- cache service;
- cache;
- application services.

Described examples of using an application with cache service for keeping cache fresh. In summary, are defined main principles in the microservices architecture with cache system: abstraction from the services to the cache service by creation cache schema for every services; defined rules of preparation API response after a service responses; requesting to the cache from services only through the cache service; using API gateway as a router between services; changing cache schema should not affect to the work of the cache service.

Bibliography:

1. Scale Microservices Performance with Distributed Caching. URL: <https://www.alachisoft.com/blogs/scale-microservices-performance-with-distributed-caching>.
2. Cache Data Dependency on Database. URL: <https://www.alachisoft.com/resources/docs/ncache/prog-guide/notification-based-dependencies.html>.
3. Кеширование данных между микросервисами в бессерверной архитектуре. URL: <https://habr.com/ru/post/651829>.
4. Кеширование в облачном приложении. URL: <https://learn.microsoft.com/ru-ru/dotnet/architecture/cloud-native/azure-caching>.
5. Кеширование в Laravel: основы плюс tips&tricks. URL: <https://habr.com/ru/post/463495>.
6. Charan, P.S.B., Varshitha, G., Lashya, A., Varma, U.S.R. and Madhusudhan, D., REDIS: IN MEMORY DATA STORE. 2022. № 5. P. 132–138.

7. Gupta, P., Zeldovich, N. and Madden, S., 2011. A trigger-based middleware cache for ORMs. In *Middleware 2011: ACM/IFIP/USENIX 12th International Middleware Conference*, Lisbon, Portugal, December 12-16, 2011. *Proceedings 12* (pp. 329-349). Springer Berlin Heidelberg.
8. Ghandeharizadeh, S. and Shayandeh, S., 2007, April. Greedy cache management techniques for mobile devices. In *2007 IEEE 23rd International Conference on Data Engineering Workshop* (pp. 39-48). IEEE.
9. Katsaros, D. and Manolopoulos, Y., 2003. Cache management for Web-powered databases. In *Web-Powered Databases* (pp. 203-244). IGI Global.
10. Liu, Q. and Yuan, H., 2019. A High Performance Memory Key-Value Database Based on Redis. *J. Comput.*, 14(3), pp.170-183.
11. Carra, D. and Michiardi, P., 2014, June. Memory partitioning in memcached: An experimental performance analysis. In *2014 IEEE International Conference on Communications (ICC)* (pp. 1154-1159). IEEE.
12. Gan, Y. and Delimitrou, C., 2018. The architectural implications of cloud microservices. *IEEE Computer Architecture Letters*, 17(2), pp.155-158.
13. Pavlenko, A., Askarbekuly, N., Megha, S. and Mazzara, M., 2020. Micro-frontends: application of microservices to web front-ends. *J. Internet Serv. Inf. Secur.*, 10(2), pp.49-66.
14. Brown, K. and Woolf, B., 2016, October. Implementation patterns for microservices architectures. In *Proceedings of the 23rd Conference on Pattern Languages of Programs* (pp. 1-35).
15. Sriraman, A., Dhanotia, A. and Wensch, T.F., 2019, June. Softsku: Optimizing server architectures for microservice diversity@ scale. In *Proceedings of the 46th International Symposium on Computer Architecture* (pp. 513-526).
16. Familiar, B., 2015. *Microservices, IoT, and Azure* (pp. 69-93). Berkeley, CA: Apress.
17. Bucchiarone, A., Dragoni, N., Dustdar, S., Larsen, S.T. and Mazzara, M., 2018. From monolithic to microservices: An experience report from the banking domain. *Ieee Software*, 35(3), pp.50-55.
18. Guo, D., Wang, W., Zeng, G. and Wei, Z., 2016, March. Microservices architecture based cloudware deployment platform for service computing. In *2016 IEEE Symposium on Service-Oriented System Engineering (SOSE)* (pp. 358-363).
19. Munonye, K. and Martinek, P., 2020, June. Evaluation of Data Storage Patterns in Microservices Architecture. In *2020 IEEE 15th International Conference of System of Systems Engineering (SoSE)* (pp. 373-380). IEEE.
20. Parekh, J., Moroney, A., Golani, L. and Shankarmani, R., A Timestamp based Novel Caching Mechanism for Distributed Web Systems. *International Journal of Computer Applications*, 975, p.87-88.
21. Fajardo, M.E., 2020, November. Building Microservices for Scalability and Availability: Step by Step, from Beginning to End. In *New Perspectives in Software Engineering: Proceedings of the 9th International Conference on Software Process Improvement (CIMPS 2020)* (Vol. 1297, p. 169). Springer Nature.

Фалькевич В.Г., Лісняк А.О. МЕТОДОЛОГІЯ ІНВАЛІДАЦІЇ КЕШУ У МІКРОСЕРВІСНІЙ АРХІТЕКТУРІ ВЕБ ДОДАТКІВ

У статті розглянуто наявні підходи, методи використання кешування в масштабованих веб-системах та рішення, запропоновані в сучасних роботах. Створено методологію інвалідації кешу в мікросервісній архітектурі. Об'єктом дослідження є процес створення методології оновлення кешу. Методи дослідження базуються на моделюванні процесів управління кеш-пам'яттю та взаємодії сервісів. Визначено вимоги до систем інвалідації кешу: розподіл зобов'язаностей, інвалідація лише частини кешу, запобігання повторному оновленню кешу за часом, неблокуюча операція. Описано всі етапи взаємодії компонентів системи, що включають API шлюз, кеш-сервіс, кеш-пам'ять, сервіси додатку. Розглянуто приклади використання додатку та кеш-сервісу для підтримки актуальності кеш-системи. У статтю включено один рисунок зі схематичними компонентами архітектури додатку, дві діаграми послідовності з етапами взаємодії елементів системи у часі під час виконання та обробки запиту. Визначено основні принципи в архітектурі мікросервісів із кеш-системою: абстрагування інвалідації кешу від внутрішніх сервісів до кеш-сервісу шляхом створення схеми кешу для кожного сервісу; опис правил підготовки відповідей API; запит до кешу від служб лише через кеш-сервіс; використання API-шлюзу як маршрутизатора між сервісами; зміна схеми кешу не повинна впливати на роботу сервісу кешу. Досліджено базові необхідні правила для інвалідації кешу: схема кешу, схема відповіді (або обробник даних для підготовки відповіді), дія. Схема кешу описує об'єкт даних з поточного сервісу з наявного запиту, що зберігатиметься у кеш-системі; обробник відповіді або схема відповіді – це правила або готова до використання функція (після декодування) для підготовки відповіді до відправлення клієнту. Дія як тип команди, яку необхідно виконати при оновленні кешу сервісом після отримання відповіді (створити, оновити, видалити).

Ключові слова: кеш, PASS, Redis, Memcached, ElastiCache, Memorystore, API, інвалідація кешу, мікросервіс.

Хазанович Ю.Ю.

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

Киричук Ю.В.

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

Черепанська І.Ю.

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

МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ПОЛОЖЕННЯ КІНЦІВОК КРОКУЮЧОГО МОБІЛЬНОГО РОБОТУ У ПРОСТОРИ

У статті проаналізовано традиційні методи побудови математичних моделей динаміки і кінематики мобільних роботів (МР) та визначено їх основні недоліки, що полягають у складності та трудомісткості математичних операцій. В якості альтернативи запропоновано ще один математичний метод побудови моделі динаміки та кінематики шестиногого крокуючого МР, зокрема для визначення положення кінцівок крокуючого МР, що ґрунтується на методах проективної геометрії, зокрема методі трикутників.

На відмінну від традиційних методів, перевагами запропонованого у статті методу для визначення положення кінцівок крокуючого МР є простота застосовуваного математичного апарату, його менша кількість обчислень та легка автоматизація. Це було досягнуто за рахунок застосування інтуїтивно зрозумілих методів проективної геометрії, які покладені в основу запропонованого методу.

На прикладі представленої у статті абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР з однаковою конструкцією тришарнірних кінцівок та тубом у формі правильного шестикутника показано, що застосування запропонованого методу дозволило спростити процес побудови математичної моделі для визначення положення його кінцівок зменшити трудомісткість та підвищити продуктивність виконуваних робіт. Зокрема за допомогою знаходження положення кінцівки крокуючого МР відносно геометричного центру мас його тіла, шляхом поетапної побудови множини трикутників за проєкціями всіх зчленувань кінцівки на площини, що утворені відповідними осями локальної системи координат та обчислення величин сторін трикутників, що відповідають напрямку та величині переміщення даної кінцівки МР.

Практична реалізація запропонованого методу здійснюється у спеціалізованому програмному забезпеченні, робота якого у даній статті не розглядається.

Ключові слова: крокуючий мобільний робот, математична модель, система координат, автоматизація, метод трикутників.

Постановка проблеми. При синтезі мобільних роботів (МР), тобто роботів, які спроможні переміщатися у тримірному просторі у довільних напрямках та по різних поверхнях, необхідно розв'язувати низку різнопланових за свою сутністю та методами задач. Однією із таких задач є задачі, що пов'язані із побудовою математичних моделей їх динаміки та кінематики, зокрема визначення положення кінцівок МР. Зважаючи на те, що МР, є порівняно новою модифікацією роботів, та займають своє окреме місце у світовому парку роботів, а теоретичні та експериментальні дослідження пов'язані з їх

створенням почалися відносно недавно, можна стверджувати, що, на сьогоднішній день відсутні у достатній кількості приклади вітчизняних розробок у даній галузі. Окрім того, у вітчизняній та зарубіжній літературі відсутні у достатній кількості публікації, що містять приклади та рекомендації щодо побудови математичних моделей динаміки та кінематики конкретних моделей МР. Причому у публікаціях, що присвячені проблемі визначення положення кінцівок МР мають місце, фрагментарність і декларативність описів математичних апаратів, а також вони, у своїй переважній більшості, ґрунтуються на класич-

них підходах, зокрема Денавіта-Хартенберга, матричному методі та направляючих косинусах, які як відомо відрізняються значною трудомісткістю математичних операцій та громіздкістю отримуваних математичних моделей.

Це стимулює розробку нових та вдосконалення відомих математичних моделей динаміки та кінематики МР, зокрема при визначенні положення їх кінцівок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз відомих досліджень та публікацій, показав, що сучасний парк МР є досить різноманітним. Аналізуючи принципи їх побудови та роботи, стає очевидним, що всі вони мають різну будову, функціональні можливості, швидкодню, точність орієнтування і позиціонування та ґрунтуються на застосуванні складних математичних моделей. При цьому тільки окремі вітчизняні науковці займаються питаннями побудови МР і відображають результати своїх досліджень у літературі. Зокрема у статті [1] описане створення МР для обрізки дерев та опис принципово нової конструкції мобільного робота довільної орієнтації на стовбурах дерев із метою обслуговування об'єктів плодоовочевих господарств та лісних деревних та паркових масивів.

Переважна більшість наукових результатів, щодо побудови математичних моделей, динаміки та кінематики таких роботів відображена у роботах переважно зарубіжних авторів. [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10] і ґрунтуються на традиційних підходах. Так у статтях [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] автори для опису динаміки механічних кінцівок різних крокуючих роботів (восьминогих у статті [2], різних за формою платформи шестиногих у статтях [3, 4, 5, 6, 7] та зварювального робота-маніпулятора [8]) використовують модель Денавіта-Хартенберга, що дозволяє записати кінематику кінцівки набором матриць перетворень направляючих косинусів у тримірному просторі, для вираження відносного положення системи координат кожної ланки.

Схематичне представлення одного із варіантів зовнішнього вигляду кінцівки крокуючого робота [2] приведено на рис. 1, на рис. 2 проілюстровано модель Денавіта-Хартенберга у системі координат МР за рис. 1.

Зокрема у статті [2] подано загальну математичну модель кінематичної схеми кожної ланки наступним чином:

$$R_{01} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 & 0 & \sin\theta_1 & l_1 \cos\theta_1 \\ \sin\theta_1 & 0 & -\cos\theta_1 & l_1 \sin\theta_1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (1)$$



Рис. 1. Приклад схематичного зображення зовнішнього вигляду кінцівки крокуючого МР [2]

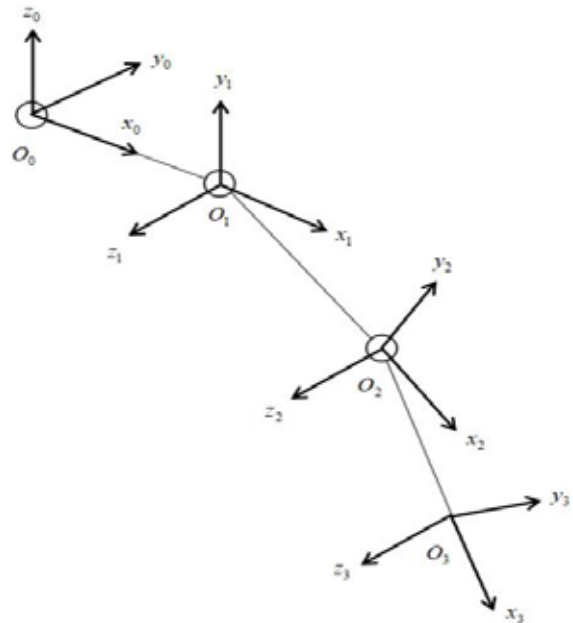


Рис. 2. Приклад графічного подання моделі Денавіта-Хартенберга у системі координат МР [2]

$$R_{12} = \begin{bmatrix} \cos\theta_2 & -\sin\theta_2 & 0 & l_2 \cos\theta_2 \\ \sin\theta_2 & \cos\theta_2 & 0 & l_2 \sin\theta_2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$R_{23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 & l_3 \cos\theta_3 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 & l_3 \sin\theta_3 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де $\theta_1, \theta_2, \theta_3$ – кути поворотів локальних систем координат прив'язаних до відповідних зчленувань кінцівки крокуючого МР за рис. 1, та рис. 2;

l_1, l_2, l_3 – довжини відповідних зчленувань кінцівки крокуючого МР за рис. 1, та рис. 2.

За початкову точку відліку, при побудові математичної моделі, у статтях [2, 3, 4, 5, 6, 7, 8] прийнято початок координат, що позначений точкою O_0 , яка розміщена на першому зчленуванні кінцівки крокуючого МР (рис. 2), і до якої прив'язана локальна система координат x_0, y_0, z_0 . До другого зчленування (стегна (рис. 2)) кінцівки крокуючого МР прив'язана локальна система координат x_1, y_1, z_1 з початком відліку в точці O_1 . До наступних зчленувань (гомілки та лапки (рис. 1)) прив'язані локальні системи координат x_2, y_2, z_2 та x_3, y_3, z_3 з початками відліку в точках O_2 та O_3 відповідно. При переміщенні кінцівки крокуючого МР фактично здійснюється переміщення локальних систем координат $x_0, y_0, z_0, x_1, y_1, z_1, x_2, y_2, z_2$ та x_3, y_3, z_3 відповідних зчленувань відносно абсолютної правої декартової системи координат X, Y, Z . При чому вісь X вказує на напрямок висування стрижня кінцівки, а вісь Z – на напрямок обертання суглоба.

У загальному випадку математична модель кінематичної схеми кінцівки крокуючого МР за рис. 2 має наступний вигляд:

$$R_{03} = R_{01} \cdot R_{12} \cdot R_{23} = \begin{bmatrix} \cos\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & \sin\theta_1 \\ \sin\theta_1 \cos(\theta_2 + \theta_3) & -\sin\theta_1 \sin(\theta_2 + \theta_3) & -\cos\theta_1 \\ \sin(\theta_2 + \theta_3) & \cos(\theta_2 + \theta_3) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{bmatrix} (l_1 + l_2 \cos\theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \cos\theta_1 \\ (l_1 + l_2 \cos\theta_2 + l_3 \cos(\theta_2 + \theta_3)) \sin\theta_1 \\ l_2 \sin\theta_2 + l_3 \sin(\theta_2 + \theta_3) \end{bmatrix}$$

Очевидно, що при використанні математичної моделі (4) для опису переміщення однієї кінцівки крокуючого МР необхідно виконати значну кількість арифметичних та тригонометричних математичних операцій. При чому, при описі переміщень усіх кінцівок крокуючого МР кількість математичних операцій збільшується пропорційно кількості кінцівок крокуючого МР. Це безперечно призведе до значного ускладнення математичної моделі, збільшення часу обчислень та підвищення трудомісткості розрахунків. Таким чином, можна стверджувати, що застосування моделі Денавіта-Хартенберга, матриць поворотів та направляючих косинусів є багатоетапним, рутинним і досить трудомістким процесом, що вимагає значних витрат часу.

Крім моделі Денавіта-Хартенберга в літературі [9, 10] представлено модель, що описує рухи закріпленої чотиринової крокуючої платформи (рис. 3).

Зокрема у статтях [9, 10] описано матричний метод, який дозволяє, знаючи вектори OA_i , що є точками контакту кінцівки роботу із поверхнею (рис. 4), визначити її напрямки руху.

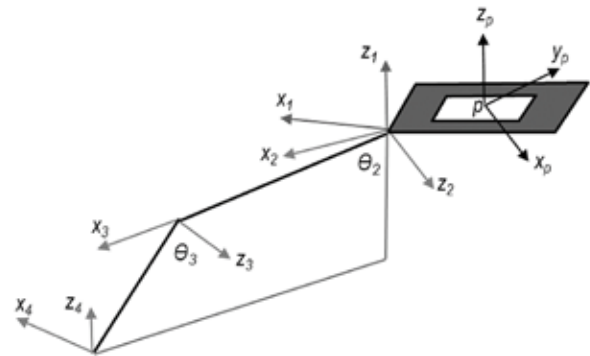


Рис. 3. Приклад схематичного зображення кінцівки платформи [9]

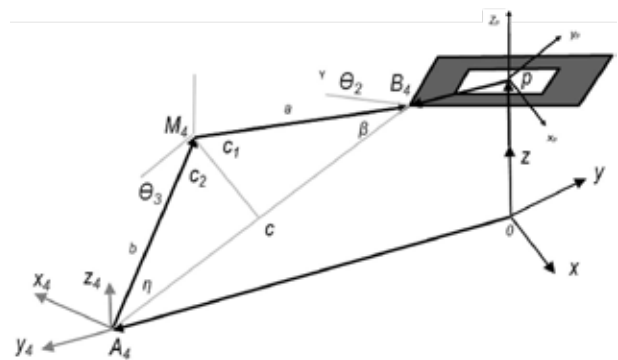


Рис. 4. Приклад схематичного зображення параметрів кінцівки платформи [9]

Зокрема напрямки руху платформи, що задаються відповідними векторами визначаються наступним чином:

$$rBi = rAi + \frac{rMi}{Ai} + \frac{rBi}{Mi}, \quad (5)$$

де rA_i – вектори позначають кінцеві точки A_i опорних ніг;
 rB_i – вектори є точки B_i з'єднання опор робота з платформою;
 i – порядковий номер кінцівки.

У роботі [9, 10] вказано, що три кінцівки МР стоять на поверхні, і за виразом (5).

Положення точок B_i відносно системи координат зв'язаної з платформою МР р (рис. 4) визначено за виразом (6):

$$E_x = \frac{B_3 B_1}{B_3 B_1}, \quad (6)$$

На підставі виконаних розрахунків у статті [9, 10] визначено напрямок одиничного вектора, як нормалі до площини платформи за виразами (7), (8):

$$E_z = E_x E_m, \quad (7)$$

$$E_y = E_z E_x, \quad (8)$$

Загальна модель, що описує переміщення платформи МР у тримірному просторі подається у матричній формі:

$${}^p_B R = [E_x \ E_y \ E_z]. \quad (9)$$

Очевидно, що таке подання моделі є досить громіздким, а операції з матрицями передбачають виконання трудомістких математичних операцій.

Формулювання цілей статті є розробка математичного методу побудови моделі динаміки та кінематики шестиногого крокуючого МР для зменшення часу обчислень, трудомісткості розрахунків та їх автоматизації.

Ефективне моделювання динаміки та кінематики крокуючих МР, зокрема висока точність зменшення часу обчислень та підвищення продуктивності виконуваних робіт може бути досягнуто за рахунок використання нових підходів та розробки новітніх математичних моделей динаміки та кінематики крокуючих МР.

Виклад основного матеріалу. Метод для визначення положення кінцівки шестиногого крокуючого МР, що пропонується в якості альтернативи відомим, ґрунтується на методах проективної геометрії, передбачає використання графічного методу трикутників та побудову кінцевої множини відповідних трикутників для кожного зчленування кінцівки крокуючого МР. При цьому очевидними перевагами пропонованого методу є її відносна простота, порівняно менша кількість обчислень, їх автоматизація та наочність представлення переміщень кінцівок крокуючого МР.

Суть пропонованого методу полягає у знаходженні положення кінцівки крокуючого МР відносно геометричного центру мас його тіла, шляхом поетапної побудови множини трикутників за проєкціями всіх зчленувань кінцівки на площини, що утворені відповідними осями локальної системи координат x, y, z , та обчислення величин сторін цих трикутників, що відповідають напрямку та величині переміщення даної кінцівки крокуючого МР.

Опис пропонованого методу приведено для абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР з однаковою конструкцією тришарнірних кінцівок, наприклад, за рис. 6 та тулубом у формі правильного шестикутника, наприклад, за рис. 5.

Геометрично рухи крокуючого МР показані, як переміщення шарнірів представлених у вигляді точок відносно локальної системи координат x, y, z із початком в точці O , що попередньо прив'язана до геометричного центру мас тіла крокуючого МР (рис. 5) відносно абсолютної декартової системи координат X, Y, Z (рис. 7). При переміщеннях кінцівки крокуючого МР між її ланками та площиною XOZ на якій розміщено центр мас O , утворюються відповідні кути. Зокрема, α_1 – кут між площиною положення геометричного центра мас

O та ланкою AB , β_1 – кут між ланками AB та BC , γ_1 – кут між ланками BC та CD (рис. 6).

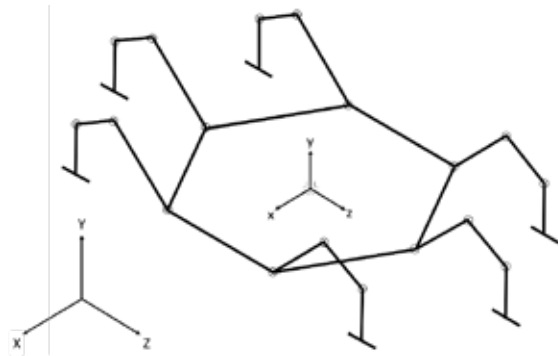


Рис. 5. Схематичне зображення абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР

Відстань між точками A і D відносно його геометричного центру мас крокуючого МР, знаходиться за допомогою теореми косинусів із трикутників $\triangle ABC, \triangle ACD, \triangle ABB', \triangle ACC', \triangle ADD'$ зчленувань кінцівки крокуючого МР на площину YOZ (рис. 6) наступним чином:

За теоремою косинусів обчислюється довжина сторони AC у трикутнику $\triangle ABC$:

$$AC = \sqrt{AB^2 + BC^2 - 2 \cdot AB \cdot BC \cdot \cos \beta_1}. \quad (10)$$

Величина кута $\angle BCA$ обчислюється за допомогою теореми синусів із трикутника $\triangle ABC$:

$$\angle BCA = \frac{\sin \beta_1 \cdot AB}{AC}. \quad (11)$$

Величина кута $\angle ACD$ може бути обчислена наступним чином:

$$\angle ACD = \gamma_1 - \angle BCA, \quad (12)$$

де γ_1 – кут між ланками BC та CD .

Таким чином відстань між точками A і точкою D визначається за теоремою косинусів наступним чином:

$$AD = \sqrt{AC^2 + CD^2 - 2 \cdot AC \cdot CD \cdot \cos \angle ACD}. \quad (13)$$

Знаходження відстані між геометричним центром мас O та шарнірним зчленуванням стегна (відстань OB), гомілки (відстань OC) та лапкою (відстань OD) передбачає обчислення величин кутів $\angle CAD, \angle OAB, \angle BAC, \angle OAD, \angle D'AD$ за виразами (14) – (18), та довжин проєкцій відповідних ланок AB', BC', CD' на площину XOZ (рис. 7) за виразами (14) – (18).

$$\angle CAD = \frac{\sin(\angle ACD) \cdot AD}{CD}. \quad (14)$$

$$\angle OAB = 180 - \alpha_1, \quad (15)$$

де α_1 – кут між площиною XOZ та ланкою AB .

$$\angle BAC = 180 - \beta_1 - \angle BCA, \quad (16)$$

де β_1 – кут між ланками AB та BC .

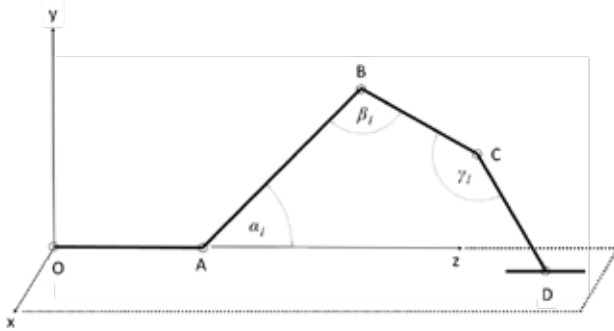


Рис. 6. Схематичне зображення тришарнірної кінцівки абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР: точка O – геометричний центр мас; A – точка з’єднання кінцівки із тулубом; AB – стегнова ланка, BC – гомілкорова ланка, CD – довжина лапки, точка D – п’ятка кінцівки лапки (стопи)

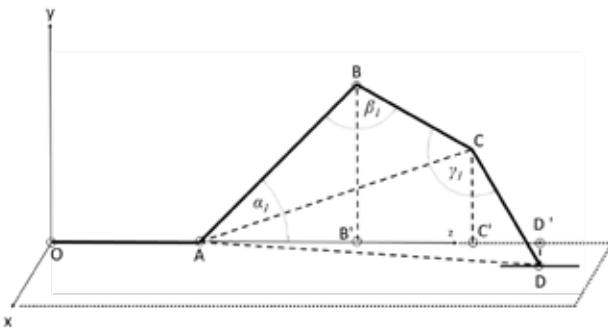


Рис. 7. Проекції зчленувань кінцівки абстрактної моделі крокуючого МР на площину YOZ

$$\angle OAD = 360 - \angle OAB - \angle BAC - \angle CAD. \quad (17)$$

$$\angle D'AD = 180 - \angle OAD. \quad (18)$$

$$AB' = \cos \pm_1 \cdot AB, \quad (19)$$

де α_1 це кут між площиною XOZ та ланкою AB .

$$AC' = \cos(\angle CAD - \angle D'AD) \cdot AC. \quad (20)$$

$$AD' = \cos(180 - \angle OAD) \cdot AD. \quad (21)$$

За результатами обчислень виконаних за виразами (19) – (21) можуть бути знайдені відстані між геометричним центром мас O та проекціями відповідних шарнірних зчленувань наступним чином. Зокрема відстань OB' , що характеризує відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування стегна обчислюється за виразом (22):

$$OB' = \sqrt{OA^2 + AB'^2 - 2 \cdot OA \cdot AB' \cos(\theta_i)}, \quad (22)$$

де θ_i – кут повороту кінцівки робота у площині XOZ та величина якого дорівнює кутам $\angle OAB'$, $\angle OAC'$, $\angle OAD'$ трикутників $\triangle OAB'$, $\triangle OAC'$, $\triangle OAD'$, відповідно (рис. 8); i – порядковий номер кінцівки робота.

Відстань OC' між геометричним центром мас O та проекцією шарнірного зчленування гомілки на площину XOZ обчислюється за виразом (23) наступним чином:

$$OC = \sqrt{OA^2 + AC^2 - 2 \cdot OA \cdot AC \cdot \cos(\theta_i)}. \quad (23)$$

Аналогічним чином відстань OD' між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування лапки обчислюється за виразом (24):

$$OD' = \sqrt{OA^2 + AD^2 - 2 \cdot OA \cdot AD \cdot \cos(\theta_i)}. \quad (24)$$

Отримані результати розрахунків за виразами (22), (23), (24) є величинами проєкцій довжин OB , OC , OD на площину YOZ . Вони дозволяють знайти величини відстаней між геометричним центром мас O та шарнірним зчленуванням стегна (відстань OB), гомілки (відстань OC) та лапкою (відстань OD) у тривірному просторі декартової системи координат, але передбачають виконання додаткових проміжних обчислень значень довжин, а саме обчислення значення DD' , $\angle AD'D$ у трикутнику $\triangle ADD'$ та CC' , $\angle AC'C$, $\angle CAC'$ у трикутнику $\triangle ACC'$ (рис. 7).

Обчислення довжини DD' виконується за теоремою косинусів для трикутника $\triangle AD'D$:

$$DD' = \sqrt{AD^2 + AD'^2 - 2 \cdot AD \cdot AD' \cdot \cos(\angle D'AD)}. \quad (25)$$

Значення кута $\angle AD'D$ обчислюється за теоремою синусів наступним чином:

$$\angle AD'D = \arcsin\left(\frac{AD \cdot \sin(\angle D'AD)}{DD'}\right). \quad (26)$$

Значення кута $\angle CAC'$ у трикутнику $\triangle ACC'$ дорівнюватиме:

$$\angle CAC' = \pm_1 - \angle BAC, \quad (27)$$

де α_1 це кут між площиною XOZ та ланкою AB .

Значення CC' обчислюється за теоремою косинусів наступним чином:

$$CC' = \sqrt{AC^2 + AC'^2 - 2 \cdot AC \cdot AC' \cdot \cos(\angle CAC')}. \quad (28)$$

Величина кута $\angle AC'C$ розраховується за теоремою синусів наступним чином:

$$\angle AC'C = \arcsin\left(\frac{AC \cdot \sin(\angle CAC')}{CC'}\right). \quad (29)$$

Використовуючи властивість подібності трикутників $\triangle ADD'$ та $\triangle ODD'$ та теорему косинусів знайдено значення довжин OB , OC , OD у тривірному просторі декартової лівої системи координат X, Y, Z (рис. 9) наступним чином:

Згідно теореми косинусів відстані OD , OC , OB у трикутниках $\triangle ODD'$, $\triangle OCC'$, $\triangle OBB'$, відповідно дорівнюватимуть:

$$OD = \sqrt{OD'^2 + DD'^2 - 2 \cdot OD' \cdot DD' \cdot \cos(\angle OD'D)}. \quad (30)$$

$$OC = \sqrt{OC'^2 + CC'^2 - 2 \cdot OC' \cdot CC' \cdot \cos(\angle OC'C)}. \quad (31)$$

$$OB = \sqrt{OB'^2 + BB'^2 - 2 \cdot OB' \cdot BB' \cdot \cos(\angle OB'B)}. \quad (32)$$

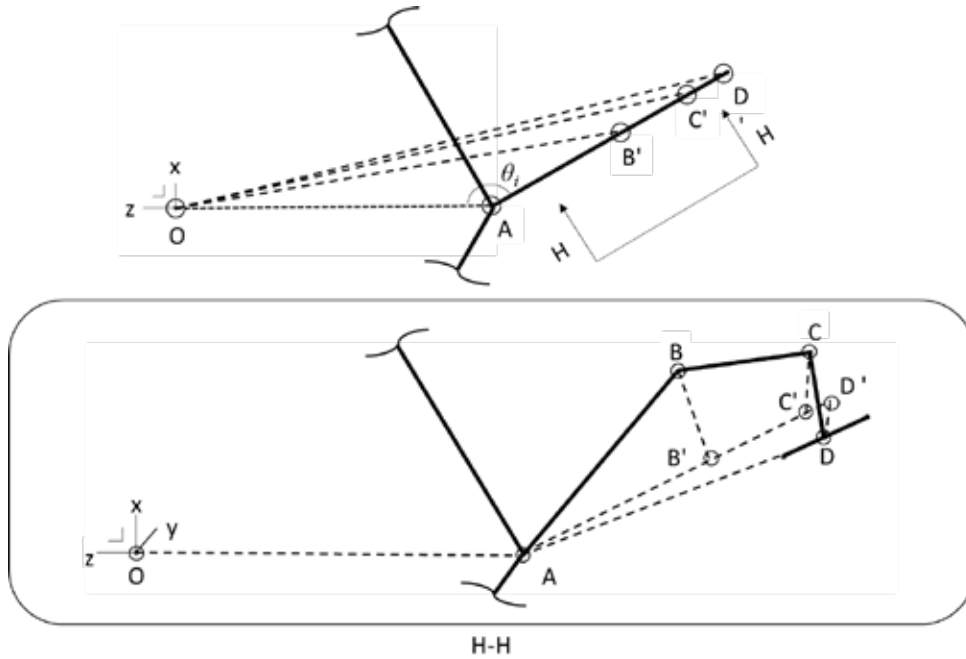


Рис. 8. Відстань OB' , що характеризує відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування; відстань OC' , що характеризує відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування гомілки; відстань OD' , що характеризує відстань між геометричним центром мас та проекцією шарнірного зчленування лапки

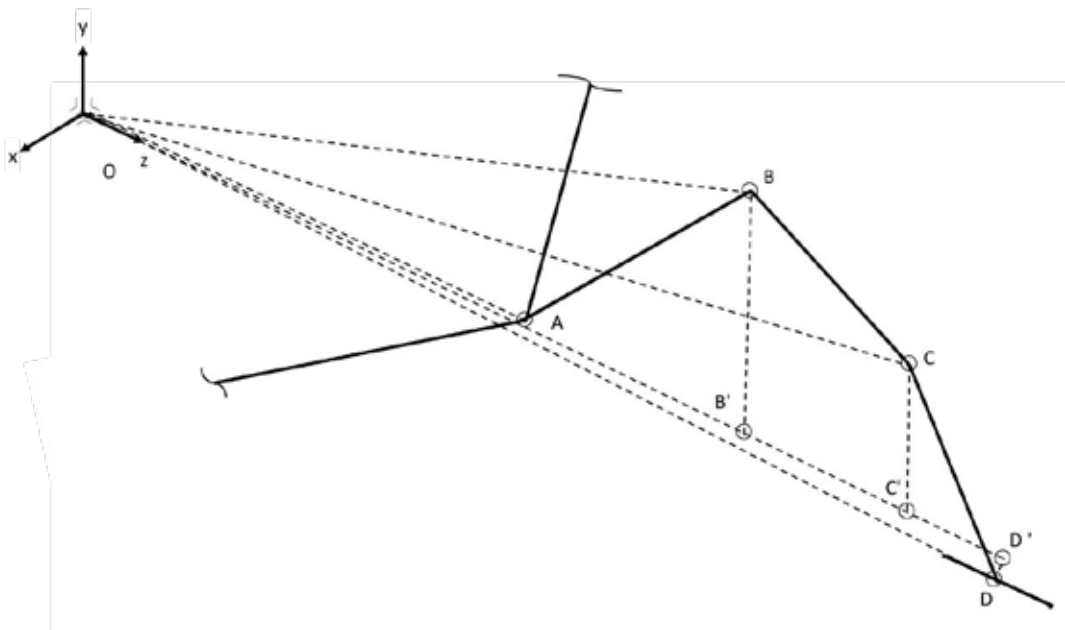


Рис. 9. Відстань OB , що характеризує відстань між геометричним центром мас та шарнірного зчленування; відстань OC , що характеризує відстань між геометричним центром мас та шарнірного зчленування гомілки; відстань OD , що характеризує відстань між геометричним центром мас та шарнірного зчленування лапки

Таким чином запропонований метод за допомогою простого математичного апарату дозволяє визначити положення кінцівки в просторі і, як наслідок, зменшити трудомісткість та підви-

щити продуктивність виконуваних робіт. Дане твердження обґрунтоване тим, що для розглянутої абстрактної моделі крокуючого МР були використані: теорема косинусів, теорема синусів

та властивість подібності трикутників, що дозволило здійснити визначення положення шарнірів кінцівки МР простим математичним апаратом, що забезпечує високу продуктивність пропонованого методу.

Висновки. Запропонований у статті метод визначення положення кінцівок крокуючого мобільного роботу є альтернативою відомим традиційним методам, зокрема методу Денавіта-Хартенберга та матричному методу. Його основними перевагами відносна простота математичного

апарату, порівняно менша кількість обчислень, автоматизація та наочність представлення переміщень кінцівок крокуючого МР.

Апробація методу, проведена для абстрактної моделі шестиногого крокуючого МР з однаковою конструкцією тришарнірних кінцівок, та тулубом у формі правильного шестикутника, та із застосуванням спеціалізованого програмного забезпечення, робота якого у даній статті не розглянута, дозволяє стверджувати, про підвищення продуктивності виконуваних обчислень.

Список літератури:

1. Поліщук М.М. Мобільний робот для обслуговування паркових та лісних деревних масивів. Науково-практичний журнал Екологічні науки. 2019. 26. 132–137. DOI: <https://doi.org/10.32846/2306-9716-2019-3-26-24>.
2. Zihao Yang, Minghai Yuan, Xinhui Shi, Zenan Yang and Mengyuan Li, Mechanism Design and Kinematics Analysis of Spider-like Octopod Robot, IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series 1314 (2019) 012109 doi:10.1088/1742-6596/1314/1/012109.
3. S.Yu. Misyurin, G.V. Kreinin, N.Yu. Nosova, A.P. Nelubin, Six-Legged Walking Robot (Hexabot), Kinematics, Dynamics and Motion Optimization, Procedia Computer Science 190 (2021), 2020 Annual International Conference on Brain-Inspired Cognitive Architectures for Artificial Intelligence: Eleventh Annual Meeting of the BICA Society, 604–610, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.06.071>.
4. Abdelrahman Sayed Sayed, Amr Ahmed Mohamed, Ahmed Magd Aly, Youssef Mohamed Hassan, Abdallah Mahir Abdulaziz, Hossam Hassan Ammar, and Rafaat Shalaby, Experimental Modeling of Hexapod Robot Using Artificial Intelligence A.-E. Hassanien et al. (Eds.): AICV 2020, AISC 1153, pp. 26–36, 2020. https://doi.org/10.1007/978-3-030-44289-7_3.
5. Yaguang Zhu, Ziqi Fang, Liang Zhang Dynamic Jump Motion Control of a Jumping Spider Robot with Redundant Degrees of Freedom, 2019, DOI: 10.1109/CAC48633.2019.8996895.
6. Munadi, Ismoyo Haryanto, Toni Prahasto. Analisa Kinematik, Dinamik Dan Metode Gerak Kaki Model Snooper Hexapod Robot, ROTASI Jurnal Teknik mesin – Vol. 17, No. 3, Juli 2015: 137–144, DOI: 10.14710/rotasi.17.3.137-144.
7. Yaguang Zhu, Long Chen, Qiong Liu, Rui Qin, Bo Jin Omnidirectional Jump of a Legged Robot Based on the Behavior Mechanism of a Jumping Spider, Appl. Sci. 2018, 8, 51; doi:10.3390/app8010051.
8. М. І. Вігуро, А. В. Маляр, Розв'язання прямої задачі кінематики зварювального маніпулятора з шістьма ступенями свободи, Електроенергетичні та електромеханічні системи – 2021 1 (4), <http://doi.org/10.23939/sepes2021.01.027>.
9. Santiago Noriega Álvarez, María Camila Rojas, Hernando Leon-Rodriguez, Design and development of a quadruped spider robot. URL: <http://robotics.umng.edu.co/publications/2017-UNIBOSQUE-Design%20and%20development%20of%20a%20quadruped%20spider%20robot.pdf>.
10. Maria Camila Rojas Suárez, Santiago Noriega Álvarez, Bio-Inspired Quadruped Robot For Detection Carbon Dioxide In The Air, URL: https://clawar.org/wp-content/uploads/2020/08/CLAWAR_2018_paper_21.pdf.

Khazanovych Yu.Yu., Kyrychuk Yu.V., Cherepanska I.Yu. METHOD OF DETERMINING THE POSITION OF THE EXTREMITIES OF A STEPPING MOBILE ROBOT IN SPACE

The article analyzes traditional methods of building mathematical models of dynamics and kinematics of mobile robots (MR) and identifies their main shortcomings, which are the complexity and time-consuming mathematical operations. As an alternative, another mathematical method of building a model of the dynamics and kinematics of a six-legged walking mobile robot is proposed, in particular for determining the position of the limbs of a walking mobile robot, which is based on the methods of projective geometry, in particular the method of triangles.

Unlike traditional methods, the advantages of the method proposed in the article for determining the position of the limbs of a walking mobile robot are the simplicity of the applied mathematical apparatus, its smaller number of calculations and easy automation. This was achieved due to the use of intuitive methods of projective geometry, which are the basis of the proposed method.

Using the example of the abstract model of a six-legged walking mobile robot with the same design of three-hinged limbs and a body in the shape of a regular hexagon, presented in the article, it is shown that the application of the proposed method made it possible to simplify the process of building a mathematical

model to determine the position of its limbs, reduce labor intensity and increase the productivity of the work performed. In particular, by finding the position of the limb of a walking MR relative to the geometric center of mass of his body, by gradually constructing a set of triangles based on the projections of all joints of the limb onto the planes formed by the corresponding axes of the local coordinate system and calculating the sizes of the sides of the triangles corresponding to the direction and amount of movement of the given mobile limb work

The practical implementation of the proposed method is carried out in specialized software, the work of which is not considered in this article.

Key words: *walking mobile robot, mathematical model, coordinate system, automation, method of triangles.*

УДК 351.862.4:342.951:351.85:340.134
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/22>

Чумаченко С.М.

Національний університет харчових технологій

Кутовий О.П.

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського

Попель В.А.

Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Гуйда О.Г.

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

Зайка Н.В.

Державний науково-дослідний інститут технологій кібербезпеки та захисту інформації

Мурасов Р.К.

Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського

НАУКОВО-МЕТОДИЧНИЙ ПІДХІД ЩОДО ОЦІНЮВАННЯ БЕЗПЕКИ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ НА ОСНОВІ КОМПЛЕКСУ ЗАСОБІВ ЗАХИСТУ ЇЇ ОБ'ЄКТІВ ВІД БПЛА І КРИЛАТИХ РАКЕТ

Аналіз відомих підходів до оцінювання рівнів безпеки об'єктів критичної інфраструктури і обробки ризиків, пов'язаних із застосуванням терористами та ворогом безпілотних літальних апаратів та крилатих ракет, в тому числі із застосуванням засобів сучасного зенітно-ракетного, зенітно-артилерійського озброєння, комплексів радіоелектронної боротьби показує, що оцінки таких ризиків не завжди мають необхідну точність. Проблеми вимірювання ризиків пов'язані, в тому числі, з особливостями застосованого озброєння, включаючи крилаті ракети і безпілотні літальні апарати.

До визначальних чинників, що призводить до похибок оцінки цих ризиків, що можливо визначити, як проблему ефективної роботи комплексів оборони та захисту критичної інфраструктури, є вирішення задачі своєчасного виявлення безпілотних літальних апаратів і крилатих ракет та їх якісного супроводження.

Проблеми виявлення та розпізнавання цілей обумовлені їх малими розмірами та масо-габаритними характеристиками, що ускладнює їх виявлення навіть на малих відстанях. Це стосується як радіолокаційних засобів розвідки, так і оптико-електронних. Крім того сам процес виявлення цілей залежить від ступеня його автоматизації. Процес ураження цілей залежить від точності наданих координат розвідки засобам ураження, точності прицілювання цих засобів та їх тактико-технічних характеристик.

Таким чином, існує проблема створення таких засобів боротьби з безпілотними літальними апаратами, які взаємодіють та якісно працюють на всіх етапах – від виявлення цілей до їх ураження.

З метою досягнення необхідних результатів оборони (що в ризик-моделі відповідає точності обробки ризиків), доцільно розділити систему оборони на складові та провести аналіз впливу кожної складової, що входять до системи з числа засобів боротьби з безпілотними літальними апаратами.

Пропонується розглянути чотири основні підсистеми, такі як інформаційну, керуючу, виконавчу підсистеми та підсистему забезпечення. Кожна з підсистем визначається сукупністю показників і критеріїв оцінювання. Вклад кожної з підсистем дозволяє провести оцінку ефективності роботи всього комплексу засобів захисту критичної інфраструктури в цілому.

Пропонується розглянути модель оцінки ефективності комплексу засобів захисту об'єктів критичної інфраструктури і боротьби з безпілотними літальними апаратами та крилатими ракетами, у якій оцінюється ефективність роботи основних складових комплексу засобів. Пропонується проведення оцінки за критерієм ефективність-вартість, що допоможе приймати обґрунтовані рішення щодо побудови оптимальних схем захисту критичної інфраструктури і боротьби з безпілотними літальними апаратами і крилатими ракетами на основі наявних сил та засобів.

Ключові слова: критична інфраструктура, ефективність, рівень ефективності, безпілотний літальний апарат, крилата ракета, зенітно-ракетний комплекс, зенітно-артилерійський комплекс, радіолокаційна станція, радіоелектронна боротьба, критерій, ваговий коефіцієнт.

Постановка проблеми. Безпілотні літальні апарати (БПЛА, або дрони) та крилаті ракети (КР) є досить новими видами озброєнь на полі бою, з 1990-х років їх активно використовують збройні сили провідних країн світу і вже з'явилися результати їх ефективного застосування в останніх воєнних конфліктах.

Бурний розвиток БПЛА призвів до появи багатьох їх різновидів, від розвідників до ударних «камікадзе», дуже різних за розміром та цільовим навантаженням. Особливо небезпечними стають саме ударні БПЛА – носії зброї та БПЛА «камікадзе» (або баражуючі боєприпаси). БПЛА «камікадзе» віднесені до різновиду ударних БПЛА, тільки вони знищують цілі атакуючи зверху. Так, під час воєнних конфліктів воюючі сторони демонструють ефектні відеокадри, які передають дрони-розвідники, відео з камер ударних безпілотників або записи виявлення цілей та самонаведення на цілі, які передали «дрони-камікадзе».

Всі провідні країни світу активно розвивають цей новий вид озброєння який має дуже великий потенціал розвитку та застосування в сучасних і майбутніх війнах. США, Ізраїль, Туреччина, Китай, Канада, Франція, Німеччина, Іран, Росія та інші країни проводять масове виробництво та активне застосування БПЛА в останніх воєнних конфліктах і в Україні, поступово покращуючи їх технічні характеристики та принципи застосування.

Ізраїль вважається лідером технологічних розробок в галузі БПЛА. За Ізраїлем йдуть США, Китай, Канада, Туреччина, Іран, Росія.

З розвитком принципів застосування БПЛА і КР по об'єктам критичної інфраструктури (КІ) відповідно відбувається розвиток систем озброєння, яке спроможне протидіяти цьому досить новому виду зброї. Традиційно до вирішення цієї задачі залучаються зенітні комплекси різних типів, які за своїми характеристиками спроможні виявляти та вражати БПЛА і КР. Але використання більшої частини зенітних комплексів неприйнятне за критерієм «ефективність-вартість». Враховуючи такий стан справ відбувається пошук прийнятних засобів боротьби з БПЛА і КР для захисту КІ. Такі роботи спрямовані на використання і засобів радіоелектронної та оптико-електронної боротьби, і засобів маскування та макетів техніки, і різних перешкод у повітрі (аеростати, сітки та інше), а також на можливу модернізацію зенітних комплексів, характеристики яких потенційно можуть бути покращені для ведення ефективної боротьби з БПЛА і КР. Виконання наведених напрямів робіт

передбачає проведення попередньої оцінки їх ефективності, як за окремими рішеннями, так і за сукупністю рішень.

Актуальним стає завдання обґрунтування та оцінки таких засобів захисту КІ, протидії та боротьби з засобами повітряного нападу, що позбавлені недоліків притаманних сучасним зенітним комплексам, які спроможні ефективно захищати КІ, виявляти та вражати ударні БПЛА і КР, виконувати завдання боротьби або самостійно, або у складі існуючих зенітних комплексів, безпосередньо у складі бойової техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз публікацій за напрямом протидії БПЛА і КР, показує, що наукових статей з даної тематики досить багато. У переважній більшості робіт в цій області переважають надмірно оптимістичні висновки щодо успішності ураження всіх видів БПЛА існуючими російськими засобами ППО та РЕБ. Ситуація нагадує роки початку розвитку авіації та наземних засобів протидії їх застосуванню – засобів протиповітряної оборони. Причому склалося так, що розвиток авіації завжди випереджав розвиток наземних засобів протиповітряної оборони. З авіацією добре боролась саме авіація. Але і у цьому випадку постійно йшла напружена конкурентна боротьба технологій.

Разом з тим, різке та різноманітне вторгнення БПЛА в сучасні бойові дії, їх стрімкий технологічний розвиток виявили проблему ефективної боротьби з ними, особливо з малими БПЛА, яка на даний час залишається надзвичайно складною, системною, і до цих пір ефективно не вирішеною. Тільки одиниці держав світу мають частково в наявності та розвивають засоби, які спроможні достатньо ефективно протидіяти застосуванню сучасних БПЛА.

В існуючих публікаціях пропонуються певні технічні рішення щодо боротьби з БПЛА та теоретичні підходи до оцінки їх ефективності, які, як правило, носять оптимістичний характер [2-9, 12-17], з досить поверхневим теоретичним обґрунтуванням та наявності належних практичних результатів і не зовсім підходять для синтезу засобів протидії БПЛА та КР в умовах ведення сучасних інтенсивних бойових дій, в різних умовах бойової обстановки та погодно-кліматичних умов.

Крім того, у цих роботах, як правило, не обговорюється воєнно-технічний аспект оцінки технічних рішень за критерієм ефективність-вартість. Вважається, що «ефективність» є спроможність системи утворювати системний ефект, але така спроможність має кількісну міру. Таким

чином, об'єктивно існує безпосередній зв'язок між рівнем системного ефекту VS і витратами RS потенціалу здатності сил на його утворення (які дорівнюють «трудовитратам» сил NS за час їх застосування TS за дією управління використанням інформаційного ресурсу IS) [18].

Встає питання у об'єктивному порівнянні ефективності технічних рішень захисту критичної інфраструктури і боротьби з сучасними та перспективними БПЛА і КР з обґрунтуванням їх вартості.

Так, у роботах [5-7] виконаний тільки аналітичний огляд особливостей способів протидії БПЛА без їх порівняння між собою. У роботі [3] наведений алгоритм оцінки ефективності комплексних заходів протидії, деякі тактичні і технічні характеристики БПЛА але він не враховує можливі умови бойової обстановки та погодно-кліматичні умови. У роботі [4] запропонована якісна оцінка способів протидії БПЛА без кількісних оцінок. У [17] запропонована система критеріїв для оцінки ефективності способів протидії БПЛА з їх кількісною оцінкою, але систематизація способів протидії носить дуже суб'єктивний характер, без врахування особливостей об'єктів КІ, вартісних показників та особливостей складу систем захисту об'єктів КІ (ОКІ).

Поява нового виду озброєння – БПЛА та їх застосування в останніх воєнних конфліктах виявили суттєві недоліки зенітних комплексів, що стоять на озброєнні в різних країнах. Сталося так, що незалежна Україна отримала у спадок від Радянського Союзу разом із зенітним озброєнням і всі їх технічні недоліки щодо можливості ведення ефективної боротьби з сучасними БПЛА, особливо малорозмірними. Робіт щодо модернізації цих комплексів та спрямованих на усунення цього недоліку проводилось недостатньо. Аналіз характеристик зенітних комплексів протиповітряної оборони провідних країн світу показує, що багато різноманітних заявлених комплексів протиповітряної оборони нібито здатні вражати як БПЛА, так і крилаті ракети «повітря-земля», літаки, вертольоти. Однак, треба усвідомлювати, що боротьба з БПЛА різних класів суттєво відрізняється. Так, дійсно БПЛА великих та середніх розмірів (типу Predator и Reaper от General Atomics) виявляються, супроводжуються та вражаються з досить високою ефективністю, а з БПЛА малих розмірів виникають суттєві проблеми.

Концептуальні підходи до вирішення проблеми боротьби з БПЛА, що зустрічаються у більшості публікацій, можна звести до наступного:

формування багато-ешелонованого угруповання з різних типів зенітних комплексів, таких як зенітні ракетні комплекси (ЗРК), зенітні артилерійські комплекси (ЗАК), зенітні гарматно-ракетні комплекси (ЗГРК), переносні зенітні ракетні комплекси (ПЗРК), що мають досить високі розвідувальні та вогневі можливості щодо виявлення та вогневого ураження саме малорозмірних БПЛА;

розробка та застосування у складі існуючих ЗРК, ЗАК, ЗГРК додаткових каналів виявлення та супроводження цілей з метою ведення ефективної боротьби саме з малорозмірними БПЛА;

розробка перспективних зразків ЗРК, ЗАК, ЗГРК спроможних вести боротьбу з широким колом цілей, як з літаками (звичайними і за технологією «Стелс») так і малорозмірними БПЛА;

розробка спеціалізованих автоматизованих засобів захисту бойової техніки Сухопутних Військ від бойових БПЛА типу «камікадзе»;

застосування комплексу засобів що до радіоелектронного придушення каналів управління, розвідки, та бойового застосування БПЛА;

розробка спеціалізованих засобів та комплексів боротьби з малорозмірними БПЛА, які застосовують нетрадиційні принципи боротьби.

Сучасні комплекси і системи ППО і ПРО та їх можливі зони прикриття ОКІ наведено на рис. 1.

В [2] відмічається, що для виявлення малорозмірних БПЛА необхідно визначати спеціалізовані засоби розвідки, які мають кращі розвідувальні можливості виявлення та супроводження малорозмірних БПЛА, створювати спеціалізовані канали першочергової передачі розвідувальної інформації про дії малорозмірних БПЛА. Для досягнення високої ефективності системи розвідки повітряних цілей вважають, що немаловажним є виконання комплексу організаційно-тактичних заходів, а саме:

частіша зміна позицій радіолокаційних станцій (РЛС) і засобів зв'язку;

розгортання системи помилкових позицій з імітацією роботи радіоелектронних засобів;

проведення якісного інженерного обладнання позицій РЛС розвідки та зенітних комплексів;

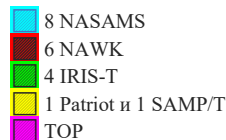
інтенсивне застосування пасивних відбивачів-пасток, імітаторів теплового випромінювання;

розгортання біля позицій РЛС розвідки вогневих засобів протиповітряної оборони (ППО);

організація захисту засобів розвідки від дій диверсійних груп та інші.



Рис. 1. Зони прикриття прийнятих на озброєння зенітно-ракетних систем і комплексів західного зразка для прикриття повітряного простору в зоні розташування ОКІ [19]:



Як показали результати останніх бойових дій в Україні та у Нагорному Карабахі, – ці заходи залишаються малоефективними. Знаходження малорозмірного БПЛА у мертвій воронці зенітних засобів, безпосередньо над наземними цілями призводить до безкарних дій БПЛА по ураженню цих цілей.

Слід відзначити, що ефективна боротьба з малорозмірними БПЛА (що мають ефективну поверхню розсіяння (ЕПР) не менше $0,01 \text{ m}^2$) існуючими зенітними комплексами можлива лише з великими обмеженнями щодо їх своєчасного виявлення та обстрілу. Ефективна боротьба з БПЛА що мають ЕПР меншу ніж

$0,01 \text{ m}^2$ сучасними зенітними комплексами практично неможлива.

Мета статті – дослідження методичного апарату для захисту ОКІ та техніко-економічного аналізу запропонованих технічних рішень ведення боротьби з БПЛА і КР за критерієм ефективність-вартість.

Викладення основного матеріалу. Кожна технічна система (комплекс) захисту ОКІ й боротьби з БПЛА і КР, як складна система, – повинна мати у своєму складі ряд технічних складових (підсистем), об’єднаних у єдине ціле. Розглянемо тезаурус такої складної системи.

Система безпеки ОКІ, як «єргатична система», має такі загальносистемні характеристики:

системна могутність – темп приросту у часі системного ефекту в процесі її застосування;

запас здатності – певний час для наявних умов застосування, на протязі якого система здатна власними «силами» утворювати ефект із потрібною могутністю наявним ресурсом «засобів» (тому ресурсний склад – матеріальна основа здатності);

системний потенціал – максимальний системний ефект застосування, який може бути досягнутий її «силами» при вичерпанні запасу здатності;

ефективність – міра «доцільності» (досконалості) системи як продуктивність витрат запасу здатності («трудовитрат» сил) щодо створення системного ефекту потрібного рівня (рівня «безпеки» ОКІ) в акті застосування.

Оскільки метою наукового дослідження взагалі є вдосконалення «об'єкту» наукового дослідження (тобто підвищення його ефективності), тому предметом дослідження обрано управління об'єктом «система безпеки ОКІ», як найбільш значущий (пріоритетний) чинник, що впливає на ефективність об'єкту. Пріоритетність управління обґрунтована таким чином. Основні принципи системного підходу впливають із загальної концепції застосування об'єкта «складна система» для досягнення мети. Основою загальної концепції функціонування складної системи є керуване (згідно завданню – стимулу) перетворення ресурсного потенціалу системи у системний ефект (реакцію) для досягнення системної мети [18], що й визначає зміст системних ознак, властивостей і характеристик, як то показано на рис. 2.

Кожна складна система складається з підсистем, які мають своє цільове призначення. Умовно у складі складних технічних систем виділяють за призначенням інформаційну, керуючу, виконавчу підсистеми та підсистему забезпечення. Їх спільна робота і повинна забезпечити ефективну роботу всієї системи захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР.

Розглянемо головні функції, які повинні вирішувати підсистеми у складі системи захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР.

Функцією інформаційної підсистеми є пошук, виявлення та розпізнавання БПЛА і КР, що знаходяться у верхній (особливо небезпечній) півсфері.

У якості інформаційної підсистеми можуть бути використані радіолокаційні, оптичні, інфрачервоні та інші типи датчиків (сенсорів) з відповідною апаратурою обробки інформації та прийняття рішення по виявленню та ураженню БПЛА і КР. Відстані роботи цих датчиків різні, по різному залежать від зовнішніх умов та перешкод. Тому ефективність роботи інформаційної підсистеми з одним з наведених датчиків крім їх технічних характеристик буде залежати від ступеня впливу зовнішніх умов та перешкод.

Функціями керуючої підсистеми є управління роботою всіх підсистем системи захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР на підставі розпізнавання та класифікації БПЛА і КР.

Функцією виконавчої підсистеми є безпосереднє ураження або протидія БПЛА і КР.

Функцією підсистеми забезпечення є забезпечення всіх підсистем енергоживленням, контролем функціонування, обслуговування та ремонтом.

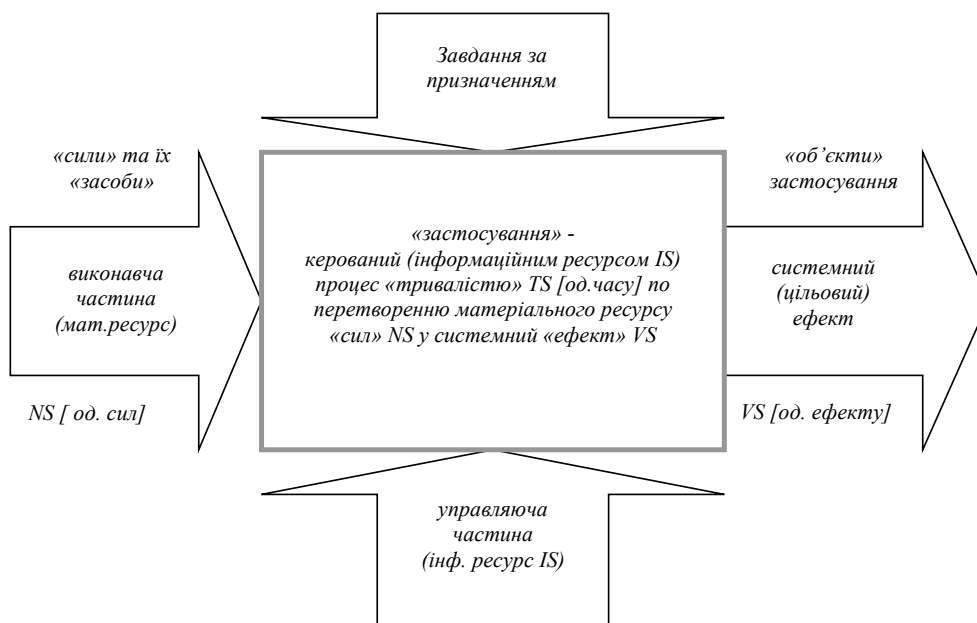


Рис. 2. Концептуальна модель «функції складної системи»

В різних варіантах системи боротьби з БПЛА і КР функції перелічених підсистем можуть бути обмежені або частково відсутні.

Зрозуміло, що кожна з наведених підсистем повинна працювати належним чином, з відповідною ефективністю. Їх розробка та виготовлення потребують певного фінансування та визначають

кінцеву вартість всієї складної системи. Таким чином, виникає потреба оцінки ефективності складної системи захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР, шляхом оцінки ефективності роботи складових підсистем з оцінкою їх вартісних показників.

У таблиці 1 запропоновані критерії оцінки ефективності роботи наведених підсистем у системі захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР (варіант).

Таблиця 1

Цільові (часткові) критерії оцінки ефективності роботи наведених підсистем у системі захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР

Інформаційна підсистема	
Критерії оцінки	Рівень оцінки
1. Просторово-часові характеристики:	
1.1. Ефективна дальність виявлення. 1.2. Час виявлення. 1.3. Кут огляду по координаті X. 1.4. Кут огляду по координаті Y. 1.5. Час огляду по координаті X. 1.6. Час огляду по координаті Y.	1.1: 0 – дальність менше 100 м; 1 – дальність більше 100 м. 1.2: 0 – час більше 3 сек.; 1 – час менше 3 сек. 1.3: 0 – кут менше 90° 1 – кут більше 90° 1.4: 0 – кут менше 90° 1 – кут більше 90° 1.5: 0 – час огляду більше 1 сек. 1 – час огляду менше 1 сек. 1.6: 0 – час огляду більше 1 сек. 1 – час огляду менше 1 сек.
2. Електромагнітна сумісність (ЕМС)	
–	0 – несумісність в зоні бойових дій; 0,5 – несумісність у зоні до 50 м; 1,0 – повна сумісність.
3. Універсальність використання:	
3.1. Діапазон зовнішніх чинників, що впливають, при яких забезпечується стійка робота: 3.1.1. вітер 3.1.2. температура 3.1.3. вологість 3.1.4. Складна фоновна та цільова обстановка 3.2. Можливість використання для протидії БПЛА і КР іншого виду базування (наземного, морського).	3.1: 3.1.1 – 3.1.3: 0 – мінімальне значення; 1,0 – максимальне значення. 3.1.4: 0 – відсутність селекції на складному фоні; 0,9 – здатність розрізнити бойові БПЛА і КР на складному фоні; 1,0 – здатність розрізнити БПЛА і КР типу «камікадзе» на складному фоні. 3.2: 0 – неможливо; 0,5 – із середнім за технічною складністю і вартістю доопрацювання; 1,0 – можливо без доопрацювання.
4. Наявність функції розпізнавання типу БПЛА і КР:	
4.1. Селекція на фоні птахів. 4.2. Ефективна площа розсіювання БПЛА і КР, що виявляється у автоматичному або автоматизованому режимі. 4.3. Розпізнавання типу БПЛА і КР (важкий, середній, легкий, міні, мікро, або за іншою ознакою).	4.1: 0 – відсутність селекції; 1,0 селекція є. 4.2., 4.3: 0 – більше 1,0 м ² 0,1 – більше 0,1 м ² 0,3 – більше 0,01 м ² 0,5 – більше 0,005 м ² 1,0 – більше 0,001 м ²

Інформаційна підсистема	
Критерії оцінки	Рівень оцінки
Керуюча підсистема	
5. Ступінь автоматизації роботи:	
5.1. Необхідна кількість операторів для протидії БПЛА і КР (від 0 до 1).	5.1: 0 – потрібен оператор; 0,2 – автоматизація роботи в одному з режимів; 0,4 – автоматизація в режимі виявлення і супроводу; 0,6 – автоматизація в режимі виявлення і супроводження; 0,8 – автоматизація у режимах виявлення, супроводу і ураження під контролем операторів; 1,0 – повністю автоматична робота.
5.2. Наявність розпізнавання і класифікації цілей (від 0 до 1).	5.2: 0,8 – глибока автоматизація розпізнавання та класифікації у всій зоні виявлення; 1,0 – автоматичне розпізнавання і класифікація у всій зоні виявлення.
Виконавча підсистема	
6. Зниження ефективності виконання цільового завдання БПЛА і КР від засобів ураження та протидії:	
6.1. Артилерійський канал. 6.2. Ракетний канал. 6.3. Спеціальний БПЛА і КР. 6.4. Оптичні пастки. 6.5. РЕБ, ОЕП з порушення управління. 6.6. Макети об'єкту прикриття. 6.7. Засоби маскування. 6.8. Перехоплення управління.	0 – гарантоване виконання цільового завдання; 1,0 – спосіб самозахисту неефективний.
Підсистема забезпечення	
Наявність автономного електрозабезпечення. Наявність самодіагностики (функціонального контролю). Наявність ремкомплекту. Наявність технічного обслуговування.	0 – нема у наявності; 1,0 – є в наявності. .

Кожен цільовий критерій, що наведений у таблиці, нормований та знаходиться в межах від 0 до 1.

Ефективність кожної з наведених j -тих (в даному випадку $j=1,4$) підсистем $E_j(i)$ можна оцінити шляхом згортки всіх їх цільових (часткових) i -тих критеріїв:

$$E_j(i) = \prod_{i=1}^M k_i^{c_i} = k_1^{c_1} \times k_2^{c_2} \times \dots \times k_M^{c_M}, \quad (1)$$

де k_1, \dots, k_M – цільові (часткові) критерії ефективності виконання своїх функцій кожної з підсистем;

c_1, \dots, c_M – вагові коефіцієнти цільових (часткових) критеріїв ефективності,

$$\sum_{i=1}^M c_i = 1;$$

M – кількість часткових показників ефективності.

Послідовність (етапи) вибору функції згортки наступна:

1. Обґрунтування допустимості згортки – критерії, що згортаємо, повинні бути однорідними.

2. Нормалізація критеріїв – критерії, що згортаємо, повинні бути нормалізовані. У задачах, де

локальні критерії мають різні одиниці вимірювання, необхідно привести критерії до єдиного, бажано безрозмірного, масштабу вимірювання.

3. Врахування пріоритетів критеріїв – формування вагових коефіцієнтів, які відображають важливість критерія.

4. Побудова функції згортки.

Для згортання критеріїв використовують такі функції:

адитивна згортка;

мультиплікативна згортка;

агрегування та інші операції.

Вагові коефіцієнти C_i цільових (часткових) критеріїв ефективності зазвичай визначаються методом експертних оцінок (і тільки при неможливості проведення експертного опитування, ваги усіх часткових критеріїв приймаються рівноважними $C_i = 1 / M$).

Визначимо суперкритерій ефективність-варіантність оцінки всієї системи захисту ОКІ і боротьби з БПЛА і КР.

Вважається, що «ефективністю» є спроможність системи утворювати системний ефект, але така спроможність має кількісну міру. Таким чином,

об'єктивно існує безпосередній зв'язок між рівнем системного ефекту VS і витратами RS потенціалу здатності сил на його утворення (які дорівнюють «трудовитратам» сил NS за час їх застосування TS за дією управління використанням інформаційного ресурсу IS). Очевидний характер такого зв'язку в системах матеріальної природи – це «пряма» залежність ефекту від витрат, тому вважаємо, що аксіоматично справедливо –

$$VS(IS) = ES \times RS(IS) = ES \times \{NS(IS) \times TS(IS)\}. \quad (2)$$

Тому коефіцієнт «перетворення» ES , який має фізичний зміст продуктивності витрат потенціалу здатності (ресурсів) по створенню ефекту, є загальною мірою «досконалості» системи (тобто її «доцільності» як пристосованості до використання за призначенням) і служить об'єктивною оцінкою ефективності системи в акті застосування; він дорівнює, як то витікає із (2) –

$$ES = \frac{VS(IS)}{RS(IS)} = \frac{VS(IS)}{\{NS(IS) \times TS(IS)\}}. \quad (3)$$

Підкреслимо, що загальносистемна характеристика «ефективність» є фундаментальною для «складної» системи, оскільки визначається загально-системними «зовнішніми» показниками (системним ефектом VS , складом сил NS , часом застосування TS), що пов'язані з кінцевим результатом акту застосування системи і тому залежать від усіх «внутрішніх» факторів – системних ознак.

Інформаційний ресурс CS , що містить дані про стан матеріальних ресурсів та умови акту застосування системи, інформаційні технології та засоби інформатизації управління, дозволяє сформулювати план X розподілу «засобів» по об'єктах застосування, план розподілу сил по заходах процесу застосування та план (сценарій) дій D «сил» по реалізації планів X, Y розподілу, які складають зміст «організаційного управління» і саме якість котрих визначає ефективність системи.

Для кількісної оцінки системної ефективності ES потрібне обчислення значення функціонала –

$$ES(VS, NS, TS) = \frac{VS\{BS(X)\}}{NS(Y, D) \times TS(Y, D)}, \quad (4)$$

де X – «план» розподілу засобів BS по об'єктах застосування;
 Y – «план» розподілу сил NS по завданнях процесу застосування для реалізації плану розподілу засобів X ;
 D – «план» (сценарій) дій сил у часі TS по виконанню завдань щодо застосування засобів.

Принцип «максимуму системної ефективності» системного підходу, безумовно, є фундаментальним критерієм оптимальності «рішень» щодо створення, застосування і розвитку CS .

Будемо вважати, що ефективність технічної системи (TC) безпеки ОКІ і ведення боротьби з БПЛА і КР $E_{TC}^{захиству}$ повинна бути не гірше припустимої $E_{TC \text{ прип.}}^{захиству}$, значення якої забезпечує збереження функціональності об'єкта захисту – ОКІ, при мінімумі витрат ресурсів:

$$E_{TC}^{захиству} \geq E_{TC \text{ прип.}}^{захиству}, \text{ при } C_{TC}^{захиству} \rightarrow C_{TC \text{ min}}^{захиству} \quad (5)$$

де $C_{TC}^{захиству}$ – ціна технічного рішення захисту;
 $C_{TC \text{ min}}^{захиству}$ – припустима ціна технічного рішення захисту.

З'ясування припустимого рівня ефективності технічних рішень захисту ОКІ і ведення боротьби з БПЛА і КР залежить від ступеня збереження функціональності об'єкта КІ. Зрозуміло, що можливі пошкодження об'єкта КІ повинні бути мінімальними або зовсім відсутніми. Звідси є логічним при відсутності будь-яких пошкоджень об'єкта КІ прийняти рівень ефективності технічних рішень біля одиниці. Але зрозуміло, що такий варіант передбачає реалізацію дуже вартісного технічного рішення, реалізація якого вкрай складна і недоцільна. Тому доцільно у якості припустимого рівня ефективності технічних рішень вибрати рівень по методу Фібоначчі або золотого перетину – 0,62. Такий рівень забезпечує виживання об'єкту КІ, можливість до подальшого виконання задач за призначенням та прийнятну вартість системи безпеки КІ і захисту від БПЛА і КР.

Ефективність технічної системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР $E_{TC}^{захиству}$ є результатом згортки часткових критеріїв **ефективності** виконання своїх функцій складовими j підсистемами.

Всі вище наведені критерії підсистем є взаємопов'язаними, однорідними, лінійними, нормалізованими, позитивними, потенційно мають різні пріоритети, та відносяться до групи результативних. Тому для формування загального критерію (суперкритерію) може бути застосована за аналогією мультиплікативна згортка у вигляді критерію ефективності (1).

Виходячи з цього, ефективність технічної системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР (протидії) можна оцінити як результат (або рівень) функціонування всіх чотирьох підсистем, який прагне до максимального значення, за формулою:

$$E_{TC}^{захиству} = E_j(i) = E_1^{B1} \times E_2^{B2} \times E_3^{B3} \times E_4^{B4} \rightarrow \max, \quad (6)$$

де $E_1^{B1}, E_2^{B2}, E_3^{B3}, E_4^{B4}$ – відповідно, ефективності інформаційної, керуючої, виконавчої підсистем та підсистеми ресурсного забезпечення;

B_1, \dots, B_4 – вагові коефіцієнти критеріїв ефективності інформаційної, керуючої, виконавчої підсистем та підсистеми ресурсного забезпечення,

$$\sum_{j=1}^4 B_j = 1.$$

Шкала оцінки ефективності системи боротьби з БПЛА і КР

Рівень ефективності	Значення показника
Дуже ефективна	$E_{ТС}^{\text{захисту}} \geq 0,8$
Ефективна	$0,8 > E_{ТС}^{\text{захисту}} \geq 0,6$
Недостатньо ефективна	$0,6 > E_{ТС}^{\text{захисту}} \geq 0,4$
Неефективна	$0,4 > E_{ТС}^{\text{захисту}} \geq 0,2$
Дуже неефективна	$E_{ТС}^{\text{захисту}} < 0,2$

Вагові коефіцієнти B_j цільових (часткових) критеріїв ефективності наведених підсистем зазвичай визначаються методом експертних оцінок (і тільки при неможливості проведення експертного опитування, ваги усіх часткових критеріїв приймаються рівновагими $B_j = 1 / 4$).

Таким чином, кожна з чотирьох підсистем, що входять до складу технічної системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР, вносить свій внесок у ефективність цієї системи. Як слідує з аналізу виразу (6) критерії ефективності кожної з підсистем повинні бути досить високими. Інакше ефективність функціонування системи буде низькою.

За результатами оцінки ефективності способів протидії БПЛА і КР доцільно подальше порівняння способів за критерієм «ефективність – вартість».

Авторами запропонована шкала оцінки ефективності системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР, що наведена у таблиці 1.

Встановивши припустимі рівні ефективності системи безпеки ОКІ і протидії БПЛА і КР можна визначити оптимальні критерії прийняття рішень вибору способів протидії БПЛА і КР (2): ефективність системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР (протидії) повинна бути більшою за припустиму, при мінімумі витрат ресурсів.

Оцінка ефективності існуючих та перспективних систем безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР та її результати виходять за рамки цієї публікації та будуть наведені у наступній публікації.

Висновки. Засоби боротьби та протидії з БПЛА і КР доцільно розглядати з системних позицій. В роботі розроблена модель оцінювання безпеки критичної інфраструктури на основі комплексу засобів захисту її об'єктів від БПЛА і крилатих ракет.

1. Запропонована в моделі система критеріїв дозволяє:

детально дослідити ефективність роботи основних підсистем системи безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР;

проводити кількісну оцінку ефективності способів боротьби та протидії БПЛА і КР на рівні підсистем та складної системи в цілому;

виконувати порівняння між собою різних реалізацій одного або декількох способів боротьби з БПЛА і КР;

виявляти найбільш ефективні способи боротьби та протидії в різних умовах обстановки та кліматичних умовах.

2. Оцінка використання декількох способів протидії зводиться до формування єдиного критерія шляхом згортки цільових критеріїв кожної з підсистем.

3. Результати оцінки ефективності існуючих та перспективних систем безпеки ОКІ і боротьби з БПЛА і КР будуть наведені у наступній публікації.

Список літератури:

1. Ерёмин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И., Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА «Арсенал Отечества» № 6(14) за 2014 г. [Електронний ресурс]. – Доступний <https://arsenal-otechestva.ru/article/389-antidrone>
2. Макаренко С. И., Тимошенко А. В., Васильченко А. С. Анализ средств и способов противодействия беспилотным летательным аппаратам. Часть 1. Беспилотный летательный аппарат как объект обнаружения и поражения. Системы управления, связи и безопасности, № 1, 2020. С. 109–145. [Електронний ресурс]. – Доступний <http://sccs.intelgr.com/archive/2020-01/05-Makarenko.pdf>
3. Слободян М.Г., Можаява Е.И., Подстригаев А.С. Способы и средства противодействия беспилотным летательным аппаратам // Современные проблемы радиоэлектроники: сборник научных трудов. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018. С. 46–50.
4. Семенец В.О., Трухин М.П. Способы противодействия беспилотным летательным аппаратам // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2018. Т. 10. № 3. С. 4–12.
5. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>
6. Cang Liang, Ning Cao, Xiaokai Lu, Youjie Ye. UAV Detection Using Continuous Wave Radar // 2018 IEEE International Conference on Information Communication and Signal Processing (ICICSP), 28-30 Sept. 2018, Singapore. DOI:10.1109/ICICSP.2018.8549736

7. Sineglazov V.M. Complex structure of UAVs detection and identification // Electronics and Control Systems, 2015, no. 3 (45), С. 28–32.
8. Igor Korobiichuk, Yuriy Danik, Oleksyj Samchyshyn The estimation algorithm of operative capabilities of complex countermeasures to resist UAVs // Simulation: Transactions of the Society for Modeling and Simulation International, 7 August 2018, vol. 95, pp. 569–573. DOI: 10.1177/0037549718791264.
9. Ергунов В.О., Ильин В.О., Некрасов М.И., Сосунов В.Г. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51–58.
10. Todd Humphreys. Statement on the security threat posed by unmanned aerial systems and possible countermeasures, Radionavigation Laboratory, The University of Texas at Austin, 2015. URL: <https://radionavlab.ae.utexas.edu/images/stories/files/papers/statement-humphreys-20150318.pdf>
11. Теодорович Н.Н., Строганова С.М., Абрамов П.С. Способы обнаружения и борьбы с малогабаритными беспилотными летательными аппаратами // Интернет журнал «Науковедение». 2017. Т. 9. № 1. URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/13TVN117.pdf>
12. Dinesh Sathyamoorthy. A review of security threats of unmanned aerial vehicles and mitigation steps // ResearchGate, 2015, available at: https://www.researchgate.net/publication/282443666_A_Review_of_Security_Threats_of_Unmanned_Aerial_Vehicles_and_Mitigation_Steps.
13. Кузнецов В.Е., Волков Ю.А. Анализ методов противодействия малоразмерным беспилотным летательным аппаратам // Вопросы радиоэлектроники. 2016. № 12. С. 81–87.
14. Корченко А.Г., Ильяш О.С. Обобщенная классификация беспилотных летательных аппаратов // Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил. 2012. № 4(33). С. 27–36.
15. Каримов А.Х. Цели и задачи, решаемые беспилотными авиационными комплексами нового поколения // Труды МАИ. 2011. № 47. URL: <http://trudymai.ru/published.php?ID=26767>
16. Nickolay L. Georgiev, Venstislav I. Pehlivanski, Ognyan G. Todorov. Indicators on the Effectiveness of Radio-Electronic Counteraction against Unmanned Aerial Vehicles // NDT Days, 2018, vol. 1, issue.1, pp. 126–131.
17. Подстригаев А.С.1, Слободян М.Г., Можаяева Е.И. Система критериев для оценки эффективности способов противодействия беспилотным летательным аппаратам http://trudymai.ru/upload/iblock/d1b/Podstrigaev_Slobodyan_Mozhaeva_rus.pdf
18. Педченко Г.М., Невольниченко А.І., Шарий В.І. Военно-научное обеспечение операций войск (сил). Монография. МО Украины. Видання ВІ КНУ ім. Тараса Шевченка, 2011.
19. Так виглядає покриття України системами ППО NASAMS 2 та IRIS-T SLM. ITnews. URL: <http://itnews.com.ua/news/96246-tak-viglyadaye-pokrittya-ukrayini-sistemami-ppo-nasams-2-ta-iris-t-slm> (дата звернення: 18.01.2023).

Chumachenko S.M., Kutovoi O.P., Popel V.A., Guida O.G., Zaika N.V., Murasov R.K.
SCIENTIFIC-METHODICAL APPROACH REGARDING CRITICAL INFRASTRUCTURE SECURITY ASSESSMENT ON THE BASIS OF THE COMPLEX OF TOOLS FOR THE PROTECTION OF ITS FACILITIES FROM UNMANNED AERIAL VEHICLES AND CRUISE MISSILES

Analysis of known approaches to assessing the assurance levels of critical infrastructure objects and processing risks, associated with the use of unmanned aerial vehicles and cruise missiles by terrorists and the enemy, including the use of modern anti-aircraft missile and anti-aircraft artillery weapons, electronic warfare systems shows that assessments of such risks do not always have the required accuracy. Risk measurement problems are related among other things, to the specifics of the weapons used, including cruise missiles and drones.

Among the determining factors that lead to errors in the assessment of these risks, which can be identified as a problem of the effective operation of defense complexes and the protection of critical infrastructure, is the solution to the problem of timely detection of drones and cruise missiles and their quality escorting.

The problems of detecting and recognizing targets are caused by their small size and mass-dimensional characteristics, which makes it difficult to detect them even at short distances. This applies to both radar and optical-electronic means of reconnaissance. In addition, the target detection process itself depends on the degree of its automation. The process of defeating targets depends on the accuracy of the intelligence coordinates provided to the means of destruction, the accuracy of aiming of these means and their tactical and technical characteristics.

Thus, there is a problem of creating such means of combating unmanned aerial vehicles that interact and work well at all stages - from identifying targets to their destruction.

In order to achieve the necessary defense results (which in the risk model corresponds to the accuracy of risk processing), it is advisable to divide the defense system into components and conduct an analysis of the impact of each component included in the system from the means of combating unmanned aerial vehicles.

It is proposed to consider four main subsystems, such as informational, control, executive subsystem and support subsystem. Each of the subsystems is determined by a set of indicators and evaluation criteria. The contribution of each of the subsystems makes it possible to evaluate the effectiveness of the entire complex of means of protection of critical infrastructure as a whole.

It is proposed to consider a model for evaluating the effectiveness of the complex of means of protecting critical infrastructure objects and combating drones and cruise missiles, which evaluates the effectiveness of the main components of the complex of means. It is proposed to carry out an assessment based on the efficiency-cost criterion, which will help to make informed decisions regarding the construction of optimal schemes for the protection of critical infrastructure and the fight against drones and cruise missiles based on the available forces and means.

Key words: *critical infrastructure, efficiency, level of efficiency, unmanned aerial vehicle, cruise missile, anti-aircraft missile complex, anti-aircraft artillery complex, radar station, electronic warfare, criterion, weighting factor.*

УДК 536.24:533.6.011

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/23>**Баранюк О.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Воробйов М.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Рябцун Р.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**МОДЕЛЮВАННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК РОБОТИ
КОТЛА ДКВР-10-13 ПРИ ВИКОРИСТАННІ МЕТАНО-ВОДНЕВОЇ
СУМІШІ ЯК ПАЛИВНОГО ГАЗУ**

В сучасному світі існує актуальна проблема зниження генерації парникових газів і послаблення парникового ефекту яка зумовлює необхідність істотного удосконалення процесів перетворення енергії і підвищення техніко-економічних характеристик систем енергопостачання на їх основі. Вирішити цю проблему здатні інноваційні водневі технології, які покликані зіграти важливу роль в диверсифікації потоків енергоносіїв, що істотно зменшить споживання вуглеводневих палив і дозволить поліпшити стан навколишнього середовища.

Дослідження та розробки, що пов'язані з використанням водню у якості палива на сьогоднішній день є надзвичайно актуальними. Найбільш поширеною є ідея використання спалювання водню у суміші з природним газом для забезпечення декарбонізації атмосфери та зменшення впливу на глобальні кліматичні зміни шляхом скорочення викидів вуглекислого газу з продуктами згорання вуглеводневого палива [1].

Робота присвячена визначенню залежності викидів NO_x водогрійному котлі типу ДКВР-10-13, що оснащений штатними осьовими пальниками від витрат метано-водневої суміші в якості палива. В роботі прийнято, що процентне співвідношення вмісту водню до об'єму паливо-повітряної суміші становить 10, 20, 30, 40 і 50%. На основі аналізу температурних полів і гідродинамічної картини потоку поблизу пальників зроблено висновок щодо умов досягнення сталої теплової потужності пальників, режимів їх роботи і принципів забезпечення від шкідливих явищ проскоку, відриву полум'я та неповноти згорання палива.

В ході моделювання визначено, що викиди NO_x збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту H_2 в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту $[H_2]$ в паливі ($[H_2] = 50\%$). Для такого палива концентрація $[NO_x]$ зростає від 16,4 (37 м³/год) до $[NO_x] \approx 24$ ррт (при 185 м³/год).

Попередньо проведена верифікація розрахункових даних викидів окислів азоту з даними режимної карти котла типу ДКВР-10-13 для випадку спалювання метану. Результат порівняння свідчить, що модель розроблена в середовищі ANSYS-Fluent децю завищує значення NO_x на виході з котла, що свідчить про доцільність використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливоспалюючим устаткуванням.

Ключові слова: воднева енергетика, емісія, метано-воднева суміш, моделювання, завихреність, окисли азоту.

Постановка проблеми. При дослідженні можливості використання водню в якості часткової заміни традиційного природного газу паливос-

палюючим устаткуванням, основним питанням є визначення можливої і допустимої частки водню у таких горючих сумішах. Вирішення цього

питання є компромісом між намаганням, з однієї сторони, збільшити частку водню, як заміника природного газу, а з іншої – забезпечити основні принципи безпеки і ефективності використання таких сумішей, а також мінімізації інвестицій, які необхідні для переходу газоспалювальних і топкових пристроїв з чистого природного газу, для якого вони були призначені, на горючу суміш природного газу і водню. [1-3].

В роботі [4] приведений висновок про те, що у випадку спалювання метано-водневої суміші в пальнику, в якому реалізована технологія струменово-нішевого спалювання, засобами CFD-моделювання встановлено, що додавання водню в об'ємі від $\frac{1}{4}$ до $\frac{1}{2}$ збільшує емісію NO_x на 27%. Автори роботи [3], які експериментально дослідили процес спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA» і зробили що викиди NO_x збільшуються із зростанням витрат палива.

Автори представленої роботи в своїх раніше проведених дослідженнях зробили той же висновок, проте в їх роботі не було досліджень присвячених впливу витрати метано-водневої суміші на утворення окислів азоту (NO_x) в CFD-моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13, оснащеного штатними осьовими пальниками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розвиток цивілізації призводить до невинного споживання енергії. Внаслідок цього значно збільшується антропогенне забруднення довкілля, значна частина якого в'язана із викидами промислових і енергетичних підприємств, транспорту, житлово-комунальних господарств й інших галузей економіки.

Одним із способів досягнення низьких рівнів шкідливих речовин є додавання до паливо-повітряної суміші газоподібного водню. Для класичної теорії і практики спалювання горючого газу питання взаємозамінності двох різних горючих газів не є новим. У різних країнах до цього питання приходили тоді, коли виникала альтернатива використання основного горючого газу, наприклад природного. Такою альтернативною міг бути біогаз, генераторний газ, нафто заводський газ, скраплений пропан-бутан, скраплений природний газ (LNG) і інші горючі гази та їх суміші. Такою альтернативою може бути також водень, або горючі суміші водню із іншими газами [1]. В підтвердження цього твердження у серпні 2020 року в Україні стартував Водневий проект Регіональної газової компанії [5] і розпочалися випробування сумішей природного газу та водню

для використання у газорозподільних мережах. Як висновок представлено твердження – якщо використати суміш з 20% водню, то можна заощадити на рік 6 млрд кубометрів природного газу, а якщо у суміші 50% водню, то економія – 15 млрд кубів.

Проте, слід враховувати, що метан (доля якого в природному газі становить більше 85%) і водень мають надзвичайно велику відмінність у горючих характеристиках, що спричиняє повну відсутність їх взаємозамінності. Витрати повітря для повного згорання і об'єм продуктів згорання відрізняються у 4 рази, швидкість розповсюдження полум'я – у 7 разів, кількість первинного повітря, яка гарантує горіння без проскоку відрізняється у 4 рази. Порівняння індексів взаємозамінності Воббе для метану і водню підтверджує факт неможливості переведення пальників на природному газі на водень – відмінність індексу Воббе для цих газів становить 15%, що у 3 рази перевищує нормовану величину 5%. Забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на водень без змін у конструкції пальника і без втрати теплової потужності установки неможливо [1]. Такі висновки зроблені автором [1] шляхом дослідження, що проведені при спалюванні нафто-заводського газу на Кременчуцькому Нафтопереробному заводі із змінною складовою водню від 20% до 54% об., свідчать про те, що спалювання газів із значною кількістю водню призводить до кардинальних змін у роботі газопальникових пристроїв і масовому переходу їх роботи у режим проскоку полум'я. Змінюється також емісійна тепловіддача факелів і конвективний теплообмін на поверхнях нагрівання.

Автори роботи [3], що виконали експериментальні дослідження направлені на визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в побутовому двоконтурному котлі «MICRA DUO CS 24» фірми «RÖDA» роблять висновок, що викиди NO_x збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності (паливоспоживання) із збільшенням вмісту H_2 , в тому числі – для випадку максимально випробуваного вмісту $[\text{H}_2]$ в паливі ($[\text{H}_2] = 50\%$).

Автор [1] зауважує, що забезпечити перехід роботи пальника з природного газу на горючу суміш з умістом водню більше за 20–25% без внесення змін в конструкцію пальника і режим його роботи, а також конструкцію і режим роботи тяго-дутьових пристроїв установки неможливо

з міркувань забезпечення сталості теплової потужності і оптимальних параметрів роботи установки. Але, крім цього, є ще одна складова цього питання. Це зміна характеру теплообміну у топкових пристроях, які будуть працювати на газах – заміниках з підвищеним умістом водню. Так наприклад, при переході на спалювання суміші з умістом водню до 30% об. об'єм продуктів згорання зменшується з $11,95 \text{ м}^3/\text{м}^3$ до $7,59 \text{ м}^3/\text{м}^3$ з одночасним зменшенням умісту CO_2 у складі продуктів згорання. Ці два фактори призведуть до погіршення теплообміну у топках теплогенеруючих агрегатів.

Отже, питання застосування водню у якості домішки до основного палива з метою часткового заміщення традиційного природного газу об'єктами побутового призначення є одним з перспективним і дискусійним.

Мета дослідження. Основною метою даного дослідження є визначення енергетичної ефективності та викидів шкідливих речовин під час спалювання метано-водневої суміші в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 оснащеного штатними осьовими пальниками за допомогою відомого пакету програм CFD-моделювання ANSYS-Fluent, що дозволяє після попередньої верифікації з експериментальними даними взятими з робіт інших авторів, розширити діапазони режимних параметрів, що можуть впливати на роботу котельного агрегату в цілому.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. Метод дослідження – чисельний, за допомогою академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student. Дана ліцензія є абсолютно безкоштовною (з 2015 року) і призначена для вирі-

шення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Для моделювання використовувалась академічна ліцензія програмного комплексу ANSYS Student яка з 2015 року є абсолютно безкоштовною і призначена для вирішення ознайомлювальних і освітніх задач в академічному середовищі.

Об'єкт дослідження – процеси, що протікають під час спалювання паливної суміші метану і водню в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 оснащеного штатними осьовими пальниками.

Предмет дослідження – водогрійний котел типу ДКВР-10-13, оснащений штатними осьовими пальниками без урахування топкових екранів. Габаритні розміри моделі становили $4,9 \times 2,6 \times 3,8$ м. Для побудови моделі використані дані з відкритих джерел [6]. Для прогнозування теплового NO_x використовується модель часткової рівноваги. В роботі прийнято, що процентне співвідношення вмісту водню до об'єму паливоповітряної суміші становить 10, 20, 30, 40 і 50%. При формуванні граничних умов врахована незмінність кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю.

Виклад основного матеріалу дослідження. Представлена робота є продовженням раніше опублікованого дослідження [7]. Відмінність – визначення теплових і екологічних характеристик процесів, що мають місце під час спалювання паливної суміші метану і водню в комп'ютерній моделі водогрійного котла типу ДКВР-10-13 в залежності від зміни потужності котельного агрегату (100% від номінальної, 80%, 60%, 40%

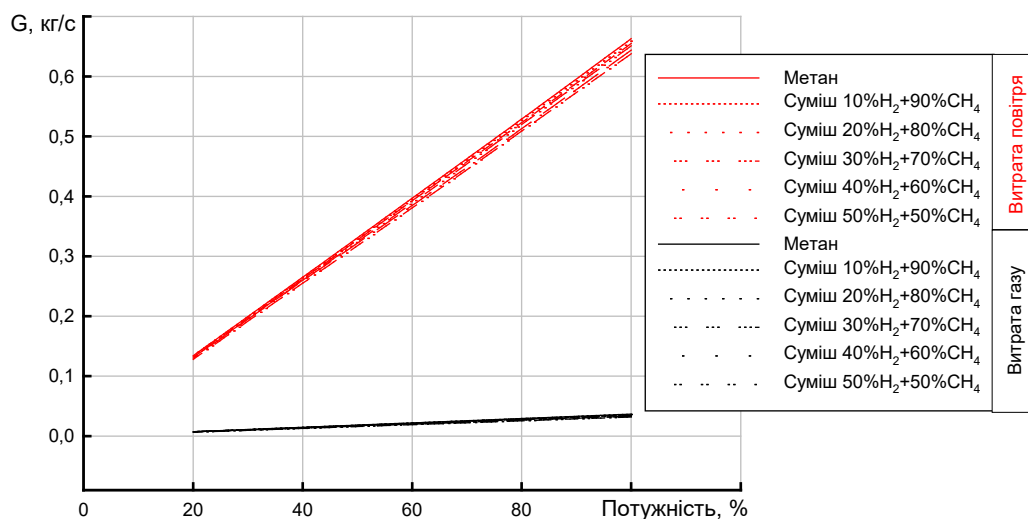


Рис. 1. Залежність витрати газу та повітря в залежності від зміни потужності котельного агрегату

і 20%). Зменшення потужності призводить до зміни витрат газу і повітря (рис. 1), при чому співвідношення між якими визначається незмінністю кількості теплоти, що вноситься в топку сумішшю. Послідовність розрахунку для визначення згаданих витрат паливо-повітряної суміші і первинного повітря описано в [7].

Як свідчать дані, що приведені на рис. 1 для забезпечення умови незмінності кількості теплоти яка вноситься в топку сумішшю, склад паливо-повітряної суміші майже не впливає на зміну її витрати. Теж саме стосується і витрати повітря на низьких рівнях потужності (20 і 40% від номінальної). Збільшення потужності призводить до більшого розшарування між даними витрати повітря зі збільшенням значення заміщення $[H_2]$. Проте, слід зазначити для випадку номінальної потужності котельного агрегату заміщення $[H_2] = 10\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші) зменшує витрату суміші порівняно з метаном всього лише на 0,6%. При подальшому збільшенні величини заміщення $[H_2]$ на 20, 30 40 і 50% ця цифра становить 1,2; 1,8; 3 і 3,9% відповідно.

На рис. 2 представлено значення викидів NO_x [ppm], для комп'ютерної моделі котла типу ДКВР-10-13 в залежності від витрат палива, кг/с. Розшаровуючим параметром на графіку служить співвідношення $[H_2]/[CH_4]$ в паливній суміші.

Для верифікації результатів моделювання використовувалась режимна карта котла типу ДКВР-10-13 підготовлена співробітником Інституту газу НАН України Горбуновим О.В. Згідно режимної карти котла ДКВР 10-13 при роботі на номінальній потужності рівень утворення NO_x складає $\sim 190 \dots 200$ мг/м³, що відповідає $\sim 95 \dots 100$ ppm. Як свідчить рис. 2, на номі-

нальній потужності котельного агрегату рівень NO_x для випадку спалювання чистого метану склав 105 ppm, що узгоджується з даними режимної карти.

Рис. 2 свідчить, що зменшення потужності котельного агрегату і відповідно витрати палива, призводять до зменшення викидів NO_x . Представлені на цьому рисунку дані свідчать, що заміщення метану воднем сприяє зменшенню генерації в середньому в 6-ть разів порівняно з випадком спалювання метану. При цьому із збільшенням вмісту H_2 , спостерігається тенденція до зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності. Так, наприклад, заміщення $[H_2] = 20\%$ збільшує емісію $[NO_x]$ від 20 при витраті палива 0,0141 кг/с, що відповідає 20% номінальної потужності до $[NO_x] \approx 28,6$ ppm при витраті палива 0,0352 кг/с, що відповідає 20% номінальної потужності.

На рис. 3 та 4 приведені результати CFD-моделювання генерації NO_x для випадку спалювання палива з процентним вмістом водню в паливній суміші з метаном $[H_2] = 10\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші (рис. 3) та $[H_2] = 50\%$ (рис. 4).

Аналіз результатів моделювання свідчить про те, що картини візуалізації генерації окислів азоту для всіх досліджених випадків заміщення метану воднем подібні. Ця подібність виражається в тому, що генерація окислів азоту найбільш інтенсивна поблизу струменя нагрітих газів, а не безпосередньо в ньому. Також для всіх досліджених випадків подібним є те, що 2/3 об'єму топки котла в димових газах має максимальну концентрацію NO_x . Далі відбувається перемішуванні потоків і в конвективній шахті потік NO_x однорідний.

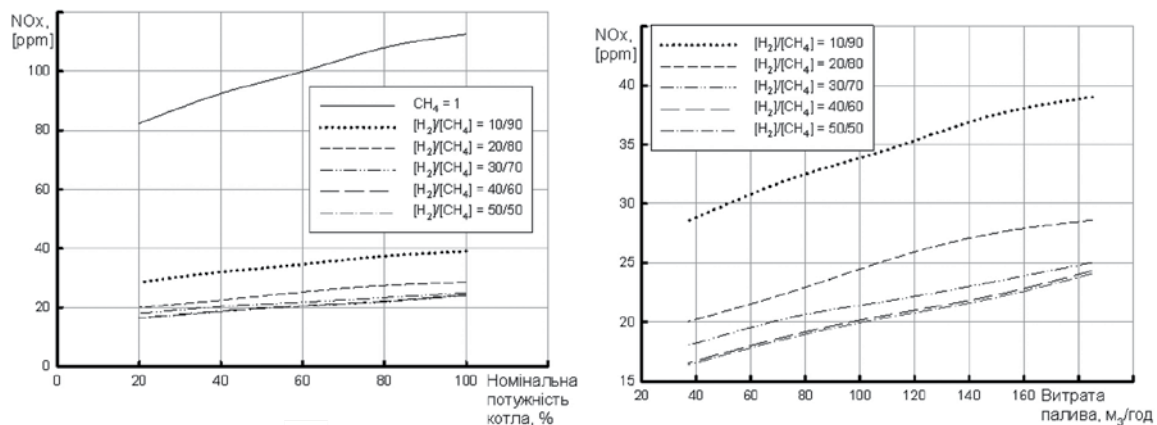


Рис. 2. Генерація NO_x , [ppm] на виході з топкової камери водогрійного котла типу ДКВР-10-13 в залежності від номінальної потужності (а) і від витрат палива, м³/год (б)

Представлений на рис. 4 розподіл свідчить розподіл про залежність генерації окислів азоту від витрати паливо-повітряної суміші на один паливник.

Слід зазначити, що збільшенням вмісту H_2 , більше 50% не призведе до зменшення генерації окислів азоту. Оскільки у випадку заміщення $[H_2] = 40\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші) концентрація $[NO_x]$ зростає від 16,5 до 24,3 ppm, що відповідає витратам палива 37 і 185 $m^3/год$ або 20 і 100% номінальної потужності котла. В той же час, випадку заміщення $[H_2] = 50\%$ концентрація $[NO_x]$ зростає від 16,4 до 24 ppm, що відповідає витратам палива 37 і 185 $m^3/год$ або 20 і 100% номінальної потужності котла.

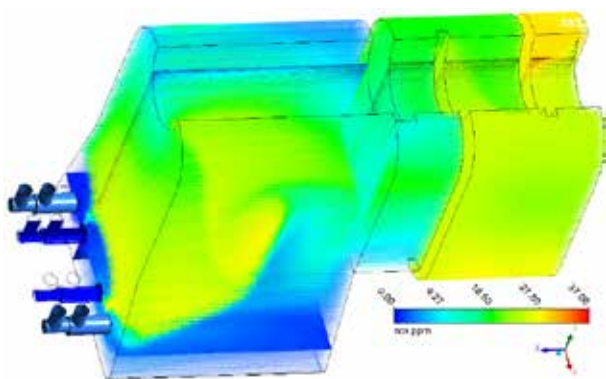


Рис. 3. Розподіл окислів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 10%-ю добавкою водню для номінальної потужності

Обговорення отриманих результатів. Аналіз отриманих результатів свідчить про те, що збільшення значення заміщення $[H_2]$ до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до зменшення емісії окислів азоту.

Так, згідно даних осереднення по поверхні перерізу виходу димових газів з котельного агрегату результатів CFD-моделювання генерації NO_x при різному процентному вмісту водню в паливній суміші з метаном $[H_2] = 0 \dots 50\%$ (до об'єму паливо-повітряної суміші). Аналіз приведених даних свідчить, що заміщення $[H_2] = 10\%$ в 2,9 рази зменшує значення NO_x . Подальше збільшення частки $[H_2]$ до об'єму паливо-повітряної суміші призводить до поступового зменшення генерації NO_x , і вже при досягненні $[H_2] = 40\%$ значення осереднених NO_x по поверхні перерізу виходу димових газів з котельного агрегату не змінюються. На думку авторів це пояснюється тим, що водень «відбирає» ту частину кисню, що в іншому випадку може спровокувати генерацію окислів азоту як у випадку спалювання «чистого» метану.

Аналіз отриманих за допомогою CFD-моделювання даних свідчить, що зі збільшенням процентного співвідношення вмісту водню в паливо-повітряній суміші емісія викиду окислів азоту зменшується. Отриманий характер зменшення емісії окислів азоту при заміщенні воднем

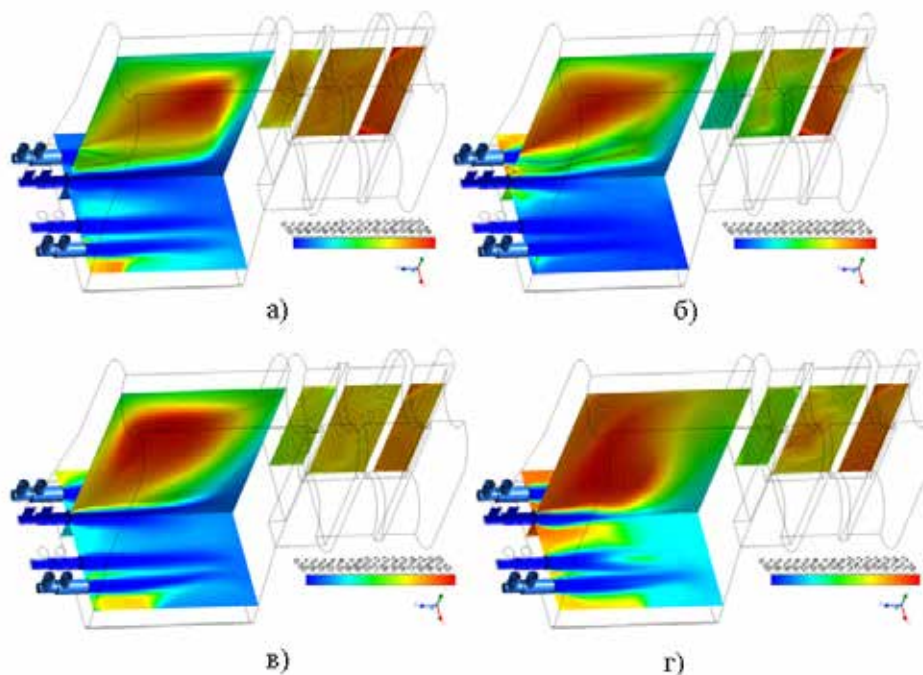


Рис. 4. Розподіл утворення окислів азоту в топковій камері котла ДКВР-10-13 у випадку спалювання метану з 50%-ю добавкою водню при зміні витрати палива: а) 148 $m^3/год$; б) 111 $m^3/год$; в) 74 $m^3/год$; г) 37 $m^3/год$

метану у паливі відповідає характеру результатів експериментальних досліджень [3].

Висновки. На основі аналізу результатів CFD-моделювання процесів спалювання газоподібного палива в топці парового водотрубного котла ДКВР 10-13 за допомогою CFD-моделі з використанням академічної ліцензії програмного комплексу ANSYS Student визначено, що:

- верифікація CFD-моделі виконана за допомогою режимної карти котла ДКВР 10-13, яку надав співробітник Інституту газу НАН України Горбуновим О.В. Згідно даних режимної карти, при роботі на номінальній потужності рівень утворення NO_x складає $\sim 190 \dots 200 \text{ мг/м}^3$ (дані), що відповідає $\sim 95 \dots 100 \text{ ppm}$. Даний рівень оксидів азоту добре співвідноситься з результатами CFD-моделювання, який для чистого метану склав 105 ppm ;
- заміщення $[\text{H}_2] = 0 \dots 50\%$ (до об'єму паливоповітряної суміші) дозволяє майже в 4 рази змен-

шити генерацію окислів азоту в димових газах на виході з котельного агрегату;

- заміщення метану воднем сприяє зменшенню генерації в середньому в 6-ть разів порівняно з випадком спалювання метану;
- визначено, що викиди NO_x збільшуються із зростанням витрат палива. Водночас зберігається тенденція суттєвого зменшення викидів в усьому діапазоні варіювання теплової потужності із збільшенням вмісту H_2 ;
- встановлено, що перевищення вмісту $[\text{H}_2]$ більше 50% не призведе до суттєвого зменшення викидів NO_x .

Таким чином комп'ютерне моделювання дозволяє проводити попередню, досить точну оцінку емісійних характеристик спалювання газоподібних палив різного складу. Отримані дані численних розрахунків можуть бути використані при проектуванні енергетичного обладнання.

Список літератури:

1. Колієнко А.Г. Використання сіміші природного газу і водню як палива в комунально-побутових промислових паливопалювальних теплогенеруючих установках // Нетрадиційні технології, 2021, № 4(52), С. 25–30.
2. Карп І.М., П'яних К.Є. Возможні обсяги економії та заміщення природного газу в Україні // Енерго-технологии и ресурсосбережение, 2012., № 1. С. 16–22.
3. Soroka B., Pyanykh K., & Zgurskyi V. (2022). Mixed Fuel for Household Gas-Powered Appliances as an Option to Replace Natural Gas with Hydrogen. Science and Innovation, 18(3), 10–22. <https://doi.org/10.15407/scine18.03.010>.
4. Сірий О., Кобилянська О. CFD-моделювання процесу спалювання суміші метан-водень в струменево-нішевому стабілізаторі полум'я // Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки, 2021, № 4, Том 33 (72), С. 172–180. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/26>.
5. Як Україна переходить на водень. Підсумки 2021 року. [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://glavcom.ua/new_energy/publications/yak-ukrajina-perehodit-na-voden-pidsumki-2021-roku-810809.html. – 05.01.2023 р.
6. ENERGETIK. Паровые котлы: котлы серии ДКВр давлением до 1,3 МПа (газ, мазут, уголь) ДКВр-4-1, ДКВр-6,5-13, ДКВр-10-13, ДКВр-20-13 [Електронний ресурс] – Режим доступу: https://energetik.ua/catalog/parovi_kotly/dkvr-1-3/. – 05.01.2023 р.
7. Баранюк О.В., Воробйов М.В., Рябцун Р.С. Визначення енергетичних та екологічних характеристик роботи котла ДКВР-10-13 при додаванні водню до природного газу методом математичного моделювання / Вчені записки Таврійського національного університету ім. В.І.Вернадського. Серія: Технічні науки, Том 33 (72) № 5, 2022, С. 183–192.

Baranyuk A.V., Vorobiov M.V., Ryabtsun R.S. SIMULATION OF ENVIRONMENTAL CHARACTERISTICS OF DKVR-10-13 BOILER OPERATION USING METHANE-HYDROGEN MIXTURE AS FUEL GAS

In the modern world, there is an urgent problem of reducing the generation of greenhouse gases and weakening the greenhouse effect, which necessitates a significant improvement of energy conversion processes and an increase in the technical and economic characteristics of energy supply systems based on them. This problem can be solved by innovative hydrogen technologies, which are designed to play an important role in the diversification of energy flows, which will significantly reduce the consumption of hydrocarbon fuels and improve the state of the environment.

Research and development related to the use of hydrogen as a fuel is extremely relevant today. The most widespread idea is the use of burning hydrogen in a mixture with natural gas to ensure de-carbonization of the atmosphere and reduce the impact on global climate change by reducing carbon dioxide emissions with hydrocarbon fuel combustion products [1].

The work is devoted to the determination of the dependence of NO_x emissions of a DKVR-10-13 type water heating boiler equipped with standard axial burners on the consumption of methane-hydrogen mixture as fuel. In the work, it is assumed that the percentage ratio of hydrogen content to the volume of the fuel-air mixture is 10, 20, 30, 40 and 50%. On the basis of the analysis of temperature fields and the hydrodynamic picture of the flow near the burners, a conclusion was made regarding the conditions for achieving a stable thermal power of the burners and the principles of protection against the harmful phenomena of flashback, flame separation, and incomplete combustion of fuel.

In the course of modeling, it was determined that NO_x emissions increase with increasing fuel consumption. At the same time, there is a trend of a significant decrease in emissions in the entire range of variation of thermal power (fuel consumption) with an increase in the H₂ content, including for the case of the maximum tested content of [H₂] in the fuel ([H₂] = 50%). For such fuel, the concentration of [NO_x] increases from 16.4 (37 m³/h) to 24 ppm (at 185 m³/h).

Preliminary verification of the calculated data of nitrogen oxide emissions with the data of the mode map of the DKVR-10-13 type boiler for the case of methane combustion was carried out. The result of the comparison shows that the model developed in the ANSYS-Fluent environment slightly overestimates the value of NO_x at the boiler outlet, which indicates the feasibility of using hydrogen as a partial replacement of traditional natural gas with fuel-burning equipment.

Key words: hydrogen energy, emission, methane-hydrogen mixture, modeling, vorticity, nitrogen oxides.

Босий М.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Боса О.А.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Ботнарєнко В.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

Герасименко І.О.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ПАРОКОМПРЕСІЙНОГО ЦИКЛУ ПОВІТРЯНОГО ТЕПЛООВОГО НАСОСА В АГРОПРОМИСЛОВОМУ ВИРОБНИЦТВІ

На межі зміни, які відбуваються в агропромисловому виробництві України потребують розробки та створення сучасних теплонасосних технологій для теплопостачання та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. У статті розглядається проблема використання повітряного теплового насоса (ТН), що працює на альтернативних джерелах енергії для теплопостачання та гарячого водопостачання сільськогосподарських підприємств. У своїй роботі повітряний ТН використовує низькопотенційну теплоту повітря. Метою роботи є оцінка ефективності використання парокompресійного циклу повітряного ТН в агропромисловому виробництві. Виконано аналіз характеристик та оцінені особливості роботи повітряних ТН для агропромислових підприємств. Визначено фактори, які впливають на енергетичну ефективність повітряного ТН. Проаналізовано вплив тривалості температур повітря різних величин на теплопродуктивність повітряного ТН. Для підвищення ефективності роботи теплонасосної системи запропоновано схему відбору низькопотенційної теплоти з використанням повітряного ТН. На підставі проведених досліджень встановлено, що перевагою повітря як теплоносія є те, що повітряні ТН можуть працювати практично повсюди і не вимагають облаштування низькотемпературного контуру. Перспективним способом підвищення ефективності теплопостачального обладнання агропромислових підприємств є застосування повітряного ТН при річному циклі його роботи. Повітряні ТН мають значну перевагу перед іншими теплоенергетичними установками. Вони споживають енергію поновлюваних джерел, знижують витрати на електропостачання більш, ніж в половину – це повністю автоматизований пристрій. Використання повітряних ТН для утилізації низькопотенційних теплових потоків економічно вигідно. Аналіз ефективності систем теплопостачання показує, що в сучасних економічних умовах тенденція систем теплопостачання може розвиватися із застосуванням парокompресійних повітряних ТН, це може суттєво підвищити економічні і технічні характеристики теплопостачального обладнання для будівель агропромислового виробництва.

Ключові слова: *повітряний тепловий насос, підприємства агропромислового виробництва, низькопотенційне джерело теплоти, системи теплопостачання, коефіцієнт трансформації, енергетичний коефіцієнт корисної дії ТН.*

Постановка проблеми. Запаси традиційних вуглеводнів, таких як нафта, газ, вугілля зовсім не є нескінченними. А використання їх пов'язане з негативним впливом на екосистему. Нині одним з питань, що найгостріше стоїть перед Україною та світовою спільнотою взагалі і потребує нагального вирішення, є питання забезпечення енергетичної та екологічної безпеки підприємств агропромислового виробництва.

Одним із актуальних та першочергових завдань ефективного розвитку в Україні є про-

блема енергозбереження, як в економічному секторі, так і в агропромисловому виробництві при використанні енергетичних потоків різної якості. Первинні природні енергетичні ресурси і, в першу чергу, природний газ, займають провідне, а інколи і визначальне місце в енергетичних системах більшості країн, незважаючи на високі темпи впровадження альтернативних та відновлювальних енергетичних джерел енергії, особливо сучасних теплотнасосних технологій [1-7].

Тому перспективним напрямком на даному етапі є використання безкоштовної теплоти повітря як природного джерела енергії для теплопостачання агропромислових підприємств, яке може забезпечити чималі потреби в теплоті навіть в умовах територій помірного клімату. Методи використання теплової енергії повітря загалом економічно ефективно, однак частка застосування теплової енергії довкілля доволі мала. Значно підвищити ефективність використання природних джерел енергії особливо повітря для потреб агропромислового виробництва можливо при наявності теплових агрегатів, таких як парокompресійні теплові насоси [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Теплові насоси – це компактні, економічні та екологічно чисті системи опалення, що дозволяють отримувати теплоту для гарячого водопостачання та опалення приміщень за рахунок використання теплоти низькопотенційного джерела зовнішнього повітря, ґрунту, ґрунтових, артезіанських та термальних вод; природних вод річок, озер, морів; промислові та очищені побутові стоки; вода технологічних циклів. Витративши 1 кВт електричної енергії, можна отримати 3–5 кВт для опалення [8-12].

Завдяки високій енергоефективності теплових насосів все більше роблять вибір на користь таких систем, як теплопостачання і нагріву води для агропромислових сільськогосподарських підприємств різного призначення [3].

Принцип роботи парокompресійного теплового насоса «повітря-повітря» наведений на рис. 1.

Газоподібний холодоагент надходить на вхід компресора. Компресор стискає газ, при цьому його тиск і температура збільшуються. Нагрітий газ подається в теплообмінник (конденсатор), в якому він охолоджується, передаючи свою теплоту повітря або воді, і конденсується – переходить в рідкий стан.

Далі на шляху рідини високого тиску встановлений розширювальний вентиль, який знижує тиск холодоагента. Компресор і розширювальний вентиль ділять замкнений гідравлічний контур на дві частини: високого і низького тиску. Під час проходження через розширювальний вентиль частина рідини випаровується, і температура потоку знижується. Далі цей потік надходить в теплообмінник (випаровувач), який пов'язаний із навколишнім середовищем (наприклад, повітряний теплообмінник на вулиці). При низькому тиску рідина випаровується (перетворюється на газ) при температурі нижчій, ніж температура зовнішнього повітря, води або ґрунту. Внаслідок цього частина теплоти

зовнішнього повітря, води або ґрунту перетворюється у внутрішню енергію холодоагента. Газоподібний холодоагент знову надходить в компресор – контур замикається [13-18].



Рис. 1. Схема компресійного теплового насоса «повітря-повітря»

Для систем «повітря-повітря» теплові насоси аналогічні настінним, касетним, каналним та іншим типам внутрішніх блоків звичайних кондиціонерів. За їх допомогою нагрівається повітря у приміщенні (рис. 2).



Рис. 2. Повітряний тепловий насос

Для систем «повітря-вода» за допомогою теплового насоса нагрівається вода у системі теплопостачання в приміщенні (рис. 3).

Ефективність та технікоекономічна доцільність систем теплопостачання в різних сферах економіки та агропромислового виробництва при технологічній підготовці може бути суттєво підвищена при впровадженні сучасних повітряних

теплонасосних технологій теплопостачання та енергозбереження. В першу чергу це відноситься до утилізації повітря як низькопотенційної енергії природного джерела [2, 3, 19-22].

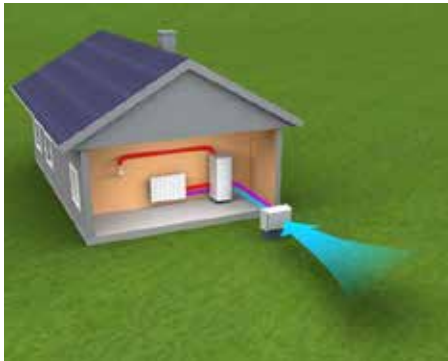


Рис. 3. Тепловий насос «повітря-вода»

Постановка завдання. Метою статті є оцінка ефективності та доцільності використання парокомпресійного циклу повітряного ТН на підприємствах агропромислового виробництва.

Виклад основного матеріалу дослідження. Розрахункова схема повітряного ТН з використанням в системі теплопостачання підприємств агропромислового виробництва наведена на рис. 4 [2, 3, 23-25].

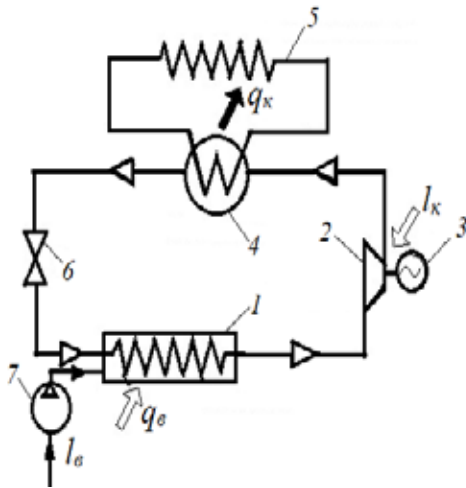


Рис. 4. Схема повітряного ТН в системі теплопостачання підприємств агропромислового виробництва

- 1 – випарник; 2 – компресор; 3 – електродвигун;
- 4 – конденсатор; 5 – система таплопостачання для АПК; 6 – дросель; 7 – вентилятор

Повітря з температурою t_0 і питомою об’ємною витратою v_n вентилятора подається у випарник повітряного ТН. У випарнику повітря охолоджується і на виході має параметри $t_{\text{вих.в}}$, v_n . Система теплопостачання має теплові втрати в довілля q_k . Для їхньої компенсації використовується питомий

тепловий потік від конденсатора повітряного ТН q_k з температурою теплоносія t_k на вході в систему теплопостачання [1, 2, 5, 26, 27].

Для визначення оптимальних режимів роботи повітряного ТН та вентилятора проаналізуємо питомі сумарні витрати енергії на систему теплопостачання, які можна представити у вигляді:

$$l_{\text{тп}} = l_{\text{сум}}/q_k = (l_k + l_e)/q_k, \quad (1)$$

де l_k, l_e – питомі витрати енергії на компресор ТН і вентилятор, кВт·год/кг; кВт·год/м³;
 q_k – питомий тепловий потік від конденсатора повітряного ТН, кВт/м².
 Величина l_k визначається за формулою:

$$l_k = q_{\text{вип}}/(COP - 1), \quad (2)$$

де $q_{\text{вип}}$ – питомий тепловий потік у випарнику повітряного ТН, кВт/м²;
 COP – коефіцієнт трансформації теплового насоса.

COP_T – теоретичний коефіцієнт трансформації повітряного ТН, визначаємо за співвідношенням: [3, 15, 22-24].

$$COP_T = \frac{T_k}{T_k - T_e} = \frac{348}{348 - 279} = 5, \quad (3)$$

де $T_e = 279$ – температура випаровування робочого агента R134a у випарнику повітряного ТН, К; $T_k = 348$ – температура конденсації робочого агента R134a у конденсаторі повітряного ТН, К [27, 29].

Величина COP може бути представлена у вигляді:

$$COP = COP_T \cdot \eta_{\text{ТН}} = 5 \cdot 0,7 = 3,5, \quad (4)$$

де $\eta_{\text{ТН}}$ – коефіцієнт втрат повітряного ТН можна прийняти $\eta_{\text{ТН}} = 0,7$ [18, 19].

$$q_{\text{вип}} = v_n \cdot \rho_n \cdot c_{p,n} (t_0 - t_{\text{вих.в}}), \quad (5)$$

де v_n – питома об’ємна витрата повітря, м³/кг; ρ_n – густина повітря, кг/м³;
 $c_{p,n}$ – питома теплоємність повітря, кДж/кг·К.

Витрати енергії на привід вентилятора визначаємо за формулою:

$$l_b = v_n \cdot \Delta p / \eta_b \cdot \eta_{\text{пр}}, \quad (6)$$

де Δp – питомі витрати тиску у випарнику повітряного ТН, кПа;
 $\eta_b = 0,8$ і $\eta_{\text{пр}} = 0,95$ – ККД вентилятора і його приводу.

Питомий тепловий потік q_k у формулі (1) визначається за рівнянням теплового балансу повітряного ТН:

$$q_k = q_b + l_k. \quad (7)$$

Необхідно визначити температуру повітря на виході з випарника $t_{\text{вих.в}}$, для даної температури навколишнього середовища $t_0 = -5; 0; 5; 10; 15$ °C.

Температура повітря на виході з випарника $t_{\text{вих.в}}$ визначається за наступною формулою [1, 2]:

$$t_{\text{вих. в}} = t_0 - \frac{COP - 1}{COP} (t_k - t_{\text{п}}), \quad (8)$$

де t_0 – температура довкілля, °C;
 t_k – температура теплоносія, що подається в систему тепlopостачання, °C;
 $t_{\text{п}}$ – температура повітря в системі тепlopостачання, °C.

Розраховані значення температури повітря на виході з випарника $t_{\text{вих.в}}$ наведені в табл. 1.

Таблиця 1

Розраховані значення $t_{\text{вих.в}}$

$t_0, ^\circ\text{C}$	-10	-5	0	5	10	15
$t_{\text{вих.в}}, ^\circ\text{C}$	-13	-7	-3	3	8	12

Температура води на виході з конденсатора t_k дорівнює температурі нагрітого теплоносія на вході в систему тепlopостачання. При визначенні цієї температури враховуємо наступне. В опалювальній системі існує різниця температур між температурою нагрітого теплоносія t_k та температурою в приміщенні $t_{\text{п}}$.

При зниженні температури довкілля збільшується тепловий потік, необхідний для тепlopостачання, за рівнянням теплопередачі необхідно підвищувати дану різницю температур $(t_k - t_{\text{п}})$ і температуру теплоносія t_k . Отже, t_k і q_k збільшується зі зниженням температури навколишнього середовища t_0 .

Температура теплоносія, що подається в систему тепlopостачання визначається за рівнянням, яке виводиться на основі аналізу процесів теплообміну в системі нагріта вода – повітря в приміщенні [1, 2, 12].

$$t_k = t_{\text{п}} + (t_{\text{т}}^{\text{п}} - t_{\text{п}}) \cdot \left(\frac{t_{\text{п}} - t_0}{t_{\text{п}} - t_0^{\text{п}}} \right)^{\frac{1}{1+n}}, \quad (9)$$

де $t_{\text{т}}^{\text{п}}$ – розрахункова температура нагрітого теплоносія, приймаємо 50°C;
 $t_0^{\text{п}}$ – розрахункова температура навколишнього середовища, °C; $n = 0$ – для низькотемпературних систем тепlopостачання.

Розраховані значення температури теплоносія, що подається в систему тепlopостачання наведені в табл. 2.

Таблиця 2

Розраховані значення t_k

$t_0, ^\circ\text{C}$	-10	-5	0	5	10	15
$t_k, ^\circ\text{C}$	49	46	40	36	33	28

З урахуванням формул (2) – (7) вираз (1) для визначення питомих сумарних витрат енергії на систему тепlopостачання приймає вигляд:

$$l_{\text{тп}} = \frac{1}{COP} \left[1 + \frac{\Delta p / \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} (COP - 1)}{(t_0 - t_{\text{вих.в}}) \cdot \eta_{\text{в}} \cdot \eta_{\text{пр}}} \right]. \quad (10)$$

Таким чином, питомі витрати енергії на тепlopостачання залежать від $t_0, t_{\text{вих.в}}, \Delta p / \eta_{\text{п}} c_{\text{п}}$.

Питомі сумарні витрати енергії на систему тепlopостачання розраховані за формулою (10) становлять

$$l_{\text{тп}} = \frac{1}{3,5} \left[1 + \frac{0,5 \cdot (3,5 - 1)}{(-15 - (-21)) \cdot 0,8 \cdot 0,95} \right] = 0,36.$$

Проведемо дослідження термодинамічної ефективності повітряного ТН при різних значеннях температури зовнішнього джерела теплоти – повітря табл. 3.

Таблиця 3

Термодинамічний розрахунок ТН «повітря-вода»

Параметр	Розмірність	Розрахункові значення
Температура випаровування пропану, $T_{\text{в}}$	К	276
Тиск пропану у випарнику, $p_{\text{в}}$	МПа	0,45
Температура конденсації пропану, $T_{\text{к}}$	К	342
Ентальпія пропану після конденсатора, h_3	кДж/кг	210
Тиск конденсації пропану, $P_{\text{к}}$	МПа	2,70
Ентальпія пропану на вході в компресор, h_1	кДж/кг	538
Ентальпія пропану після компресора, h_2	кДж/кг	654
Ентальпія пропану перед випарником, h_4	кДж/кг	210
Питоме теплове навантаження випарника, $q_{\text{в}}$	кДж/кг	328
Питоме теплове навантаження конденсатора, $q_{\text{к}}$	кДж/кг	444
Робота стиснення в компресорі, $l_{\text{ст}}$	кДж/кг	116
Перевірка теплового балансу ТН, $q_{\text{тб.тн}}$	-	444
Коефіцієнт перетворення теплоти, COP	-	3,62
Ексергетичний ККД ТН, $\eta_{\text{ек}}$	-	0,40

Аналіз енергоефективності повітряного ТН «повітря-вода», проводився для робочого тіла холодоагента пропану. Для пропану температура випаровування становить $t_v = 3\text{ }^\circ\text{C}$, а конденсації – $t_k = 69\text{ }^\circ\text{C}$. Вибираємо низькопотенційне джерело теплоти – повітря, на вході у випарник має температуру $t'_{\text{нт}} = 10\dots 18\text{ }^\circ\text{C}$, а на виході з нього $t''_{\text{нт}} = 5\dots 10\text{ }^\circ\text{C}$. Температура мережевої води (теплоносія) на вході в конденсатор становить $t'_{\text{мв}} = 30\text{ }^\circ\text{C}$, а на виході з нього – $t''_{\text{мв}} = 53\text{ }^\circ\text{C}$. [26, 28, 30].

Таким чином, визначені питомі сумарні витрати енергії на систему теплопостачання підприємств агропромислового виробництва, ефективність повітряного теплового насоса за допомогою коефіцієнта трансформації ТН, а також температуру теплоносія, що подається в систему теплопостачання та температуру повітря на виході з випарника теплового насоса.

Ефективність роботи повітряних теплових насосів визначається наступними факторами: температурним режимом роботи, коефіцієнтом перетворення теплового насоса COP, видом холодоагента, вартістю електричної енергії, яка витрачається на привід компресора та роботу вентилятора.

Висновки

1. Використання ТН для теплопостачання є перспективним напрямком використання альтернативних природних низькопотенційних джерел енергії для забезпечення потреб систем теплопостачання, вентиляції та гарячого водопостачання підприємств агропромислового виробництва, але даний процес суттєво залежить від місцезнаходження об'єкта та наявності доступу до певного оптимального для нього джерела низькопотенційної теплової енергії.

2. Повітряні ТН покривають теплове навантаження підприємств агропромислового виробництва в певних межах. Необхідно поєднувати їх експлуатацію з додатковим джерелом теплоти: електричним, газовим або твердопаливним котлом, які будуть вмикатися при досягненні вуличної температури певного критичного значення (точки бівалентності).

3. Ефективним джерелом низькопотенційної теплової енергії є безкоштовна теплота повітря, при цьому коефіцієнт перетворення повітряного ТН за розрахунками становить 3,62, а ексергетичний коефіцієнт корисної дії 40 %.

Список літератури:

1. Безродний М. К., Притула Н. О. Термодинамічна ефективність теплонасосних схем теплопостачання. // *Вісник Вінницького національного технічного університету*. 2013. № 3. С. 39-45.
2. Безродний М. К., Галан М. А. Термодинамічна ефективність теплонасосних систем повітряного опалення. // *Наукові вісті НТТУ «КПІ»*. 2011. № 6. С. 30-35.
3. Босий М. В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання агропромислових підприємств. // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. 2022. випуск № 2 (48). С. 3-8.
4. Маляренко В. А., Лисак Л. В. Енергетика, довкілля, енергозбереження. Х: Рубікон. 2004. 368 с.
5. Безродний М. К., Пуховий І. І., Кутра Д. С. Теплові насоси та їх використання. Навчальний посібник. Київ: НТУУ «КПІ». 2013. 312 с.
6. Остапенко О. П. Холодильна техніка і технологія. Теплові насоси. Навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2015. 123 с.
7. Арсенев В. М., Мелейчук С. С. Теплові насоси: основи теорії і розрахунку. Навчальний посібник. Суми: СДУ. 2018. 364 с.
8. Арсенев В. М. Теплонасосна технологія енергозбереження. Теплонасосна технологія енергозбереження. Суми: Вид-во. СДУ. 2009. 251 с.
9. Босий М. В., Кузик О. В. Теплові насоси для опалення та гарячого водопостачання. Результати сучасних інженерних досліджень і розробок: Наукова монографія. Рига. Латвія: «Baltija Publishing». 2022. С. 24-40. URL:<http://baltijapublishing.lv/omp/index.php/bp/catalog/book/217>
10. Писарев В. Є. Теплові насоси та холодильні установки. Навчальний посібник. К: КНУБА. 2002. 124 с.
11. Снежкін Ю.С. Ф., Чалаєв Д. М., Шаврін В. С., Дабіжа Н. О. Теплові насоси в системах теплохолодопостачання. Під. ред. акад. НАН України А.А. Долинського. НАН України, Інститут технічної теплофізики. 2008. 104 с.
12. Безродний М. К., Притула Н. О. Енергоефективність теплонасосних схем теплопостачання. Монографія. К: НТУУ «КПІ». 2012. 208 с.
13. Шевель В. И. Работа компрессоров серийного исполнения на смеси пропан-бутан в теплонасосном режиме работы. // *Компрессорная техника и пневматика в XXI веке: XIII Международная научно-техническая конференция по компрессоростроению*. Сумы: СумГУ. 2004. С. 239-244.

14. Хмельнюк М. Г., Мартинюк М. О. Підвищення ефективності установки низькотемпературної конденсації природного газу. Одеса: ОДАХ. *Технічні газети*. 2008. № 4. С. 30-35.
15. Босий М. В., Кузик О. В. Ефективність циклу теплового насоса для теплопостачання. // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. № 3(34). 2020. С. 136-142. URL: <http://dspace.kntu.kr.ua/jspui/handle/123456789/10447>.
16. Босий М. В. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса на ґрунтових водах. *Moderní aspekty vědy: XX. Díl mezinárodní kolektivní monografie. Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Видавнича група. «Vědecká perspektiva»*. 2022. С. 556-568. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html.
17. Босий М. В. Теплові насоси – енергоефективне відновлювальне екологічно чисто джерело теплоти. *Moderní aspekty vědy: XXI Díl mezinárodní kolektivní monografie Mezinárodní Ekonomický Institut s.r.o. Česká republika: Видавнича група. "Vědecká perspektiva"*. 2022. С. 357-380. URL: <http://perspectives.pp.ua/public/site/mono/monography-21.pdf>
18. Морозюк Т. В. Теория холодильных машин и тепловых насосов. Одесса: Студия «Негоциант». 2006. 712 с.
19. Ткаченко С. І., Остапенко О. П. Парокомпресійні теплонасосні установки в системах теплопостачання. Монографія. Вінниця: ВНТУ. 2009. 176 с.
20. Арсенев В. М., Гречаненко В. А. Ексергетична оцінка ефективності теплонасосної технології енергозбереження. // *Вісник СумДУ*. № 9 (42). 2002. С. 81-85.
21. Сірко З. С., Коренда В. А., Вишняков І. Ю., Протасов О. С., Охріменко С. М., Цірен Н. Л. Використання теплових насосів для опалення та гарячого водопостачання будівель підприємств на прикладі установок Геліотерм. // *Наукові доповіді НУБіП України. Технологія та енергетика сільськогосподарської промисловості*. 2020. № 5 (87).
22. Босий М. В., Кропівний В. М., Кузик О. В., Кропівна А. В., Молокост Л. А. Термодинамічна енергоефективність парокомпресійного теплового насоса на ґрунтових водах. // *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. Кропивницький. № 5(36). 2022. С. 47-54. URL: http://mapiea.kntu.kr.ua/archive/36_I.html
23. Босий М. В., Кропівний В. М., Кузик О. В. Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «ґрунт-вода» для системи опалення приміщення. // *Науковий журнал Вісник Кременчуцького національного університету імені М.Остроградського*. Кременчук: № 1(132). 2022. С. 165-172. URL: <http://visnikkrnu.kdu.edu.ua/pravila.php>.
24. Босий М. В. Енергетична ефективність повітряного теплового насоса на екологічно чистому робочому тілі пропану. // *Науковий журнал «Вчені записки Таврського національного університету імені В.І.Вернадського»*. Серія: *Технічні науки*. Київ: Т. 33 (72). № 4. 2022. С. 144-148. DOI: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/22>. URL: <https://tech.vernadskyjournals.in.ua/33-72-4>
25. Босий М. В., Лисенко А. Я., Мануйлович В. В., Панішко О. В. Ефективність циклу геотермального теплового насоса. V Міжнародна науково-практична конференція «Актуальні проблеми сучасної науки, суспільства та освіти» (28-30 листопада) *НВЦ «Sci-conf.com.ua»*. Харків, Україна. 2021. С. 418-422. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/TOPICAL-ISSUES-OF-MODERN-SCIENCE-SOCIETY-AND-EDUCATION-28-30.11.21.pdf>
26. Босий М. В., Лисенко А. Я., Мануйлович В. В., Баркар М. М. Термодинамічна енергоефективність геотермального теплового насоса «вода-вода». 3-я Міжнародна науково-практична конференція «Сучасна наука: інновації та перспективи» (5-7 грудня) *SSPG Publish*, Стокгольм, Швеція. ISBN 978-91-87224-02-7. 2021. 1036 с. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/MODERN-SCIENCE-INNOVATIONS-AND-PROSPECTS-5-7.12.21.pdf>.
27. Босий М. В., Лисенко А. Я., Мануйлович А. В., Панішко О. В., Баркар М. М. Геотермальний тепловий насос «ґрунт-вода». 2-га Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні дослідження у світовій науці» (15-17 травня) *НВЦ «Sci-conf.com.ua»*. Львів, Україна. ISBN 978-966-8219-86-3. 2022. С. 406-413. URL: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/05/MODERN-RESEARCH-IN-WORLD-SCIENCE-15-17.05.22.pdf>.
28. Босий М. В., Боса О. А., Лисенко Ю. А. Я., Мануйлович В. В., Бельченков Є. В., Шевченко О. А., Герасименко І. О. Термодинамічне дослідження циклу теплового насоса «ґрунт-вода». XI Міжнародна науково-практична конференція «Євразійські наукові дискусії» (21-23 листопада) *Barca Academy Publishing*, Барселона, Іспанія. 2022. С. 97-103. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/EURASIAN-SCIENTIFIC-DISCUSSIONS-21-23.11.22.pdf>
29. Босий М. В., Боса О. А., Лисенко А. Я., Мануйлович А. А. В., Бельченков Є. В., Ботнарченко В. О., Авраменко Є. В. Тепловий насос «ґрунт-вода». 3-я Міжнародна науково-практична конференція «Наука і технології: проблеми, перспективи та інновації» (14-16 грудня 2022 р.) *CPN Publishing Group*, Осака, Японія. С. 163-168.

30. Босий М. В., Боса О. А., Лисенко А. Я., Мануйлович А. В., Бельченков С. В., Шевченко О. А., Герасименко І. О. Енергоефективність циклу теплового насоса «грунт-вода». І Міжнародна науково-практична конференція «Наукові дослідження в сучасному світі» (9-11 листопада) *Perfect Publishing*, Торонто, Канада. 2022. С. 303-309. <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2022/11/SCIENTIFIC-RESEARCH-IN-THE-MODERN-WORLD-9-11.11.22.pdf>

Bosyi M.V., Bosa O.A., Botnarenko V.O., Gerasymenko I.O. ASSESSMENT OF THE EFFICIENCY OF USING THE STEAM COMPRESSION CYCLE OF THE AIR HEAT PUMP IN AGRICULTURAL PRODUCTION

Currently, the changes taking place in the agro-industrial production of agriculture in Ukraine require the development and creation of modern heat pump technologies for heat and hot water supply of agro-industrial enterprises. The article examines the problem of using an air heat pump (TN) operating on alternative energy sources for heat and hot water supply of agricultural enterprises. In its work, the air TN uses the low-potential heat of the air. The purpose of the work is to evaluate the efficiency of using the steam compression cycle of air TN in agro-industrial production. The analysis of the characteristics was performed and the peculiarities of the operation of air TN for agro-industrial enterprises were evaluated. Factors affecting the energy efficiency of air heating are determined. The influence of the duration of air temperatures of different values on the heat productivity of air TN was analyzed. In order to increase the efficiency of the heat pump system, a scheme for the selection of low-potential heat using air TN is proposed. On the basis of the conducted research, it was established that the advantage of air as a heat carrier is that air heaters can work almost everywhere and do not require the arrangement of a low-temperature circuit. A promising method of increasing the efficiency of heat supply equipment of agro-industrial enterprises is the use of air heating during the annual cycle of its operation. Air TNs have a significant advantage over other thermal power plants. They consume energy from renewable sources, reduce electricity costs by more than half - it is a fully automated device. The use of air TNs for the disposal of low-potential heat flows is economically beneficial. The analysis of the efficiency of heat supply systems shows that in modern economic conditions, the trend of heat supply systems can develop with the use of vapor compression air heating systems, this can significantly improve the economic and technical characteristics of heat supply equipment for buildings of agro-industrial production.

Key words: *air heat pump, enterprises of agro-industrial production, low-potential heat source, heat supply systems, transformation coefficient, exergetic efficiency coefficient.*

Босий М.В.

Центральноукраїнський національний технічний університет

ТЕОРЕТИЧНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ШВИДКОСТІ ДИСОЦІАЦІЇ ГАЗОГІДРАТУ МЕТАНУ

Нині Україна вкрай зацікавлена в розвитку газогідратних технологій. Видобування метану з природних газових гідратів дасть змогу замінити значну частину імпорту природного газу, а в подальшому – відмовитися від нього взагалі. Транспортування природного газу у вигляді газогідратів також є актуальним, як альтернатива його перевезенню у зрідженому (скрапленому) стані. У результаті досліджень, здійснених у 1990-х роках Інститутом геологічних наук НАН України, у Чорному морі було виявлено три зони гідратоутворення із запасами, загальні обсяги яких оцінюються в 50–60 трлн. м³ метану. Натепер газогідрати метану – це альтернатива всім існуючим природним органічним енергоресурсам. У даній статті розглядається проблема визначення швидкості дисоціації газогідрату метану на газ і воду. Натепер відсутні дані і повне розуміння фізичних процесів дисоціації газогідрату метану при стискуванні природного газу, особливо метану, в теплотехнологічних системах та установках, в яких застосовується газогідратна технологія. Особливістю даної задачі є змінний розмір області, в якій досліджується процес дисоціації газогідрату метану на поверхні розділу фаз «гідрат – газ+рідина». Тому, вивчення поведінки процесу дисоціації газогідрату метану на поверхні розділу фаз «гідрат – газ+рідина» з часом в реакторі циліндричної форми і складає основну мету задачі. Загальні аналітичні рішення цієї задачі при довільній області дисоціації газогідратів і різних температурних режимах на границі розділу фаз «гідрат – газ+рідина» не відомі. А розробка моделювання процесу дисоціації газогідрату метану є актуальною науковою проблемою. Запропонована і побудована спрощена теоретична модель, яка описує процес дисоціації газогідрату метану та визначено швидкість дисоціації газогідрату метану $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_{\text{гідрат}}$ в реакторі. Показано, що дана модель, хоча із припущеннями, достанько добре описує процес дисоціації газогідрату метану на поверхні розділу фаз «гідрат – газ+рідина» в реакторі. Приведені рівняння, за якими визначається швидкість дисоціації твердого тіла газогідрату метану. Таким чином, за допомогою математичного моделювання з використанням диференціального рівняння одержано розрахункові дані по швидкості дисоціації газогідратів метану в умовах фазоперехідних процесів на поверхні розділу фаз «гідрат – газ+рідина». Показано, що ця модель, хоча із припущеннями, достанько добре описує процес дисоціації газогідрату метану в реакторі. Розрахована швидкість дисоціації газогідрату метану розміром $R = 200$ мкм в реакторі становить $r_0 = 1,5 \cdot 10^{-8}$ кг/с.

Ключові слова: газогідрат метану, моделювання, процес дисоціації, теплота фазового перетворення, температура дисоціації газогідрату.

Постановка проблеми. З метою розробки ефективних технологій транспортування, зберігання газів в газогідратному стані, стискування та акумулювання газу для підвищення тиску газу в теплотехнологічних системах, необхідно створення наукових основ управління процесом дисоціації газогідратів. Важливим є опис механізму дисоціації газогідратів, що дозволяє розвивати і розробляти газогідратні технології, пропонувати нові методики дослідження фазовоперехідних процесів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Газові гідрати або клатрати – кристалічні сполуки, що утворюються при певних термодинамічних умовах з води і газу. До них належить і газогідрат метану [1-4].

На рис. 1 наведено схематичне зображення структури газогідрату. Розмір кристалів газогідрату в залежності від умов утворення і агенту, який використовується, складає 10...200 мкм [3].



Рис. 1. Схематичне зображення структури газогідрату

Термобаричні умови процесів утворення, зберігання і плавлення газогідратів є досить

«м'якими», що дозволяє їх ефективно використовувати в різних технологічних напрямках виробництва. В газогідратах дві і більше речовини пов'язані між собою не за допомогою хімічного (водневого) зв'язку, а шляхом включення молекул одного компонента в решітку іншого. Газогідрат являє собою твердий розчин «другорядних» молекул гідратоутворюючої речовини в кристалічній решітці «основних» молекул – молекул води [2].

В роботах [1-5, 10-14] описані властивості газових гідратів, основні умови і закономірності їх утворення і дисоціації, представлені механізми утворення газових гідратів і типи їх кристалізації. Велика увага приділяється фізико-хімічним методам вивчення як штучно отриманих, так і природних газових гідратів.

Газогідрати можуть утворюватись і стабільно існувати в широкому інтервалі тисків і температур (для метану від $2 \cdot 10^{-8}$ до $2 \cdot 10^3$ МПа при температурі від 70 до 350 К). Процес утворення газогідрату відбувається з виділенням теплоти, а його дисоціація з поглинанням теплоти. Теплота дисоціації газогідрату метану $(CH_4 \cdot 6H_2O)_{\text{гідрат}}$ на газ і рідку воду складає 54,2 кДж/моль [4].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження процесу дисоціації газогідрату метану і визначення швидкості його дисоціації.

Виклад основного матеріалу дослідження. Дисоціації газових гідратів є складним процесом і залежить від термобаричного і фазового стану середовища, яке оточує газогідрат. Лімітуючою стадією процесу дисоціації газогідрату є тепло-і масообмін [6-9, 10-12].

Фізичний зміст процесу дисоціації газогідрату метану при певних термобаричних умовах наступний. При підведенні до поверхні кристала газогідрату теплоти через деякий проміжок часу dt шар, який складається з висококонцентрованої гідратоутворюючої фази та дрібних включень, перетворюється в рухомий шар з частинок гідратоутворюючої речовини метану і рідкої фази води, тобто маємо двошарове середовище, одна із меж якого є рухомою – це плівка води, що стікає з поверхні газогідрату. Ця плівка буде сприяти теплопередачі до частинки газогідрату від зовнішнього середовища. Процес дисоціації частинки газогідрату метану в реакторі може відбуватись на поверхні фазових переходів, як приведено за формулою [6-9, 11, 12].



Практичний інтерес являє розробка моделі для дисоціації газогідрату метану в реакторі «кристалізатор-плавитель».

Як правило такі моделі будуються з припущенням, що лімітуючою стадією процесу дисоціації газогідрату метану є тепломасообмін.

Газ, який виділяється на границі розділу фаз «газ–вода», не впливає на тепловіддачу, а виноситься потоком рідини. Вода при виділенні із газогідрату має температуру поверхні газогідрату і не впливає на теплообмін. Газогідрат являє собою тверду фазу і конвекція в середині частинки відсутня [6-9].

Швидкість дисоціації газогідрату метану визначаємо з теплового балансу. Рівняння теплового балансу для процесу дисоціації частинки газогідрату метану в реакторі наступне.

$$\delta Q_p^{ct} = \delta Q_d^{tr} \quad (2)$$

де δQ_p^{ct} – теплота, яка передається від стінки реактора до газогідрату через рідину, кДж;
 δQ_d^{tr} – теплота, яка йде на дисоціацію газогідрату, кДж.

Дисоціація газогідрату метану в замкненому об'ємі реактора «кристалізатор-плавитель» відбувається для умов, що газогідрат, який дисоціює є «тонким» тілом, тобто в нього коефіцієнт теплопровідності є низьким і теплота від стінки реактора до газогідрату передається згідно із законом Ньютона-Ріхмана при сталій температурі стінки реактора.

В момент часу τ від початку дисоціації за проміжок часу $d\tau$ від стінки реактора до газогідрату буде передано теплоти

$$\delta Q_p^{ct} = \alpha (T_{ct} - T_{tr}) \cdot F \cdot d\tau \quad (3)$$

де α – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора до газогідрату метану, Вт/м²·К;
 T_{ct}, T_{tr} – температура стінки реактора і поверхні газогідрату, К;
 F – теплосприймаюча поверхня газогідрату, м².

Теплота δQ_d^{tr} піде на дисоціацію газогідрату на dT_d

$$\delta Q_d^{tr} = \delta Q_{пл}^{tr} = \Delta H_d \cdot dm \quad (4)$$

де $\delta Q_{пл}^{tr}$ – теплота плавлення газогідрату метану, кДж; ΔH_d – прихована теплота фазового переходу дисоціації газогідрату метану, кДж/кг; dm – маса газогідрату метану, кг.

Прирівнявши праві частини рівняння (3) і (4) одержуємо диференціальне рівняння процесу, яке пов'язує між собою дві змінні величини – час дисоціації і масу газогідрату метану

$$\alpha (T_{ct} - T_{tr}) F d\tau = \Delta H_d \cdot dm \quad (5)$$

Рівняння (5) розв'язуємо методом відокремлення змінних

$$r_d = \frac{dm}{d\tau} = \frac{\alpha \cdot F}{\Delta H_d} (T_{cm} - T_{nz}) \quad (6)$$

де $dm/d\tau = r_d$ – швидкість дисоціації газогідрату метану, кг/с.

На рис. 2 показано стан дисоціації газогідрату метану в момент часу t .

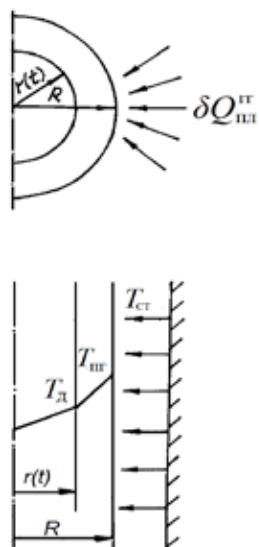


Рис. 2. Модель теплообміну при дисоціації газогідрату метану в реакторі

$R(t)$ – радіус газогідрату метану, який змінюється з часом t ; $r(t)$ – радіус фронту дисоціації газогідрату метану; T_d – температура дисоціації газогідрату метану, К

При виведенні рівняння для визначення швидкості дисоціації газогідрату $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_{\text{гідрат}}$ використовуємо модель теплообміну його дисоціації (рис. 2).

Аналіз результатів розрахунку: за допомогою рівняння (6) розраховуємо швидкість дисоціації кристалогідратів $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_{\text{гідрат}}$ розміром 200 мкм. Теплофізичні властивості газогідрату метану взяті за даними [1-4]:

При виведенні рівняння для визначення швидкості дисоціації газогідрату $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_{\text{гідрат}}$ використовуємо модель теплообміну його дисоціації (рис. 2).

Аналіз результатів розрахунку: за допомогою рівняння (6) розраховуємо швидкість дисоціації кристалогідратів $(\text{CH}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})_{\text{гідрат}}$ розміром

200 мкм. Теплофізичні властивості газогідрату метану взяті за даними [1-4]:

$\lambda_r = 0,55$ – коефіцієнт теплопровідності газогідрату метану, Вт/м·К;

$\rho_r = 910$ – густина газогідрату метану, кг/м³;

$\Delta H_d = 443$ – прихована теплота дисоціації газогідрату метану, кДж/кг;

$\alpha = 2961$ – ефективний коефіцієнт тепловіддачі від стінки реактора до газогідрату метану, Вт/м²·К [10];

$\alpha = 4$ – коефіцієнт тепловіддачі газогідрату, Вт/м²·К [8];

$T_{\text{ст}} = 298$ – температура стінки кристалізатора, К;

$T_d = 293$ – температура дисоціації газогідрату метану, К;

$R = 200$ – розмір кристалогідратів метану, мкм;

Модель теплообміну для дисоціації газогідрату метану коректно відображає фізичні процеси його дисоціації. Вона враховує зміну теплофізичних характеристик газогідрату метану, зміну розміру шару газогідратів метану, теплообмінні процеси на границі дисоціації газогідрату метану та фазо-оперехідні процеси газогідрату метану.

Висновки

1. Таким чином, за допомогою моделювання отримано рівняння, за яким визначається швидкість дисоціації газогідрату метану. Дану методику можна використовувати для оцінки термодинамічних параметрів процесів дисоціації інших газогідратів.

2. Розрахована швидкість дисоціації газогідрату метану розміром $R = 200$ мкм в реакторі становить $r_d = 1,5 \cdot 10^{-8}$ кг/с. На підставі отриманих результатів можна стверджувати, що вони задовільно узгоджуються з експериментальними даними.

3. Наукове дослідження швидкості дисоціації газогідрату метану полягає в тому, що його результати можуть бути використані і для практичних розрахунків інших газогідратів та для розробки і створення газогідратних пристроїв.

Список літератури:

1. Бык С.Ш., Фомина В.И. Газовые гидраты. М. 1970. 128 с.
2. Бык С.Ш., Макогон Ю.Ф., Фомина В.И. Газовые гидраты. М: Химия. 1980. 250 с.
3. Макогон Ю.Ф. Гидраты природных газов / Макогон Ю.Ф. М: Недра. 1974. 208 с.
4. Макогон Ю.Ф. Газогидраты, история изучения и перспективы освоения / Макогон Ю.Ф. // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. 2010. № 2. С. 5-21.
5. Павленко А.М., Кутний Б.А., Абдуллах Н.М. Аналіз умов утворення і дисоціації газових гідратів. // Вісник Приазовського державного технічного університету. Маріуполь, 2017. Вип. 34. С. 60–68.
6. Слепцов С.Д., Донцов В.Е. Разложения одиночной частицы газового гидрата в воде за волной разрежения. // Современная наука: исследования, идеи, результаты, технологии. Сборник научных статей. Киев: НПВК "Триакон" 2010. Вып. №1(3). С. 138-143.
7. Слепцов С.Д., Донцов В.Е. Моделирование процесса разложения одиночной частицы газового гидрата в воде за фронтом ударной волны. // Теплофизика и аэромеханика. 2010. Т.17. N 3. С. 401-407.

8. Донской И.Г., Мисюра С.Я. Модель диссоциации частицы газового гидрата с учетом фильтрации метана в порах оболочки льда. // *Современная наука исследования, идеи, результаты, технологии*. Киев: НПБК «Триакон»-2015. Вып № 1(16). С. 241-245.

9. Тазетдинов Б.И. О теории разложения метастабильного газогидрата при положительной температуре. // *Многофазные системы. Труды Института механики УНЦ РАН*. 2012. Выпуск № 9. С. 147-148.

10. Кутний Б.А. Розвиток теорії тепломасообмінних процесів при кристалізації та дисоціації газових гідратів: автореф. дис. докт. техн. наук: 05.14.06. Харків. 2021. 34 с.

11. Kim H.C., Bishnoi P.R., Heidemann R.A., Rizvi P.H. Kinetics of methane hydrate decomposition. // *Chemical Engineering Science*. 1987. V. 42. №. 7. P. 1645-1653.

12. Шостак Н.А. Моделирование образования и диссоциации гидратов при разработке и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений: автореф. дис. канд. техн. наук: 25.00.17. Краснодар. 2014. 23 с.

13. Сукманова Е.Н. Математическое моделирование процесса термической диссоциации газовых гидратов: автореф. дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.10. Ин-т нефтегаз. геол. и геофизики СО РАН. Новосибирск. 2013. 16 с.

14. Фатыхов М.А., Багаутдинов Н.Я. Экспериментальные исследования разложения газогидрата в трубе при сверхвысокочастотном электромагнитном воздействии. *ТВТ*. 2005. Т. 43, N 4. С. 612-617.

Bosyi M.V. NUMERICAL METHOD OF DETERMINING THE RATE OF DISSOCIATION OF METHANE GAS HYDRATE

Currently, Ukraine is extremely interested in the development of gas hydrate technologies. The extraction of methane from natural gas hydrates will make it possible to replace a significant part of the import of natural gas, and in the future - to abandon it altogether. Transportation of natural gas in the form of gas hydrates is also relevant as an alternative to its transportation in a liquefied (liquefied) state. As a result of research carried out in the 1990s by the Institute of Geological Sciences of the National Academy of Sciences of Ukraine, three zones of hydrate formation with reserves were discovered in the Black Sea, the total volume of which is estimated at 50–60 trillion. m³ of methane. Currently, methane gas hydrates are an alternative to all existing natural organic energy resources. This article considers the problem of determining the rate of dissociation of methane gas hydrate into gas and water. Currently, there is no data and a complete understanding of the physical processes of dissociation of methane gas hydrate during compression of natural gas, especially methane, in heat-technology systems and installations in which gas hydrate technology is used. The peculiarity of this problem is the variable size of the area in which the process of dissociation of methane gas hydrate at the interface of the "hydrate - gas + liquid" phases is investigated. Therefore, the study of the behavior of the dissociation process of methane gas hydrate at the interface of the "hydrate - gas + liquid" phases over time in a cylindrical reactor is the main goal of the task. General analytical solutions of this problem for an arbitrary area of dissociation of gas hydrates and different temperature regimes at the interface of the "hydrate - gas + liquid" phases are not known. And the development of modeling of the dissociation process of methane gas hydrate is an urgent scientific problem. A simplified theoretical model was proposed and constructed, which describes the process of dissociation of methane gas hydrate, and the rate of dissociation of methane gas hydrate (CH₄·6H₂O)_{hydrate} in the reactor was determined. It is shown that this model, although with assumptions, describes quite well the process of dissociation of methane gas hydrate at the interface of the "hydrate - gas + liquid" phases in the reactor. The equations used to determine the rate of dissociation of a solid body of methane gas hydrate are given. Thus, with the help of mathematical modeling using a differential equation, calculated data on the rate of dissociation of methane gas hydrates in the conditions of phase transition processes at the interface of "hydrate - gas + liquid" phases were obtained. It is shown that this model, although with assumptions, describes the process of dissociation of methane gas hydrate in the reactor quite well. The calculated rate of dissociation of methane gas hydrate with size R = 200 μm in the reactor is $r_d = 1.5 \cdot 10^{-8}$ kg/s.

Key words: methane gas hydrate, modeling, dissociation process, heat of phase transformation, gas hydrate dissociation temperature.

УДК 621.311
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/26>

Вербинець В.М.

ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

Шерстньов Ю.В.

Криворізький національний університет

Сільченко С.А.

ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

Купін А.І.

Криворізький національний університет

Осадчук Ю.Г.

Криворізький національний університет

Савицький О.І.

Криворізький національний університет

АЛГОРИТМ КЕРУВАННЯ ФІЛЬТРО-КОМПЕНСУЮЧИМИ ПРИБОРАМИ ЗА УМОВИ НАЯВНОСТІ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

Метою роботи є обґрунтування, розробка та застосування алгоритму до процесу компенсації реактивної потужності за допомогою фільтро-компенсуючих пристроїв (ФКП) та синхронних двигунів.

Виконано технологічний аудит підвищення ефективності компенсаційних пристроїв підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. Проведено лабораторні експериментальні дослідження, електронне моделювання, а також теоретичний аналіз та узагальнення результатів досліджень за стандартними та новими методиками. В результаті проведено розрахунки ефективності використання запропонованого алгоритму керування ФКП та синхронними двигунами (СД), визначений економічний ефект від запропонованого рішення.

Виконано розрахунки та статистично обґрунтовано вибір рівнів компенсації за допомогою конденсаторних установок ФКП. Запропоновані методи корекції параметрів потужності ФКП, які забезпечують мінімальну плату підприємства за реактивну потужність з урахуванням реальних добових режимів навантаження споживачів.

Для поліпшення якості параметрів мережі найчастіше застосовуються ФКП, що виконують функцію компенсації реактивної потужності і фільтрації складових гармонійних параметрів електромережі. Синхронні двигуни також використовуються з метою компенсації реактивної потужності, працюючи з випереджаючим $\cos\phi$.

Наведено основні наукові та практичні результати при обґрунтуванні використання алгоритму керування компенсуючими пристроями підстанцій гірничо-збагачувальних комбінатів. В результаті розрахунків за допомогою статистичного аналізу визначено раціональні рівні потужності ступенів компенсуючого пристрою (КП). Обґрунтовано періодичність перевірки необхідності підключення/відключення ступенів КП. Подальші розрахунки встановлюють рівень регулювання струмом збудження для досягнення певного рівня компенсації, який не було забезпечено КП. При цьому використовуючи вказаний алгоритм значно знижується плата підприємства.

Ключові слова: гірничо-збагачувальні комбінати, мережі живлення, якість параметрів електромережі, енергоефективність, фільтро-компенсуючі пристрої, синхронні двигуни, алгоритм.

Постановка проблеми. Сучасні потужні споживачі електроенергії підстанцій гірничо-металургійного комплексу мають часто нелінійне навантаження, що призводить до погіршення якості енергії живлення. Це, в свою чергу, призво-

дить до збільшення втрат за рахунок виникнення вищих гармонійних складових напруги і струму та інших показників. Означене зумовлює збільшення втрат електроенергії та зниження терміну служби обладнання. Також при цьому на підпри-

емство можуть накладатися додаткова оплата за перевищення показників споживання реактивної потужності.

Для підстанцій, які живлять обладнання, керованих напівпровідниковими перетворювачами і маючих значну споживчу потужність, рекомендовано встановлювати фільтро-компенсуючі пристрої (ФКП). Їх мета – зменшити вплив на живлячу мережу вищих гармонійних складових і підвищити тангенс навантаження об’єкта (на рівні $\text{tg}\varphi < 0,25$ [1]) системи електропостачання за рахунок компенсації реактивної потужності «на місцях» (тобто не брати її з системи).

На рис. 1 представлено типові потоки реактивної енергії на підстанції.

Підприємствам, що мають у активі підстанцій синхронні двигуни (СД), також рекомендують за можливістю впровадити їх у процес компенсації. Для досягнення такої мети потрібно раціонально використовувати вищезгадане обладнання. Тобто розробити оптимальний алгоритм роботи, який дозволить мінімізувати втрати у мережі. З цією метою пропонується наступний алгоритм роботи компенсуючих пристроїв (графічно представлений на рис. 2):

1) Вимірюється або задається Q та гармонійний склад.

2) Перевірка, чи є ФКП? Якщо так – одна ступінь використовується для компенсації гармонійних складових напруги і струму, якщо є потреба у другій ступені – КРМ. Перевіряється:

$$Q_{2\text{ФКП}} < Q,$$

Якщо так – вводиться друга ступінь ФКП, далі перевіряється:

$$Q_{2\text{ФКП}} + Q_{3\text{ФКП}} < Q,$$

вводиться третя ступінь, тощо.

Якщо $Q_{2\text{ФКП}} > Q$ або $Q_{i\text{ФКП}} < Q < Q_{i+1\text{ФКП}}$, то йде регулювання залишку реактивної потужності з компенсації синхронного двигуна:

$$Q - Q_{i\text{ФКП}} \rightarrow Q_{\text{СД комп.}}$$

3) Перевіряється наявність та можливість СД на компенсацію $Q_{\text{СД}}$. Розподіляється між задіяними в компенсації синхронними двигунами.

4) Йде постійна перевірка:

$$Q > Q_{i+1\text{ФКП}} + Q_{i\text{ФКП}},$$

Якщо так, то вводиться $i+1$ ступінь ФКП, при цьому уставка регулюючих СД буде спрямована на наступну величину:

$$Q - Q_{\text{ФКП}} + Q_{i+1\text{ФКП}} = Q_{\text{СД}}$$

$Q_{\text{СД}}$ Розподіляється поміж СД, забезпечуючи $S^*_{i} = \text{const}$.

5) Якщо можливості ФКП вичерпано, то реалізація процесу йде виключно за допомогою синхронних двигунів.

По-перше. Значення $Q_{N\text{ФКП}}$ необхідно забезпечити за рахунок підключення ступенів ФКП, які дискретно забезпечують ступінчасті генеруючі значення реактивної потужності. Ступені ФКП, які залишаються, повинні забезпечувати компенсацію вищих гармонійних складових. Останні вимірюються або попередньо встановлюються по результатам експлуатації тиристорного обладнання. Тобто фільтри налаштовуються на компенсацію необхідних (найвищих за амплітудою) вищих гармонійних складових напруги і струму (наприклад, під номером 3, 5, 7).

По-друге. Синхронні двигуни, працюючи з випереджаючим $\cos \varphi$, можуть генерувати реактивну потужність інших споживачів підстанції

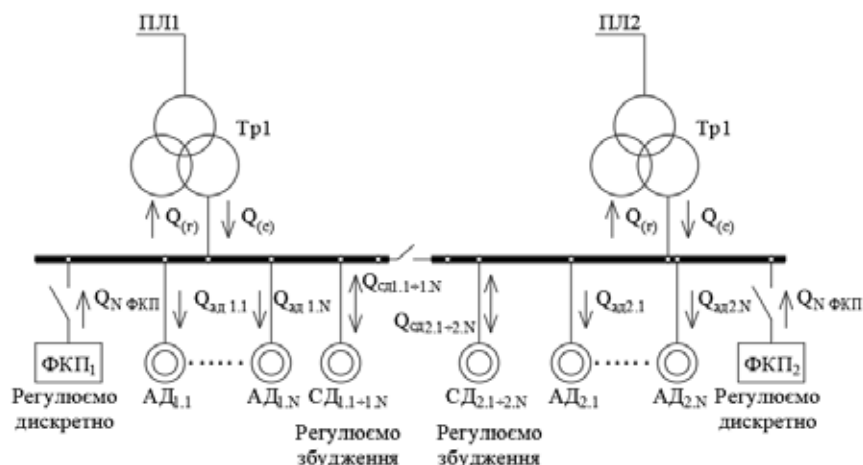


Рис. 1. Потоки реактивної енергії на підстанціях

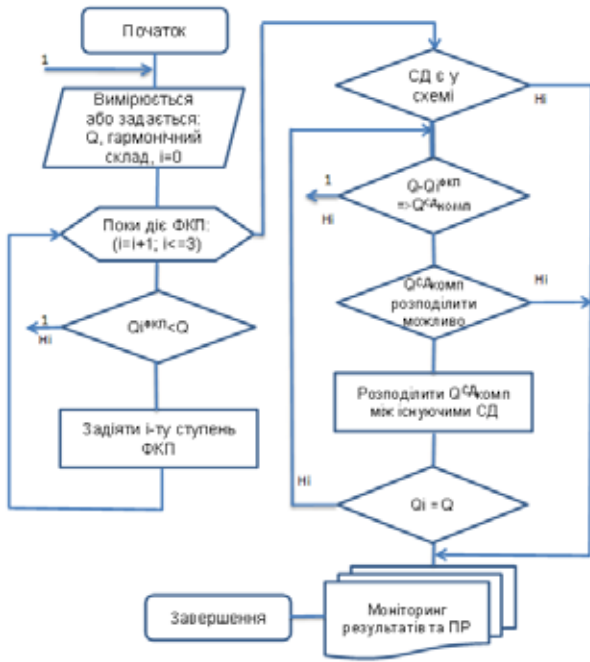


Рис. 2. Алгоритм роботи фільтро-компенсуючих пристроїв підстанцій

(асинхронні двигуни, трансформатори, двигуни постійного струму тощо). Тобто не беручи її з енергосистеми. Виконані науково-дослідницькі роботи дозволили авторам отримати деклараційні патенти [2, 3] на винаходи, які дозволяють раціонально використовувати компенсаційні можливості синхронних двигунів в залежності від значень живлячої напруги, навантаження, температури охолоджуючого повітря, статора ротора, забезпечуючи їх повне завантаження по повній потужності. Тобто пристрої визначають оптимальне значення Q_i для даних умов експлуатації двигуна. При цьому потрібно врахувати і той факт, що завдяки диференційованим тарифам на активну і реактивну потужність, процес компенсації може бути вигідним та нецілодобовим. Таким чином, встановлюючи необхідні для компенсації реактивної потужності значення Q_p (або з датчика реактивної потужності, або з блока задання), ми забезпечуємо пропорційний її розподіл на синхронні двигуни різної номінальної потужності. Це забезпечує їх однакове завантаження по повній потужності з контролем технологічних режимів роботи.

Авторами запропонована структура системи автоматизованого керування (на основі програмованих контролерів) збудженням СД та переключенням ступенів ФКП для компенсації реактивної потужності в середині мережі підприємства [4],

яка реалізована алгоритмом керування (рис. 2). Також функції балансу її потоків між споживачами (двигуни АД, трансформаторами) та від ФКП та СД, напрямки цих потоків показані на рис. 3.

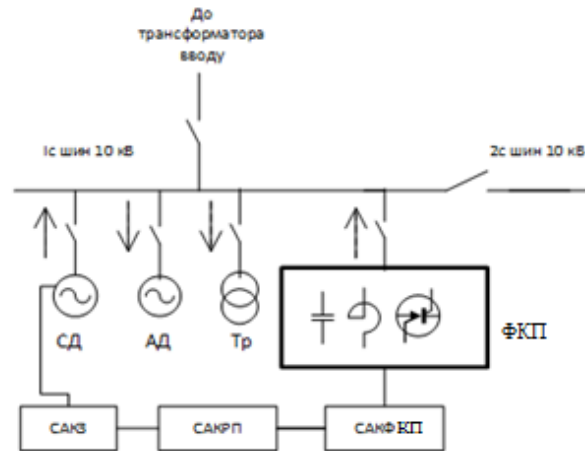


Рис. 3. Структурна схема системи керування реактивною потужністю (САКРП): САКЗ – система автоматичного керування збудженням СД; САКФКП – система автоматичного керування щаблями ФКП

Для достатнього обґрунтування запропонованого алгоритму роботи необхідно спочатку проаналізувати енергетичний стан мережі. На рис. 3 представлений графік споживання електричної енергії однієї з підстанцій ПрАТ «ПівніГЗК» за червень 2019 року та на рис. 4 січень 2019 року відповідно.

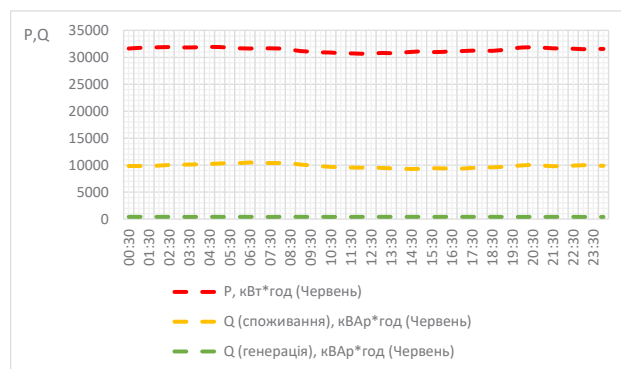


Рис. 4. Споживання активної, реактивної та генерація реактивної потужності за червень 2019 року підстанції ПрАТ «ПівніГЗК»

При цьому значення $\text{tg}\varphi$ за червень знаходилося у межах від 0,28 до 0,31 з середнім значенням 0,3. Мінімальне значення реактивної потужності на підстанції склало 7000 кВАр·год, максимальне – 11300 кВАр·год із середнім значенням у 9800 кВАр·год. Порівняємо зі значенням добової спожитої реактивної потужності за січень (рис. 5).

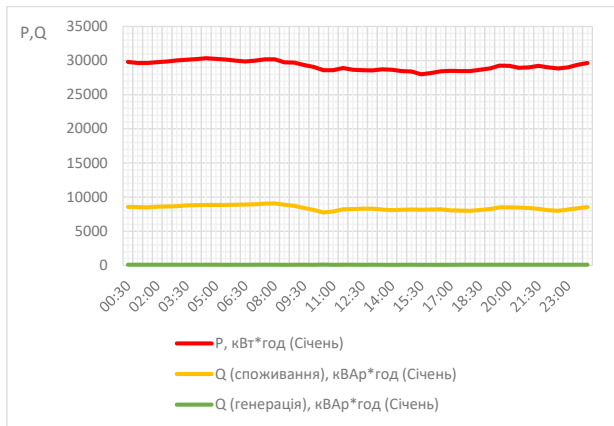


Рис. 5. Споживання активної, реактивної та генерація реактивної потужності за січень 2019 року підстанції ПрАТ «ПівніЗК»

У січні показник $\text{tg}\phi$ знаходився в межах від 0,26 до 0,29 із середнім значенням 0,28. Мінімальне значення реактивної потужності на підстанції склало 4800 кВАр·год, максимальне – 10200 кВАр·год із середнім значенням у 8400 кВАр·год.

Таким чином, показники споживання реактивної потужності за зимовий та літній періоди не знаходяться у нормативних рамках. З метою стимулювання заходів щодо компенсації реактивної потужності на промислових підприємствах запроваджено систему знижок та надбавок до тарифу за електроенергію. Штрафи у вигляді надбавки до тарифу за електроенергію, що сплачуються підприємством за недотримання режиму компенсації, не усувають реальних втрат в електричних мережах, а лише перерозподіляють їхню вартість між енергосистемою та промисловим підприємством. Однак зазначені надбавки до тарифу стимулюють підприємства до вжиття заходів щодо раціональної експлуатації КП. Відповідно, за це при нарахуванні оплати за електроенергію враховується додатковий показник штрафу [1]. Проте, мінімізувавши показник $\text{tg}\phi$, в формулі сплати за реактивну потужність, врахована знижка:

$$П = П_1 + П_2 - П_3,$$

де:

- $П_1$ – основна плата за перетікання реактивної електроенергії, грн;
- $П_2$ – надбавка за недостатнє оснащення електричної мережі споживача засобами КРП, грн;
- $П_3$ – знижка плати у разі залучення споживача до регулювання балансу реактивної потужності (електроенергії), грн.

Отже, власник сплачує не лише за споживання електрообладнанням реактивної потужності (яка в даному випадку може скласти від 12000 грн на

день у зимовий та 14000 грн у літній періоді), а й за додаткові нарахування $П_2$ (які можуть становити від 60 до 90 грн на день).

Виходячи з вищесказаного, першим етапом вирішення задачі це встановлення мінімального рівня компенсації. Алгоритм (рис. 2) в першу чергу враховує компенсаційні потужності конденсаторних установок через те, що в середньому втрати у перерахунку на кВт/кВАр для КП складають 0,002-0,0045 кВт/кВАр. В той же час, як для синхронних двигунів цей показник становить для наших умов та існуючих параметрів 0,013 кВт/кВАр, що відповідає загальним тенденціям оцінки [5]. Тобто більш сприятливим процесом компенсації є залучання в першу чергу саме конденсаторних установок.

Наступним питанням є вибір раціональних рівнів КП. Виходячи з добових даних споживання реактивної потужності, потужність постійної ступені КП становитиме 7500 кВАр. Тобто рівень споживання реактивної потужності нижче за цю величину не є нормальним. Це відбувається лише у випадку відключень потужних споживачів (наприклад, однієї чи двох ліній споживання РЗФ1). Враховуючі те, що в середньому різниця між січнем червнем може доходити до 1000 кВАр·год, пропонується спосіб визначення потужності ступенів за допомогою закону нормального розподілу.

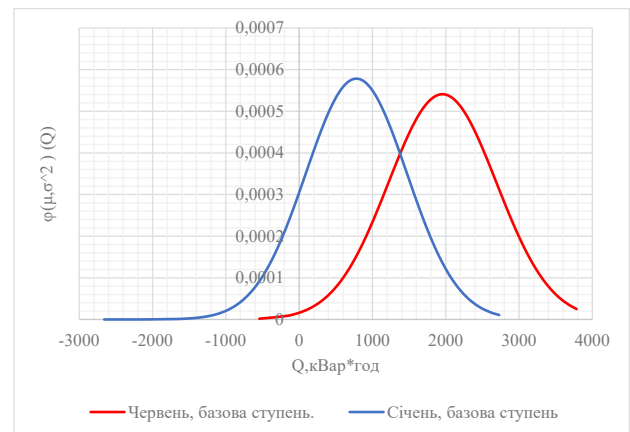


Рис. 6. Закон нормального розподілу балансу реактивної потужності підстанції після впровадження «базової ступені»

Після врахування використання ступені потужністю 7500 кВАр, було складено закон нормального розподілу для балансу реактивної потужності підстанції. З метою подальшого зниження споживання реактивної потужності, за допомогою даного графіку можна розрахувати потужність наступних ступенів. Так, для січня

(синя лінія) найбільш доцільним буде використання ступені потужністю 750кВАр, а для червня (червона лінія) – 2250кВАр. Також, прогнозований баланс реактивної потужності для червня та січня буде знаходитися на одному рівні на значенні 1500кВАр. Проте, щоб не використовувати більш потужні ступені (і тим самим значно збільшувати плату за установки), пропонується використати 3 ступені по 750кВАр. Таким чином, використання останніх дасть змогу більш точно контролювати баланс реактивної потужності на підстанції. Також варто відзначити, що контроль за переключенням КП відбувається на півгодинному інтервалі часу. Такий вибір зумовлено тим, що у випадку меншого часу переключення є ймовірність частих комутацій установок. Це в свою чергу може призвести до скорого виходу з ладу комутаційного або захисного обладнання.

Відповідно до алгоритму, у разі недостатності компенсації реактивної потужності, у процес включаються синхронні двигуни. Наприклад, в даному випадку наявності на підстанції є синхронний двигун з $P_{ном}=2500кВт$. На рис. 7 зображена U-подібна характеристика та відповідний рівень споживаної/генерованої реактивної потужності. Номінальний струм збудження – $I_z=225A$, струм статора – $I_c=281A$. При збільшенні струму збудження знову і збільшується реактивна складова струму статора, але з випереджальною фазою. Синхронний двигун починає працювати генератором реактивної енергії з віддачею в мережу. Відповідно, необхідний струм збудження розраховується з компенсаційних можливостей двигунів, наявних у мережі та кількості двигунів, що можна задіяти у процесі генерації реактивної потужності.

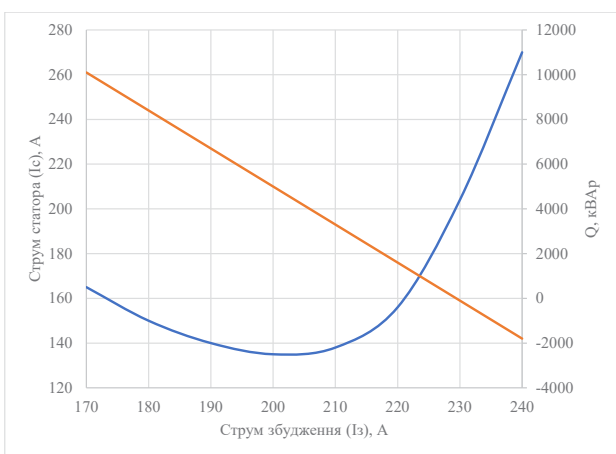


Рис. 7. U-подібна характеристика синхронного двигуна та відповідний рівень споживаної/генерованої реактивної потужності

Відповідно до компенсаційної здатності ступенів КП, для компенсації частки реактивної потужності, яка залишилась, необхідно підвищити струм збудження від номінального значення 225A в середньому на 2,5%.

На рис. 8 та 9 зображено результат процесу роботи алгоритму компенсації реактивної потужності за допомогою КП та СД за добу у січень та червень відповідно.

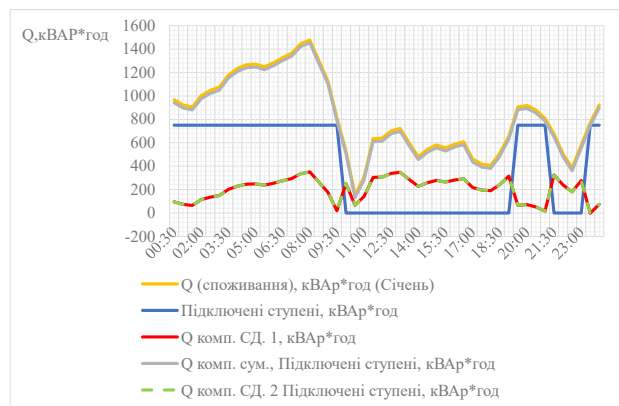


Рис. 8. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Січень

Як видно на рис. 8 та 9, відповідно до алгоритму, потужність генерації за допомогою конденсаторних установок не перевищує потужність споживання. За добу у січні задіяні три ступені (постійна на 750кВАр, та дві по 750кВАр). За добу влітку задіяні три ступені по 750кВАр та постійна на 750кВАр. Залишок реактивної потужності компенсується синхронним двигуном.

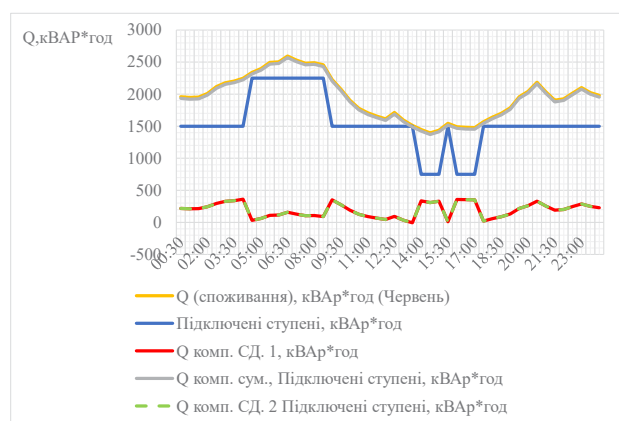


Рис. 9. Компенсації реактивної потужності конденсаторними установками та синхронними двигунами. Червень

Відповідно, на рис. 10 зображено економічний ефект від впровадження алгоритму компенсації реактивної потужності.

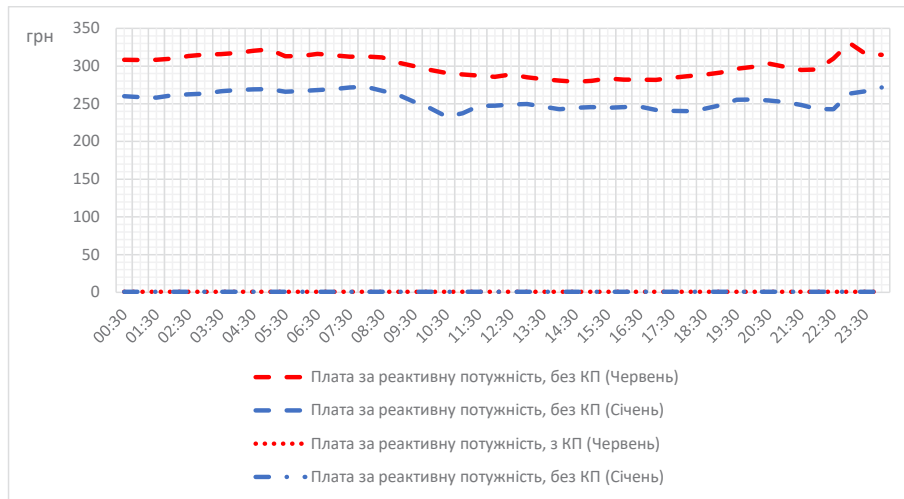


Рис. 10. Економічний ефект сплати за впровадження алгоритму компенсації

Аналізуючи отримані дані, можна сказати що впровадження алгоритму компенсації запропонованим методом дозволить знизити плату за реактивну потужність підприємством з загальною встановленою активною потужністю 283МВт з приблизно 400 тисяч гривень на місяць до однієї тисячі. Звичайно, запропонований метод враховує сплату лише за сплату за реактивної потужності за тарифом. Якщо враховувати термін окупності впровадження, то він буде залежати від багатьох факторів, де одним із головних виступатиме спосіб реалізації даного методу. Тому термін окупності впровадження алгоритму керування КП повинен розраховуватися у індивідуальному порядку.

Перспективні напрями досліджень.

Як варіанти для подальших досліджень у цій темі можливо, наприклад, розглянути необхідність наявності реактивної потужності для збереження ККД трансформаторів.

Висновки:

1. На основі статистичних даних споживання реактивної потужності потужних підстанцій підприємства ПрАТ «ПівніГЗК» було запропоновано методику вибору потужності компенсуючих при-

строїв для забезпечення мінімальної плати підприємства за реактивну потужність.

2. Розроблено алгоритм системи автоматичного керування компенсаційними пристроями (переключенням щаблів ФКП) та регулюванням збудження СД (для компенсації реактивної потужності) в функції балансу її перетоків між споживачами (двигунами постійного струму, асинхронними двигунами, трансформаторами тощо), з контролем технологічних параметрів роботи СД [2].

3. Проведено розрахунки та розглянуті очікувані економічні результати за сплату реактивної потужності після впровадження запропонованого алгоритму.

4. Для типового підприємства, яким є ПівніГЗК з загальною встановленою активною потужністю 283МВт очікуване зменшення плати підприємства за реактивну потужність може складати до 400 тис. грн. за місяць. Термін окупності впровадження запропонованої системи повинен розраховуватися окремо та у індивідуальному порядку, враховуючи різні можливості реалізації алгоритму та зміни розрахунків за активну та реактивну потужність між підприємством та енергосистемою.

Список літератури:

1. Про затвердження Методики обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії: наказ Міністерство енергетики та вугільної промисловості України від 06.02.2018 р. №87
2. Спосіб підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами шляхом регулювання їх реактивної потужності: пат. 141771 Україна: G01N 25/30, G21C 3/40, G01R 15/12. у 2019 10423; заявл. 17.10.2019; опубл. 27.04.2020, Бюл.№8. 11 с.
3. Пристрій для підвищення енергоефективності технічних систем технологічних агрегатів з синхронними приводами: пат. 149078 Україна: E21C 41/00, E21C 41/16 у 2021 02972; заявл. 03.06.2021; опубл. 13.10.2021, Бюл.№41. 10 с.
4. Купін А.І.,Осадчук Ю.Г.,Савицький О.І. Шерстньов Ю.В. (аспірант). До питання керування процесом компенсації реактивної потужності та підвищення якості напруги живлення підстанцій промисло-

вих підприємств. DOI <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.4/23>. Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки. Том 33 (72) № 4 2022. С. 149-159.

5. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности и повышение качества электроэнергии / Ю. С. Железко // М. : Энергоатомиздат, 1985. 224 с.
6. Жежеленко, И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. 5-е изд., перераб. и доп. / И.В. Жежеленко // М.: Энергоатомиздат, 2005. С. 358
7. Железко Ю. С. Выбор мероприятий по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях: руководство для практических расчетов / Ю. С. Железко // М. : Энергоатомиздат, 1989. 176 с.
8. Железко Ю. С. Компенсация реактивной мощности в сложных электрических системах. М.: Электроатомиздат, 1981. 200 с.
9. Железко Ю. С. Новые нормативные документы, определяющие взаимоотношения организаций и покупателей электроэнергии в части условий потребления реактивной мощности / Ю. С. Железко // Электрика. 2008. № 2. С. 3-8.
10. Железко Ю. С. О нормативных документах в области качества электроэнергии и условий потребления реактивной мощности / Ю. С. Железко // Электрические станции. 2002. № 6. С. 18-24.
11. Железко Ю. С., Герман Л. А. Методы учета тяговых сетей электрифицированных железных дорог в системном расчете компенсации реактивной мощности. Промышленная энергетика, 1989, № 11.
12. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии. Руководство для практических расчетов. М.: ЭНАС, 2009. 456 с.
13. Reactive market power analysis using must-run induces. /Feng Donghan, Jin Shong, Gan Deqiang // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. -Vol. 23, № 2. P. 755-765.
14. Aprocurement market model for reactive power services considering system security. / El-Samahy Ismael, Bhattacharya Kankar, Canizares Claudio, Anjos Miguel F., Pan Jiuping // IEEE Transactions on Power Systems. 2008. Vol. 23, № 1. P. 137-149.
15. A novel market-based reactive power management scheme. / Lin X. J., Yu C. W., David A.K., Chung C. Y., Wu H., Hu N. // International Journal of Electrical Power and Energy Systems. 2006. Vol. 28., № 2. P. 127-132.
16. Bornschlegel M., Bregulla M., Franke J. Methods-Energy Measurement – An approach for sustainable energy planning of manufacturing technologies // Journal of Cleaner Production, 2016, Vol. 1351, pp. 644-656.
17. Biel K., Glock C. Systematic literature review of decision support models for energy-efficient production planning // Computers & Industrial Engineering, 2016, Vol. 101, pp. 243-259

Verbynets V.M., Sherstnov Yu.V., Silchenko S.A., Kupin A.I., Osadchuk Yu.G., Savytsky O.I.
CONTROL ALGORITHM OF FILTER-COMPENSATING DEVICES UNDER THE CONDITIONS OF THE PRESENCE OF SYNCHRONOUS MOTORS

The method of work is the justification, development and application of the algorithm to the process of compensation of reactive power with the help of filter-compensating devices (FCD) and synchronous motors.

The technological improvement of the audit efficiency of compensation devices of substations of mining and beneficiation plants was carried out. Laboratory experimental studies, electronic modeling, as well as theoretical analysis and generalization of research results using standard and new methods were carried out. As a result, calculations of the efficiency of using the proposed control algorithm of FCD and synchronous motors (SD) were carried out, and the economic effect of the proposed solution was determined.

Calculations were made and the selection of compensation levels with the help of FCD capacitor units was statistically substantiated. The proposed methods of correction of power parameters of FCD, which ensure the minimum payment of the enterprise for reactive power, taking into account the real daily load regimes of consumers.

To improve the quality of the network parameters, the FCD is changed, which provides the function of reactive power compensation and filtering of complex harmonic parameters of the power network. Synchronous motors are also used with the purpose of reactive power compensation, operating with leading $\cos\varphi$.

The main scientific and practical results for the justification of the use of the algorithm for controlling compensating devices of substations of mining and beneficiation plants are given. As a result of calculations with the help of statistical analysis, rational power levels of the compensation stages of the device (CD) were determined. The time for checking the necessity of connecting/disconnecting CD stages is substantiated. Additional calculations establish the level of adjustment of the excitation flow to achieve a certain level of compensation that was not provided by the KP. At the same time, with the help of the selected algorithm, the company's fee is significantly reduced.

Key words: mining and beneficiation plants, power networks, quality of power grid parameters, energy efficiency, filter-compensating devices, synchronous motors, algorithm.

Кирисов І.Г.

Українська інженерно-педагогічна академія

Михайлов Б.К.

Українська інженерно-педагогічна академія

Лосенко Є.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

ВПЛИВ ЗАТІНЕННЯ ТА ПОШКОДЖЕНЬ СОНЯЧНИХ БАТАРЕЙ НА ЇХ ПАРАМЕТРИ

У статті досліджується вплив затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри. Проаналізовані види та наслідки затінення сонячних батарей. При затіненні знижується генерація електроенергії сонячних елементів, при цьому знижується результуюча потужність всієї сонячної батареї.

Проаналізовані види пошкоджень поверхні сонячних батарей та причини їх виникнення. Пошкодження поверхні сонячної батареї виникають в наслідок екстремальних погодних умов: граду, вітру, температури; виробничого браку; неправильної експлуатації; зношування та деградації сонячних елементів протягом часу.

Проведено аналіз видів деградації сонячних батарей та її наслідки. Деградація виникає внаслідок хімічних реакцій між активними металами у складі сонячної батареї, екстремальних погодних умов: різких перепадів температур, вологості, постійного змерзання або відтавання. Деградація призводить до зменшення провідності струму сонячною батареєю, появи паразитного опору сонячної батареї, виникнення тріщин, мікропор та неоднорідностей на поверхні сонячної батареї.

У статті розглянуті методи виявлення пошкоджень сонячних батарей – метод тепловізійного контролю та метод електролюмінесценції. При використанні методу тепловізійного контролю сонячна батарея досліджується тепловізором, при цьому виявляються ділянки поверхні сонячної батареї які нагріваються. Метод електролюмінесценції полягає у тому, що сонячні елементи, які підключаються до блоку живлення, починають генерувати випромінювання в близькому інфрачервоному діапазоні та за допомогою спеціальної камери, отримуються фотографії сонячної батареї з місцями ушкоджень та тріщин.

Отримано графічні залежності впливу струму короткого замикання та напруги холостого ходу від площі затіненого сонячного елемента. Отримано залежності впливу струму короткого замикання та напруги холостого ходу від площі пошкодженої поверхні сонячного елемента. Визначено, що при затіненні сонячної батареї струм короткого замикання зменшується, а напруга холостого ходу практично не змінюється. Визначено, що при пошкодженні поверхні сонячної батареї струм короткого замикання та напруга холостого ходу зменшуються.

Ключові слова: сонячна батарея, затінення, струм короткого замикання, напруга холостого ходу, потужність, пошкодження сонячної батареї, сонячна енергія, коефіцієнт корисної дії.

Постановка проблеми. На сьогоднішній день дуже багато уваги приділяється альтернативним джерелам енергії, оскільки закінчуються запаси традиційних викопних джерел енергії, а саме вугілля, газу, нафти. У майбутньому видобуток традиційних джерел енергії буде дуже дорогим, через те, що енергетичним компаніям треба буде використовувати більш складніші і дорожчі технології видобутку ресурсів [2]. Враховуючи ці проблеми є актуальним дослідження характеристик та режимів роботи альтернативних джерел енергії. Особливе місце серед альтернативних джерел

енергії займає сонячна енергетика. Сонячна енергія є одним з найдоступнішим джерелом енергії. Саме тому вже зараз можна спостерігати великі фінансові вкладення енергетичних компаній у розвиток сонячної енергетики [5].

Серед основних причин різкого падіння генерації енергії на сонячній станції є затінення та пошкодження сонячних батарей. При цьому далеко не завжди вони можуть бути спричинені втручанням людини, а спричинені впливом навколишнього середовища. До зовнішніх чинників, які можуть створювати затінення, відносяться: заті-

нення хмарами, опалим листям, снігом, пташиний послідом. До зовнішніх природних факторів, які можуть спричинити пошкодження сонячної батареї відносяться: град, підвищена температура, тощо. Дію навколишнього середовища на сонячні батареї неможливо зменшити, оскільки ефективних методів впливу на природні явища не існує. Дослідження впливу затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри є актуальною проблемою, тому що затінення та пошкодження сонячних батарей впливає на вироблення електроенергії сонячною батареєю та знижує їх ККД.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженням впливу затінення та пошкоджень сонячних батарей на їх параметри присвячено багато робіт [3-14]. В роботі [1] досліджується вплив різних параметрів, характеристик та факторів на ефективність та надійність сонячних елементів у складі сонячної батареї. Автори роблять висновок, що такі фактори, як затінення, пошкодження та перегрівання можуть мати критичні наслідки для ефективної роботи сонячних елементів. В роботі [3] розглядається вплив локальних неоднорідностей, мікротріщин та мікропор на стабільність та ефективність роботи сонячних елементів. Автори приходять до висновку, що при розрахунку номінальної потужності та ефективності сонячних елементів потрібно враховувати реальну площу сприймаючої поверхні сонячного елемента. У роботі [7] автори розглядають вплив різної площі затінення на потужність, яку видає сонячна батарея. Автори експериментально підтверджують, що при незначному затіненні потужність сонячної батареї зменшується на 60%, при повному затіненні – на 70%.

Постановка завдання. Метою даної статті є аналіз впливу затінення та пошкоджень поверхні сонячної батареї на її параметри. За допомогою даного дослідження можна оцінити вплив затінення та пошкоджень на параметри сонячної батареї, а саме струм короткого замикання, напруги холостого ходу. При затіненні та пошкодженнях сонячної батареї відбувається зменшення її ККД, що впливає на ефективність її роботи. Тому дослідження впливу затінення та пошкодження сонячних батарей є актуальною проблемою.

Виклад основного матеріалу дослідження. При експлуатації сонячних батарей вони повинні видавати максимальну потужність, для цього їх необхідно розміщувати під певним кутом нахилу, щоб установка знаходилася під прямим та постійним сонячним світлом протягом року [6].

Затінення є однією з основних причин різкого падіння ефективності сонячної батареї [1]. Вини-

кає затінення під час будь-якої перешкоди між сонячним світлом та сонячною батареєю. Перешкодою для сонячного світла може бути: дерева, споруди, хмари, труби, опале листя, сніг, ожеледь.



Рис. 1. Приклад затіненого фотоелемента СБ

При з'єднанні сонячних елементів послідовно навіть якщо на один із них почне падати тінь, то результуюча потужність всього ланцюга сонячних елементів буде майже нульовою [7]. Тобто генерація інших фотоелементів знизиться до рівня затіненого. Таким чином навіть незначна тінь на сонячній батареї може спричинити різке зниження ефективності всієї установки. Теж саме відбувається і з послідовно з'єднаними сонячними батареями на сонячній електростанції [9].

Залежно від площі тіні, затінення буває різним: повним, частковим, слабким та сильним. І відповідно всі ці види затінення впливають на сонячну батарею по-різному.

Так повне затінення накриває всю сонячну батарею, через що відбувається різке падіння вироблення енергії. Часткове затінення накриває лише частину сонячної батареї і, відповідно, зменшення потужності буде не значним [4]. Однак у довгостроковій перспективі часткове затінення матиме більш серйозні наслідки, ніж повне, оскільки буде призводити до швидкого виходу з ладу сонячної батареї, внаслідок перегрівання сонячних елементів, послаблення контактів між ними та зносу струмопровідних частин сонячного елемента [8].

Сильна тінь має явні, чіткі контури та утворюється об'єктами, що знаходяться у безпосередній близькості до сонячної батареї. Слабка тінь має розмиті контури і утворюється об'єктами, що знаходяться на деякій відстані від установки або в похмуру погоду. Під впливом сильної тіні відбувається зниження напруги на затіненій сонячній батареї. Під впливом слабкої тіні починається зниження сили струму [7].

Ще однією вірогідною причиною зниження потужності та генерації сонячної батареї може стати пошкодження її поверхні. Причиною цього може бути: екстремальні погодні умови (град, вітер, підвищена температура), виробничий брак, неправильна експлуатація, зношування та деградація сонячних батарей протягом певного часу [14].

До деградації сонячних батарей відноситься зменшення виробництва електроенергії сонячною батареєю через фізичні зміни в його структурі.

Процес деградації може відбуватися сам собою протягом років, в результаті яких результуюча потужність сонячної батареї буде різко знижуватися. Але цей процес може бути прискорений через вплив зовнішніх і внутрішніх чинників [12].

Причиною прискореної деградації сонячних елементів може стати натрій чи інші активні метали, які є в складі матеріалів, з яких виготовлена сонячна батарея, і це призводить до зменшення провідності струму сонячною батареєю. Також іншою причиною деградації може бути екстремальна погода: різкі перепади температури, вологість, цикли замерзання або відтавання фотоелемента, що часто повторюються. Зовнішні фактори підсилюють паразитний опір сонячної батареї, який розсіює потужність і таким чином зменшує загальну ефективність генерації електроенергії на сонячних батареях.

Вчасно виявити деградацію сонячних батарей допомагають регулярні виміри напруги холостого ходу кожного модуля. Якщо доступ до об'єкта обмежений, використовують метод діагностики сонячної батареї електролюмінесценцією [13]. Цей метод полягає в тому, що сонячні елементи, при підключенні їх до блоку живлення, починають генерувати випромінювання в близькому інфрачервоному діапазоні. За допомогою спеціальної камери отримують фотографію сонячної батареї і з цього випромінювання визначають місця ушкоджень та тріщин (рис. 2).

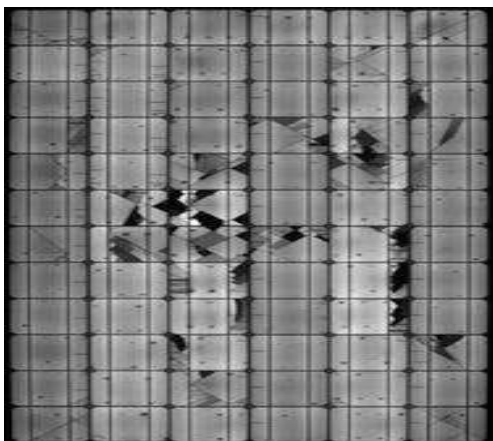


Рис. 2. Виявлення пошкоджень методом електролюмінесценції

Пошкодження окремих ділянок сонячної батареї є фізичним процесом, який можна побачити не озброєним оком. При огляді сонячних батарей можна виявити тріщини, затемнення, вм'ятини і т.д. Однак іноді пошкодження не можливо побачити одразу. Тоді треба робити огляд сонячної батареї за допомогою тепловізора.

За допомогою тепловізора, можна побачити пошкоджені ділянки сонячної батареї, які спри-

чиняють зменшення потужності та прискорюють деградацію всієї сонячної установки [10].

Якість виготовлення сонячної батареї є основним чинником її експлуатації. Від цього безпосередньо залежить термін служби установки, а також перетворення сонячної енергії в електричну. Здатність сонячної батареї працювати безперебійно тісно пов'язана з її ефективністю. Так, наприклад, низька якість фотокомпонентів, які використовуються у виробництві сонячних елементів, згодом може призвести до таких наслідків, як локальне перегрівання [11].

З метою дослідження впливу затінення та пошкоджень сонячної батареї на її параметри були проведені дослідження сонячного елемента, площею 25 см². У досліді сонячний елемент піддавався затінюванню та пошкодженню. Площа затінення та пошкодження з кожним дослідом збільшувалася на 1мм². Результати досліджень представлені у таблиці 1. Результати експерименту були опрацьовані за допомогою програми Excel та були побудовані графіки, які представлені на рис. 3–6.

На рис. 3, 4 представлено залежність затінення на струм короткого замикання та напругу холостого ходу. На рис. 3, при затіненні сонячного елемента на 0,03 см², сила струму різко зменшується до 4,57 мА. При затіненні на 0,11 см² струм продовжує зменшуватися і становить 4,52 мА. З рис. 3, 4 випливає, що при затіненні сонячної батареї струм короткого замикання зменшується, а напруга практично не змінюється.

Таблиця 1
Результати експериментальних досліджень по затіненню та пошкодженню сонячного елемента

Номер досліді	$\Delta S_{\text{затін}}(\Delta S_{\text{пошк}})$	Затінення		Пошкодження	
		I,	U,	I,	U,
n/n	см ²	мА	В	мА	В
1		4,85	0,46	4,85	0,46
2	0,01	4,83	0,46	4,71	0,45
3	0,02	4,63	0,46	4,62	0,44
4	0,03	4,57	0,46	4,62	0,42
5	0,04	4,57	0,46	4,62	0,42
6	0,05	4,57	0,46	4,54	0,41
7	0,06	4,57	0,45	4,51	0,41
8	0,07	4,57	0,45	4,49	0,4
9	0,08	4,57	0,45	4,43	0,39
10	0,09	4,55	0,45	4,4	0,39
11	0,1	4,52	0,45	4,4	0,38
12	0,11	4,52	0,45	4,4	0,38



Рис. 3. Залежність струму від площі затінення



Рис. 4. Залежність напруги від площі затінення

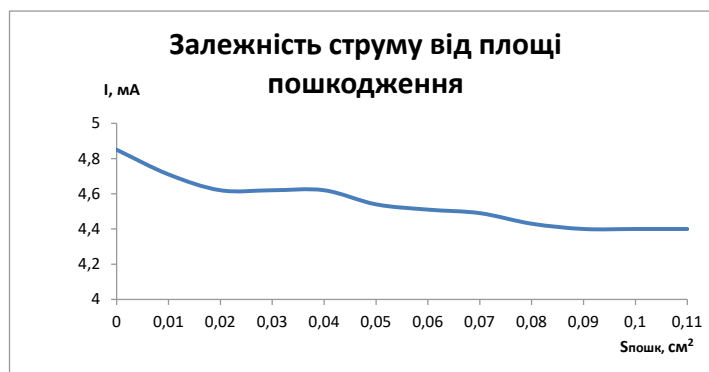


Рис. 5. Залежність струму від площі пошкодження

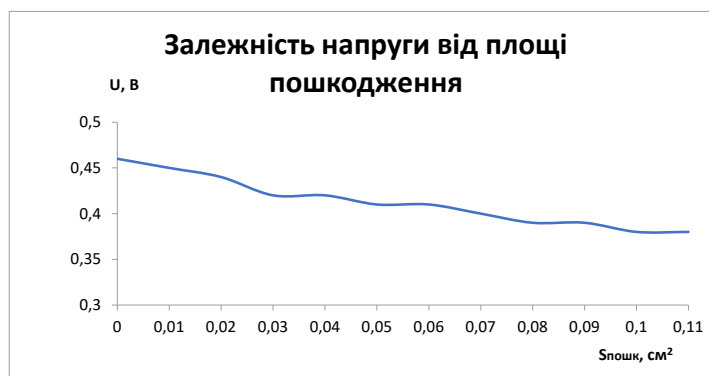


Рис. 6. Залежність напруги від площі пошкодження

На рис. 5, 6 представлено залежність пошкоджень поверхні сонячної батареї від струму короткого замикання та напруги холостого ходу. На рис. 5, при пошкодженні поверхні сонячного елемента струм короткого замикання поступове зменшується з 4,85 до 4,4 мА. На рис. 6 представлено поступове зменшення напруги холостого ходу при пошкодженні поверхні сонячного елемента з 0,46 до 0,38 В. З рис. 5, 6 випливає, що при пошкодженні поверхні сонячної батареї струм короткого замикання та напруга холостого ходу зменшуються.

Висновки. В статті проаналізовані причини затінення та пошкодження сонячних батарей та їх наслідки.

Проведені дослідження та отримані залежності:

1. Струму короткого замикання та напруги холостого ходу від площі затіненої поверхні сонячної батареї.

2. Струму короткого замикання та напруги холостого ходу від площі пошкодженої поверхні сонячної батареї.

Список літератури:

1. Глушко О., Степенко С. Параметри, характеристики і фактори, що впливають на ефективність та надійність роботи фотоелектричних перетворювачів у складі електроенергетичних систем //Технічні науки та технології. 2021. №. 1 (23). С. 249-264.

2. Сталій розвиток: захист навколишнього середовища. Енергоощадність. Збалансоване природокористування. Збірник матеріалів VII Міжнародного молодіжного конгресу (10-11 лютого 2022, Україна, Львів). Київ, 2022. 271 с.

3. Budanov, P., Kyrysov, I., Brovko, K., Rudenko, D., Vasiuchenko, P., & Nosyk, A. (2021). Development of a Solar Element Model Using the Method of Fractal Geometry Theory //Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2021. Т. 3. №. 8. С. 111.

4. Kyrysov I., Budanov P. Методи досліджень поглинаючої поверхні сонячних елементів //Машинобудування. 2022. №. 29. С. 104-117.

5. Миколок О. А. Стан та розвиток відновлюваних джерел енергії //Вісник Хмельницького національного університету. Економічні науки. 2019. № 1. С. 174-183.

6. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах //Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2018. №. 29 (68). № 2. С. 220-224.

7. Лисенко Л. І., Махотіло К. В., Косатий Д. М. Фактори впливу на ефективність сонячних колекторів та фотоелектричних панелей в Харківській області//Вісник НТУ «ХПІ». 2013. № 59 (1032). С. 101-111.

8. Li G., Xuan Q., Pei G., Su Y., Ji J. Effect of non-uniform illumination and temperature distribution on concentrating solar cell-a review //Energy. 2018. Т. 144. С. 1119-1136.

9. Gallardo-Saavedra S., Karlsson B. Simulation, validation and analysis of shading effects on a PV system // Solar Energy. 2018. Т. 170. С. 828-839.

10. Cotfas D. T., Cotfas P. A., Kaplanis S. Methods to determine the dc parameters of solar cells: A critical review //Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2013. Т. 28. С. 588-596.

11. Кирисов І. Г., Буданов П. Ф., Хом'як Е. О., Бровко К. Ю. Підходи та вимоги до моделювання структури напівпровідникового шару сонячного елемента //Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2022. №. 1. С. 35-38.

12. Jørgensen M., Norrman K., Krebs F. C. Stability/degradation of polymer solar cells //Solar energy materials and solar cells. 2008. Т. 92. №. 7. С. 686-714.

13. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantielicieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters //Eastern-European journal of enterprise technologies. 2018. №5 (95). С. 20-28.

14. Yuan C., Yuan C., Dong C., Zhao L., Yan X. Marine environmental damage effects of solar cell panel // Prognostics and System Health Management Conference. 2010. С. 1-5.

Kyrysov I.G., Mykhailov B.K., Losenko Ye.V. INFLUENCE OF SHADING AND DAMAGE OF SOLAR BATTERIES ON THEIR PARAMETERS

The article examines the influence of shading and damage of solar panels on their parameters.

Analyzed types and consequences of solar panel shading. With shading, the electricity generation of solar cells decreases, while the resulting power of the entire solar cell decreases.

The types of damage to the surface of solar batteries and their causes are analyzed. Damage to the surface of the solar battery occurs as a result of extreme weather conditions: hail, wind, temperature; production shortage; improper operation; wear and tear of solar cells over time.

An analysis of the types of degradation of solar batteries and its consequences was carried out. Degradation occurs as a result of chemical reactions between the active metals in the solar battery, extreme weather conditions: sharp changes in temperature, humidity, constant freezing or thawing. Degradation leads to a decrease in the current conductivity of the solar cell, the appearance of parasitic resistance of the solar cell, the appearance of cracks, micropores and inhomogeneities on the surface of the solar cell.

The article discusses the methods of detecting damage to solar batteries - the thermal imaging control method and the electroluminescence method. When using the method of thermal imaging control, the solar battery is examined with a thermal imager; while areas of the solar battery surface that are heated are detected. The electroluminescence method consists in the fact that the solar cells that are connected to the power supply unit begin to generate radiation in the near-infrared range, and with the help of a special camera, photographs of the solar cell with places of damage and cracks are obtained.

Graphical dependences of the effect of short-circuit current and open-circuit voltage on the area of the shaded solar cell were obtained. The dependences of the effect of short-circuit current and open-circuit voltage on the area of the damaged surface of the solar cell were obtained. It was determined that when the solar battery is shaded, the short-circuit current decreases, and the no-load voltage practically does not change. It was determined that when the surface of the solar cell is damaged, the short-circuit current and open-circuit voltage decrease.

Key words: *solar cell, shading, short-circuit current, no-load voltage, power, solar cell damage, solar energy, efficiency.*

Пантелєєва І.В.

Українська інженерно-педагогічна академія

Шматько Н.М.

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

ТЕХНІЧНІ ПИТАННЯ РОБОТИ ОБ'ЄКТІВ РОЗПОДІЛЕНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ У СКЛАДІ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

У статті представлена оцінка змін, які привели до перегляду вимог до об'єктів генерації, до мережевої інфраструктури і, в цілому, до організації електроенергетики та енергетичних ринків. Зростаючий знос електроенергетичних об'єктів, залучення розподілених енергетичних ресурсів, зміна ролі традиційних джерел енергії та енергоносіїв потребує вивчення факторів нових технологій в електроенергетиці. Зростаючий знос електроенергетичних об'єктів, залучення розподілених енергетичних ресурсів, зміна ролі традиційних джерел енергії та енергоносіїв, збільшення попиту на електроенергію та трансформація його якісних характеристик, зміна моделі поведінки споживачів – все це потребує вивчення факторів поширення нових технологій в електроенергетиці для переходу до наступного етапу. У багатьох країнах світу зараз, поряд з розвитком централізованого енергопостачання, все більш активно підтримується тенденція широкомасштабного переходу до розподіленої генерації (РГЕ). Нерідко ці два види енергопостачання протиставляються друг відносно друга з переважною перевагою РГЕ, яка має найбільшу конкурентоспроможність. Разом з тим, кожний з них має свою сферу застосування, де в найбільшому ступені виявляються переваги. Однак, світовий досвід показує, що зі збільшенням частки розподіленої генерації, виникає необхідність рішення ряду проблем регулювання частоти, наружи об'єктами розподіленої генерації. Розвиток розподіленої генерації потребує відповідних документів, які регламентують вимоги до об'єктів розподіленої генерації та їх підключення до енергосистеми, враховуючі особливості та характеристики цих об'єктів. У статті розглянуті основні проблемні технічні питання, причини їх виникнення, режими роботи систем електропостачання споживача з власним об'єктом розподіленої генерації у випадку рішення задачі забезпечення надійного електропостачання від об'єкта розподіленої генерації. Найбільш суттєвими умовами для конкуренції технологій розподіленої енергетики та їх інтеграція з енергосистемами на конкретній території є наявність централізованих систем газо- та електропостачання. Визначено що об'єкти РГ продовжують підключатись на паралельну роботу з енергосистемою та створюють певні технологічні труднощі і проблеми. Отже, їх не обхідно вирішувати вже зараз, поки не проявився негативний синергетичний ефект, коли стануть можливими масові відключення споживачів електроенергії через невиконання певних техніко-технологічних вимог до інтеграції об'єктів РГ в енергосистему.

Ключові слова: електроенергія, електропостачання, розподілена генерація, генеруючі установки, енергосистема, об'єкт розподіленої генерації, відновлювані джерела енергії.

Постановка проблеми. Розподілена енергетика – каталізатор та ключовий елемент «енергетичного переходу» від традиційної організації енергосистем до нових технологій та практик. Енергетичний перехід здійснюється на базі децентралізації, цифровізації, інтелектуалізації систем енергопостачання (СЕП), з активною участю самих споживачів та всіх видів енергетичних ресурсів. Характеризується цей перехід підвищенням енергетичної ефективності та зниженням викидів парникових газів (за рахунок відновлювальних джерел енергії).

В останні роки сталися зміни, які привели до перегляду вимог до об'єктів генерації, до мере-

жевої інфраструктури та в цілому до організації електроенергетики та енергетичних ринків. Зростаючий знос електроенергетичних об'єктів, залучення розподілених енергетичних ресурсів, зміна ролі традиційних джерел енергії та енергоносіїв, збільшення попиту на електроенергію та трансформація його якісних характеристик, зміна моделі поведінки споживачів – все це потребує вивчення факторів поширення нових технологій в електроенергетиці для переходу до наступного етапу.

У багатьох країнах світу зараз, поряд з розвитком централізованого енергопостачання, все більш активно підтримується тенденція широкомасштабного переходу до розподіленої генера-

ції (РГЕ). Нерідко ці два види енергопостачання протиставляються друг відносно друга з переважною перевагою РГЕ, яка має найбільшу конкурентоспроможність. Разом з тим, кожний з них має свою кращу сферу застосування, де в найбільшому ступені виявляються переваги.

Однак, світовий досвід показує, що зі збільшенням частки розподіленої генерації (РГ), у тому числі і на основі відновлювальних джерел енергії (ВДЕ), виникає необхідність рішення ряду проблем регулювання частоти об'єктами РГ. Забезпечення стійкої роботи РГ тощо. В Україні ці проблеми пов'язані, з однієї сторони, із станом, експлуатацією та особливостями побудови розподільчих мереж, з іншої – особливостями побудови розподільчих мереж, з іншої – особливостями функціонування самого джерела РГ у нормальних та аварійних умовах [1].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Світові тенденції розвитку енергетики демонструють пріоритетну реалізацію нових можливостей на основі втілення технологій інтелектуальних електроенергетичних систем (smart grid), когенерації, виробництва енергії на основі використання ВДЕ. У ряді країн спостерігається тенденція уходу від централізованої енергетики у напрямку розвитку розподіленої енергетики. Наприклад, у США експлуатується біля 12 млн установок малої розподіленої енергетики загальною встановленою потужністю вище 220 ГВт, а темпи приросту складають приблизно 5 ГВт, а темпи джерела резервної потужності для енергопостачання споживачів в аварійних ситуаціях [1, 2].

Тобто пріоритет вводу РГЕ у світі зростає та його розрив відносно традиційних енергоджерел буде тільки збільшуватись. Разом з тим, стохастичний характер ВДЕ та діяльність оптимального використання встановленої потужності будуть сприяти їх об'єднанню централізованою мережею з метою сумісної роботи.

Можливість роботи розподілених енергоджерел як на загальну з централізованими джерелами мережу, так і на індивідуальні споживачі (промислові та агропромислові підприємства) створює умови для інтеграції секторів централізованого та ізольованого (децентралізованого) виробництва енергії [3].

Отже, дослідження різних аспектів розвитку РГ стало актуальною проблемою в останні роки. В роботах [4, 5] розглянуті основні переваги, загальносистемні ефекти та проблеми технологічного приєднання розподілених джерел енергії у розподільчі мережі. В [6] розглянуті основні

питання функціонування електричних мереж з РГ, у тому числі проблеми релейного захисту, погодинного завантаження, якості електроенергії пристроїв розподіленої генерації. У [7] представлені дослідження режимної надійності СЕП з РГ та обліком каскадних відмов, моделі для визначення граничних режимів в електричних мережах а також методи для оцінки параметрів режиму енергорайонів з об'єктами РГ. У багатьох роботах приділяється увага оцінці надійності СЕП, у тому числі оцінці можливості забезпечення надійного електропостачання споживачів за рахунок будівництва об'єктів РГ [8]. Крім того, РГ енергії розглядається як один з факторів підвищення енергетичної безпеки та стійкого розвитку регіонів [9].

Не дивлячись на значну кількість публікацій, які освітлюють різні аспекти використання розподіленої генерації, немає робіт, пов'язаних з оцінкою її впливу на попит на електроенергію, ціну та структуру її виробництва у регіоні, а також проблемними технічними питаннями роботи об'єктів РГ у складі енергосистеми. Не дуже висвітлена також і конкурентоспроможність РГЕ по інтеграції з централізованими системами.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз основних технічних питань застосування генеруючих установок середньої та малої потужності на об'єктах розподіленої генерації, причина їх виникнення, та умови конкурентоспроможності РГЕ.

Виклад основного матеріалу дослідження. В Україні, як і в будь-якій країні світу, спостерігається щорічний зріст введів об'єктів РГ за рахунок теплових електростанцій з газотурбінним (ГТУ), дизельними (ДЕС) та газопоршневими установками (ГПУ), які, як правило, підключаються до розподільчих електричних мереж або до мереж внутрішнього електропостачання промислових підприємств та споруджуються власниками великих промислових підприємств газодобувної, металургійної хімічної галузей промисловості.

У більшості випадків такий розвиток РГ обґрунтований включно економічними аспектами, а саме:

- Можливістю використання вторинних енергоресурсів (шахтного газу, доменного та конвертного газу, тощо) з можливістю вироблення теплової та електричної енергії;
- Можливістю використання вторинних енергоресурсів на середній та дрібних підприємствах (утилізація біогазу на очисних спорудах, утилізація виходів лісопереробки та сільського господарства).
- Можливістю спорудження когенераційних та установок на існуючих муніципальних та

виробничих котельних при їх рокенетрукції та модернізації;

- Доступністю газової інфраструктури з необхідними обсягами поставки природного газу для будівництва власного об'єкту РГ;
- Можливістю використання детандер-генераторних агрегатів для вироблення електричної енергії (газорозишрювальні турбіни спеціальної конструкції на газоредуцируючих пунктах магістральних газопроводів);
- Складнощі або відсутність економічної доцільності технологічного приєднання до електричних мереж;
- Значною вартістю послуг по передачі та розподілу електричної енергії.

По експертним оцінкам величина виробництва електроенергії від об'єктів РГ 2030 року може досягнути третини від загального обсягу відпуски електричної енергії для промислових споживачів. На територію України було введено обладнання малої та середньої генерації загальною потужністю 750 МВт тільки за 2020–2021 р., а споживання зросло на 30%, при цьому споживання в Єдиній енергосистемі (ЄЕС) зросло тільки на 3% [10].

Розвиток РГ викликає багато дискусії серед спеціалістів у законодавчій, економічній, а також у технічній сферах регулювання, при цьому зараз практично відсутні окремі нормативно-технічні акти, та документи, які регламентують вимоги до об'єктів РГ та їх підключення до енергосистеми, враховуючі особливі та характеристики цих об'єктів.

Використання сучасних генеруючих установок (ГУ) середньої та малої потужності пов'язане з рядом технічних проблем, дуже суттєвих як для власних об'єктів РГ, так і для розподільчих мережевих компаній, до мереж яких підключаються [11].

З проблемами технічних питань можна назвати наступні:

- Механічні пошкодження ГУ через дію ударних електромагнітних моментів при виникненні багатофазних КЗ або АПВ у зовнішній електричній мережі;
- Порушення динамічної стійкості ГУ при багатофазних КЗ у зовнішній мережі;
- Неселективні відключення генераторів при відсутності загрози механічного або термічного пошкодження при виникненні та ліквідації коротких замикань захистами електромережевих елементів;
- Передачі відключення ГТУ технологічними захистом при зниженні частоти в ЄЕС або відокремленому енергорайоні;

- Виникнення синхронних коливань ГУ (незатухаючі синхронні коливання активної потужності на ГУ), які обумовлені виробом параметрів АРЗ;
- Неможливість забезпечення регулювання частоти обертання генераторів у двох станах: при паралельній роботі з мережею та при ізольованій (автономній) роботі;
- Неуспішні виділення ГУ дією автоматики на збалансоване навантаження (АВЗН) у зв'язку з відключенням ГУ технологічними захистами при різних накидах;
- Неможливість тривалої роботи після спрацювання АВЗН через наявність обмежень по технологічному мінімуму. Навантаження на ГУ (діапазон від одиниць до десятків відсотків від $P_{ном}$);
- Значні складнощі у забезпеченні селективного відключення КЗ у мережі, а також прямих пусків електродвигунів при ізольованій (автономній) роботі ГТУ з тиристорними перетворювачами частоти (ТПЧ);
- Підвищений знос регулюючих клапанів при відсутності зони нечутливості в автоматичних регуляторах частоти обертання ГУ;
- Відключення ГУ захистом від підвищення вібрації через виникнення рутинних коливань при скиданні навантаження потужними електродвигунами з тиристорними приводами при автономній роботі об'єкта РГ.

Насправді існує декілька причин, чому постійно необхідно проводити аналіз проблемних питань, які виникають з об'єктами РГ:

- Виникнення труднощів при отриманні технічних умов на технологічне приєднання до електричних мереж, узгодженні проєктних рішень або в процесі експлуатації ГУ;
 - Зниження економічної ефективності від втілення ГУ, яка очікувалась;
 - Неможливість забезпечення надійного електропостачання споживачів від об'єкту РГ (у тому числі основного виробничого процесу) в автономному режимі роботи;
 - Прискорене вичерпання ресурсу генеруючих обладнанням з необхідністю проведення довгострокового ремонту або технічного обслуговування;
 - Пошкодження генеруючих установок при нормативних збуреннях у мережах зовнішнього електропостачання.
- Нерідко причинами виникнення проблемних питань бувають:
- Невірний вибір виду, типу, потужності ГУ на етапі проєктування;

- Невірний вибір режимів роботи ГУ;
- Відсутність принципово важливих пунктів вимог в технічному завданні на закупку ГУ;
- Неповне чине якісне виконання проекту схеми видачі потужності ГУ об'єктів РГ без обліку особливостей мереж зовнішнього або внутрішнього електропостачання та впливу навантаження;
- Незадовільна організація експлуатації ГУ.

Однак, об'єкти РГ продовжують підключатись на паралельну роботу з енергосистемою та створюють певні технологічні труднощі і проблеми. Отже, їх не обхідно вирішувати вже зараз, поки не проявився негативний синергетичний ефект, коли стануть можливими масові відключення споживачів електроенергії через невиконання певних техніко-технологічних вимог до інтеграції об'єктів РГ в енергосистему.

Важливо відмітити, що можливе існування трьох режимів роботи СЕП споживача з власними об'єктами РГ, у випадках вирішення задачі забезпечується надійного електропостачання від об'єкта РГ:

1) Паралельна робота енергооб'єкта з енергосистемою, з видачею або без видачі потужності у мережу. У цьому випадку забезпечується робота об'єкта РГ за рахунок отримання з енергосистеми пікової потужності та видача в енергосистему надлишків потужності, що дозволяє забезпечити надійне електропостачання власних споживачів та підвищити техніко-економічні показники роботи об'єкта РГ;

2) Ізольована робота енергооб'єкта з забезпеченням електропостачання власних споживачів з обліком їх графіків навантаження а також забезпечення ремонтного та аварійного резерву;

3) Комбінований режим, коли енергооб'єкт працює паралельно з енергосистемою, але у випадку виникнення режиму великих рядків або при аварії у мережі зовнішнього електропостачання може бути відокремлений на ізольовану роботу з живленням споживачів від об'єкту РГ.

Другий та третій режим роботи свої значні особливості, але в даній роботі вони не розглядаються. Слід звернути увагу на питання, які дозволять забезпечити технологічне приєднання об'єктів РГ у мінімально можливі терміни та знизити ризики виникнення проблемних технічних питань при експлуатації ГУ об'єктів РГ.

При технологічному приєднанні об'єкта РГ для здійснення паралельної роботи з енергосистемою необхідна тісна взаємодія всіх його учасників, а їх як правило, п'ять: власники ГУ, виробники ГУ, проектні організації, розподільчі мережеві компанії, та філіали об'єднаної енергосистеми [12].

Власники повинні надавати повну вихідну інформацію про параметри навантаження, режимах та графіках його роботи. Виробники володіють повною технічною інформацією про всі параметри ГУ, електричні та технологічні захисти алгоритми та параметри налаштування САУ.

Крім того необхідно отримати наступне дані та відповіді на питання, які дозволять виконати необхідні розрахунки для прийняття основних технічних рішень у відношенні ГУ об'єкта РГ:

- Розширені параметри генератора (X_d , тощо);
- На яку роботу розрахована система регулювання швидкості обертання генератора;
- Особливості системи збудження генератора;
- Приводний двигун генеруючої установки та його особливості;
- У яких діапазонах допустила тривала робота ГУ без спрацювання електричних захистів:
 - по потужності ($P_{тіп}$, Z_{max} , у % від $P_{ном}$),
 - по напрузі, (U_{min} , U_{max} у % від $U_{ном}$),
 - по частоті (f_{min} , f_{max} у % від $f_{ном}$);
- Електричні захисти генераторів, які діють на відключення ГУ при значних відхиленнях параметрів режиму від нормальних значень;
- Як забезпечується збереження механічної міцності установки;
- Термічна стійкість генератора при зовнішньому трифазному КЗ поблизу виводів генератора.

Найбільш суттєвими умовами для конкуренції технологій РГЕ та інтеграції з енергосистемами на конкретній території та в конкретному місці є наявність централізованих систем газо- та електропостачання (рис. 1).

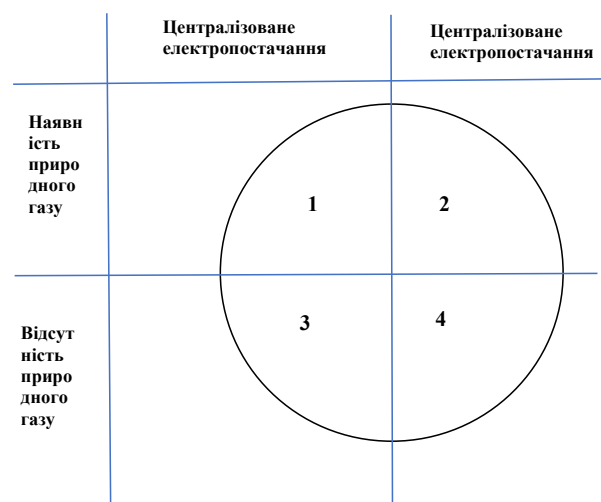


Рис. 1. Умови конкуренції технологій РГЕ

Проектні організації здійснюють розробку проекту схеми видачі потужності об'єктом РГ, видачу ТУ на розподільчі мережеві компанії здійснюють технологічне приєднання узгоджують основні технічні рішення.

Ще одне питання, яке недостатньо висвітлюється при розгляданні розподіленої енергетики це її конкурентоспроможність по інтеграції до централізованих енергосистем.

На них території, де доступні обидві централізовані системи (текст із роботи)

Висновки.

1. Оцінений загальний вклад РГ в енергетику: завдяки близькості до споживача вона має порівняно меншій мережеві витрати при розподілу електроенергії, може забезпечити виконання більш високий вимог споживачів по якості енергії та надійності енергопостачання.

2. Систематизовані основні проблемні питання застосування сучасних генеруючих установок середньої та малої потужності на об'єктах розподіленої генерації.

3. визначені учасники процес технологічного приєднання об'єктів РГ для здійснення паралельної роботи з енергосистемою, та роль кожного з цих

4. визначенні умови інтеграції РГЕ з енергосистемами на конкретній території. Можна відзначити, - що застосуванню технологій РГЕ, включаючи відновлювані джерела енергії, буде сприяти посилення мотивації суб'єктів відносин: для споживачів до участі в управлінні режимами, резервуванню потужності, продажу надлишків енергії, для постачальників- до підвищення відповідальності за недопостачання та якість електроенергії.

Список літератури:

1. Зарубіжний досвід енергетичної статистики міжнародних організацій (МЕА, Євростат, ООН). Нормативно-правове забезпечення та авторизовані системи збору і оброблення інформації енергетичної статистики. Київ, 2015. URL: <http://ua.energy/wp-content/uploads/2018/01/Statystyka-energetyka.pdf>
2. Розподілена генерація електроенергії – глобальні тенденції розвитку. URL: <http://uare.com.ua/новину/453-rozpodilena-generatsiya-elektroenergiji-globalni-tendensiji-rozvitky>
3. Hansen C.J. Bower J. An economic evaluation of small-scale distributed electricity generation technologies. Oxford Institute for Energy Studies and Dept. of Geography, Oxford University, 2017. 59 p.
4. Законодавчі ініціативи у сфері альтернативної енергетики. Держенергоефективності. 2017. 24 с. URL: www.sciee.gov.ua.
5. Механізми фінансування заходів енергоефективності в Україні. Мінрегіон України. 2017. 64 с. URL: <http://es.esso.agency/images/art/3-2017>
6. Дячук О.А. Перехід України на відновлювальну енергетику до 2050 року. 2017. 29 с. URL: http://www.energybrainpool.com/fileadmin/download/Studie_20170626.
7. Damodaran A. Strategic Risk Taking: a framework for risk management. New Jersey: Pearson Prentice Hall, 2018. 388 p.
8. Huenteler J., Schmidt T.S. Ossenbrink J. Technology life-cycles in the energy sector-Technological characteristics and the role of deployment for innovation//Technological Forecasting and Social Change Vol. 104. 2020. P. 102-121.
9. Hossain M, Madloul N., Rahim N. Role of smart grid in renewable energy: An overview // Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 60, 2019. P. 1168-1184.
10. Карпалюк І.Т., Карюк А.О., Іерусалімова Т.С. Вплив розподіленої генерації на параметри енергосистеми. Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства, вип. 187 «Проблеми енергобезпечення та енергопостачання в АПК України», 2017. С. 40-43.
11. Пантелєєва І.В., Шматко Н.М. Сучасний стан економічного розвитку мікроГЕС у світі. Вісник НТУ «ХПІ». 2016. № 47 (1219). С. 101-104.
12. Popov O., Shmatko N., Budanov P., Pantelieieva I., Brovko K. Cost-effectiveness in
13. mathematical modelling of the power unit control. Eastern-Europian Journal of Enterprise Technologies. 2019. 6/3(102). P. 20-28.

Pantelieieva I.V., Shmatko N.M. TECHNICAL ISSUES OF THE OPERATION OF DISTRIBUTED GENERATION FACILITIES AS PART OF THE ENERGY SYSTEM

The article presents an assessment of the changes that led to the revision of requirements for generation facilities, network infrastructure and, in general, the organization of the electric power industry and energy markets. The growing wear and tear of electric power facilities, the involvement of distributed energy resources, and the changing role of traditional energy sources and energy carriers require the study of the factors of new technologies in electric power. The growing wear and tear of electric power facilities, the attraction of distributed energy resources, the change in the role of traditional energy sources and energy

carriers, the increase in demand for electricity and the transformation of its quality characteristics, the change in the behavior of consumers - all this requires the study of the factors of the spread of new technologies in the electric power industry in order to move to the next stage. In many countries of the world, along with the development of centralized energy supply, the trend of large-scale transition to distributed generation (DGE) is increasingly being supported. Often, these two types of energy supply are opposed to each other with the overwhelming advantage of RGE, which has the greatest competitiveness. At the same time, each of them has its best field of application, where the advantages are most evident. However, world experience shows that with the increase in the share of distributed generation, there is a need to solve a number of problems of frequency regulation, in addition to distributed generation facilities. The development of distributed generation requires relevant documents that regulate requirements for distributed generation facilities and their connection to the power system, taking into account the peculiarities and characteristics of these facilities. The article discusses the main problematic technical issues, the reasons for their occurrence, the modes of operation of the consumer's power supply systems with its own distributed generation facility in the case of solving the problem of ensuring reliable power supply from the distributed generation facility. The most essential conditions for the competition of distributed energy technologies and their integration with energy systems in a specific territory are the presence of centralized gas and electricity supply systems. It was determined that WG objects continue to be connected to parallel work with the power system and create certain technological difficulties and problems. Therefore, it is not necessary to solve them now, before a negative synergistic effect is manifested, when mass disconnections of electricity consumers will become possible due to non-fulfillment of certain technical and technological requirements for the integration of RG facilities into the power system.

Key words: electricity, power supply, distributed generation, generating facilities, power system, distributed generation object, renewable energy sources.

Прокопенко О.О.

Українська інженерно-педагогічна академія

Антоненко Н.С.

Українська інженерно-педагогічна академія

Гулей О.Б.

Українська інженерно-педагогічна академія

ВИХРОВИЙ ВИТРАТОМІР ОБ'ЄМНИХ ТА МАСОВИХ ВИТРАТ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНОГО АГРЕГАТУ КОМПРЕСОРНОЇ СТАНЦІЇ

Статтю присвячено впровадженню перспективних вихрових методів вимірювання витрат природного газу газоперекачувальними агрегатами (ГПА). Ці вимірювання передбачені в обсязі штатної системи управління та контролю ГПА, і вони мають відповідати високим вимогам до сучасного магистрального транспорту газу.

В підґрунті дії таких витратомірів лежить взаємодія з потоком газу ланцюжків вихорів («доріжок» Кармана), частота утворення яких є прямо пропорційною швидкості потоку. У статті описано фізичні механізми вихроутворення за тілом обтікання (турбулізатором) в потоці газу.

Але загальними недоліками для таких вимірювальних засобів є вузький частотний діапазон корисного сигналу, наявність збурень у вигляді вібрації зовнішнього корпусу та коливань у потоці газу, створених компресором та іншими елементами ГПА. Також для оцінки масової витрати газу необхідно визначити його щільність, що є самостійним метрологічним завданням.

За результатами літературного пошуку в статті представлено комбінований витратомір газу (об'ємний та масовий), в якому на апаратному та алгоритмічному рівнях вирішено задачу підвищення метрологічних характеристик вимірювальної системи, утвореної турбулізатором, датчиками вихроутворення, вимірювальною ділянкою корпусу газопроводу та елементом потоку газу, обмеженим цією ділянкою.

В свою чергу, для оцінки щільності газу в конструкції вимірювальної ділянки встановлено джерело ударно-імпульсного навантаження, що виконане у вигляді стрижня електромагніту, на обмотку якого подають посилений сигнал з виходу датчика частоти вихроутворення. Стрижень створює амплітудно-модульовану послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів, частота проходження яких дорівнює частоті зриву вихорів, і удари якого викликають вібрацію корпусу витратоміру. Автоколивання цього корпусу оцінюють за допомогою спектрального аналізу сигналу п'єзоелектричного датчика вібрації. Частоти автоколивань, в свою чергу, залежать від щільності газу. Все це дозволяє більш точно оцінити частоту вихроутворення, власну частоту коливань корпусу та щільність газу, що підвищує точність вимірювання об'ємної та масової витрат газу.

За рахунок керованої взаємодії зазначеними елементами у цифровому блоці обробки сигналів, забезпечено задовільні метрологічні характеристики витратоміра, що підтверджують результати його практичних випробувань.

Ключові слова: вихровий витратомір, турбулізатор, вихрова доріжка Кармана, датчик вібрації, частота, імпульс, резонанс, витрати, природний газ.

Постановка проблеми. Стандартне та поширене вимірювання витрат природного газу за рахунок використання дросельних шайб, на компресорних станціях (КС) не завжди забезпечує метрологічні характеристики вимірювань витрат обсягів газу, які є потрібними для роботи ГПА. Необхідність створення та впровадження в енергетичній галузі вітчизняних витратомірів природного газу, які відповідають умовам сучасного

виробництва, обумовлює актуальність [1, 2] розробки методів, що зможуть забезпечити вимоги до їх характеристик та якості роботи.

Фізичні принципи, особливості конструкції та сфери застосування витратомірів докладно обговорено у сучасній науково-технічній літературі [1–5]. Аналіз витратомірів технологічного середовища показує, що перспективними є такі, що використовують ефект «доріжки» Кармана (названо на честь

її відкривача). В підґрунті дії таких витратомірів лежить взаємодія ланцюжків вихорів, які утворюються під час обтікання потоком речовини нерухомого твердого тіла. Пульсацію тиску вихорів уловлюють сенсорами, частота їх утворення є прямо пропорційною швидкості потоку. Функціональну схему такого вимірювання показано на рис. 1.

За малими числами $Re < 30$ обтікання такого тіла відбувається з утворенням стаціонарної замкнутої зривної зони (сліду) у його кормовій частині. При збільшенні числа Re по ходу сліду потік рідини стає нестійким, що призводить до руйнування зривної зони та відриву завихрених елементів (вихорів) по черзі то праворуч, то ліворуч.

Вихори захоплюються потоком за течією і протягом деякого часу зберігають свою форму. В потоці їх розташовано у шаховому порядку у вигляді двох ланцюжків (рядків) за тілом (див. рис. 1).

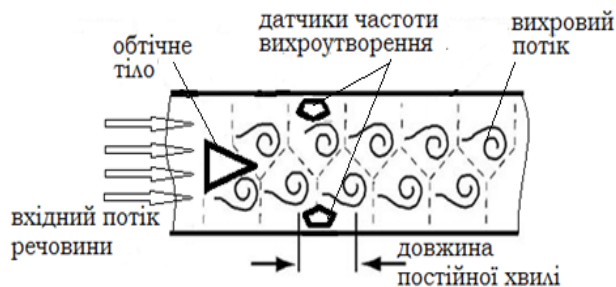


Рис. 1. Функціональна схема вимірювання частоти хвиль вихорів, що створюють доріжку Кармана в потоці речовини

Ці рядки формують доріжку Кармана за обтічним об'єктом, поки повільно не зникають в потоці внаслідок дисипації енергії за рахунок тертя. Самі вихори обертаються в протилежних напрямках, та рухаються зі швидкістю U , яка є меншою від швидкості потоку W . В реальних умовах вихрова доріжка стабільно існує в діапазоні чисел Re від 30 до 300.

Таким чином, оцінка витрат потоку речовини вихровими датчиками ґрунтована на визначенні частоти вихрових хвиль. Такі витратоміри мають ряд суттєвих переваг перед іншими варіантами [2].

Це, перш за все, висока точність, широкий діапазон вимірювання, мала залежність показань від впливу в'язкості, щільності і температури вимірюваного середовища, простота конструкції і висока надійність роботи, можливість вимірювання витрати як рідких, так і газоподібних середовищ. Також вихрові витратоміри мають лінійні характеристики перетворення, що є справедливими для швидкостей потоку в діапазоні від 2 м/с до 40 м/с.

До недоліків вихрових витратомірів можна віднести, перш за все, вплив коливань (акустичні та

вібраційні пульсації), характерних для ГПА КС природного газу: корпусу трубопроводів, турбін, компресорів, насосів, пристроїв систем автоматики та інших. Цей вплив спотворює результати вимірів витрати незалежно від вибору методу вимірювань та характеристик речовини, що перекачують. Також, ці витратоміри мають відносно високу інерційність, яка є властивою для електромеханічних систем взагалі. Застосування вихрових витратомірів обмежено трубопроводами, що мають діаметр від 25 мм до 300 мм, також їм притаманна порівняно велика втрата тиску – від 30 кПа до 50 кПа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Розглянемо приклади сучасних витратомірів для контролю об'ємних та масових витрат рідини та газу, заснованих на ефекті «доріжки Кармана».

Так, в роботі [7] для оцінки витрати потоку рідини використано вихровий витратомір, в якому встановлено протяжний плоский генератор вихорів Кармана (турбулізатор) з трапецієподібним поперечним перерізом і поздовжньою віссю, що є перпендикулярною до напрямку потоку. Інтенсивність вихроутворення визначають відповідним датчиком вібрації, встановленим в потоці нижче турбулізатора. Також виконують вимірювання вібрації трубопроводу датчиком вібрації, розташованим на зовнішній його поверхні відповідно до розташування датчика вихроутворення.

Відповідно до вимірювальної схеми, негативний вплив вібрації трубопроводу на результат вимірювання витрати знижується за рахунок включення вихідних сигналів датчика вихроутворення та датчика вібрації на вхід диференціального підсилювача. Вихідний сигнал цього підсилювача подають на вхід блоку перетворення та обробки сигналів. Фур'є-аналіз результатів цього перетворення використовують для розрахунку частоти вихроутворення, швидкості потоку і, відповідно, об'ємної витрати перекачуваної рідини.

Недоліком розглянутого витратоміру є вузький діапазон зміни частоти корисного сигналу, який не завжди забезпечує необхідну точність вимірювань. Самостійним завданням є контроль характеристик вібрації вимірювальної ділянки витратоміра. Також можливі похибки внаслідок збігу частоти вільних коливань турбулізатора з власною частотою цієї ділянки. Пристрій дозволяє обчислити тільки об'ємну витрату потоку.

В іншому прикладі [8] задачу підвищення точності вихрового витратоміру вирішують за рахунок виконання стрижньових елементів турбулізатора з поперечним перерізом у вигляді трикутного, трапецієдального і сегментного профілів. Ці еле-

менти встановлюють вздовж потоку газу. Принципова схема розміщення турбулізатора і датчика вібрації відповідає наведеній у [7]. За результатами вимірювання частот вихроутворення для всіх турбулізаторів після перетворення та обробки сигналів на персональному комп'ютері (ПК) оцінюють витрати газу. Такі витратоміри призначені для труб діаметром від 50 мм до 300 мм. Похибка виміру становить від 0,5 % до 2 %.

Недоліком пристрою є виникнення через складності конструкції турбулізатора декількох резонансних частот, що потребує додаткового аналізу. Отримання сигналу в резонансі є утрудненим і не дає можливості забезпечити необхідну точність виміру витрати газу. Самостійним завданням є контроль характеристик вібрації вимірювальної ділянки витратоміра. Пристрій дозволяє обчислити тільки об'ємні витрати потоку.

З урахуванням потреби забезпечення якості первинного сигналу при контролі потоків газу необхідно, на наш погляд, розглянути метод оцінки щільності потоку природного газу, наведений в [9]. Позитивний результат у цьому випадку досягнуто за рахунок використання диференціального датчика щільності, що містить два здвоєні камертони із збудниками, встановленими між гілками камертонів. Знімання сигналів коливання гілок здійснюють вібродатчиками з передачею сигналу до змішувача частот і пристрою обробки інформації на ПК. Для збудження автоколивань камертона використовують магнітокервані контакти. В свою чергу, власна частота електро-механічної системи камертону залежить і від щільності потоку, яка пов'язує частоту коливань у потоці з його щільністю. Основна похибка відомих на ринку щільномірів газу такого типу починається від $\pm 0,1$ % відносної похибки (але є меншою від абсолютної похибки $\pm 0,0015$ кг/м³), що є досить високим показником [10]. Недоліком розглянутого щільноміру є відсутність обліку вібрації трубопроводу, що збурює результати вимірювань. Також пристрій не дозволяє обчислити масову та об'ємну витрати потоку.

Постановка завдання. За результатами літературного огляду сформульовано базові вимоги до витратоміру газового потоку. Це дає змогу запропонувати створений та досліджений на практиці комбінований витратомір об'ємних та масових витрат газу, в якому в одній конструкції поєднано функції вихрового витратоміру і вібраційного щільноміру [2].

Виклад основного матеріалу дослідження. Наведемо основні дані та положення, що опи-

сують дію комбінованого витратоміру, функціональну схему якого показано на рисунку 2.

У потоці газу встановлено лінійний турбулізатор із трикутним поперечним перерізом (поздовжня вісь є перпендикулярною потоку). Потік газу створює доріжку Кармана за турбулізатором, коливання тиску якої вимірюють електромагнітними датчиками. Сигнали датчиків після обробки в ПК поступають на перший електромагніт, сердечник якого здійснює коливання з частотою зриву вихорів. В свою чергу, коливання цього сердечника синхронно керують джерелом живлення електричного ланцюга, до якого підключено обмотку другого електромагніту. Таким чином, сердечник другого електромагніту рухається синхронно сердечнику першого електромагніту, а той, в свою чергу, – синхронно пульсаціям тиску газу.

Сердечник другого електромагніту створює послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів, частота проходження яких дорівнює частоті зриву вихорів, і яка збуджує автоколивання корпусу витратоміру.

Характеристики цих автоколивань фіксують п'єзоакселерометром з подальшим спектральним аналізом вібрації корпусу, це дозволяє за наявності резонансу більш точно виділити частоту вихроутворення і власну частоту коливань корпусу і підвищує точність вимірювання витрати газу.

При цьому частота вихроутворення є однозначно пов'язаною зі швидкістю потоку і, відповідно, з об'ємною витратою газу.

Розглянемо більш детально роботу цього витратоміру (див. рис. 2). Витратомір містить корпус 1 з фланцями 2 для жорсткого закріплення на газових трубах. У середині корпусу 1 на вертикальній осі 3 закріплено турбулізатор 4 у вигляді вертикальної призми, від якого на відстані величини зони вихроутворення розташовано електромагнітний датчик 5 з мембраною 6, що має власну частоту у діапазоні можливих резонансних частот корисного акустичного сигналу.

Всі електронні пристрої вимірювальної схеми з'єднані через підсилювач заряду 7, смуговий фільтр нижніх частот 8 і плату АЦП 18 з ПК 19. В свою чергу, датчик 5 через елементи 7 і 8 сполучено з обмоткою електромагніту 9.

Сердечник 10 електромагніту 9 здійснює механічні коливання з частотою f_s зриву вихорів у потоці турбулізатора та замикає і розмикає електричне коло 11, яке є сполученим з джерелом живлення 12 і обмоткою електромагніту 13. Сердечник 14 електромагніту 13 створює послідовність прямокутних механічних ударних імпульсів,

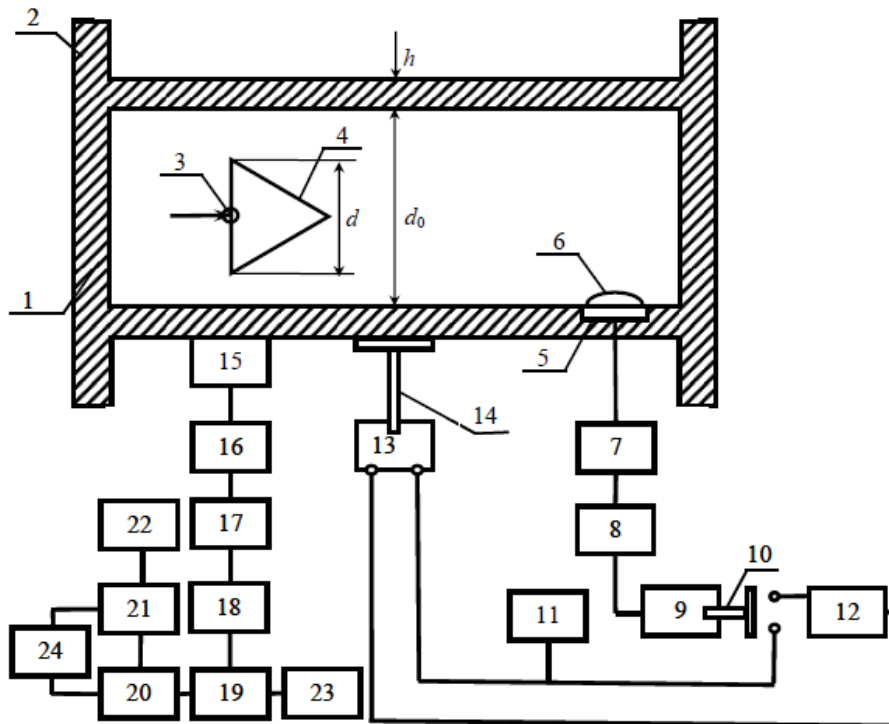


Рис. 2. Схема функціональна комбінованого витратоміра:

- 1 – корпус; 2 – фланці для закріплення; 3 – поворотна вертикальна ось;
 4 – турбулізатор; 5 – електромагнітний датчик; 6 – мембрана; 7 – підсилювач заряду; 8 – фільтр нижніх частот; 9 – перший електромагніт; 10 – сердечник першого електромагніту; 11 – електричне коло; 12 – джерело живлення;
 13 – другий електромагніт; 14 – управління сердечника другого електромагніту;
 15 – п'єзоакселерометр; 16 – підсилювач заряду; 17 – фільтр верхніх частот;
 18 – плата аналогово-цифрового перетворювача (АЦП);
 19 – ПК; 20 – блок спектрального аналізу; 21 – блок виділення частоти зриву вихорів і власної частоти корпусу; 22 – блок обчислення витрат;
 23, 24 – блоки ручного та автоматичного управління

частота проходження яких дорівнює частоті f_s , і які порушують автоколивання корпусу витратоміру на його власній частоті $f_{кв}$. Ця схема забезпечує амплітудно-імпульсну модуляцію власної частоти $f_{кв}$ за частотою зриву вихорів f_s .

На корпусі 1 встановлено п'єзоакселерометр 15, який фіксує амплітуду автоколивань корпусу і генерує корисний інформативний сигнал. Цей сигнал піддають обробці в ланцюгу, утвореному підсилювачем заряду 16, смуговим фільтром верхніх частот 17, платою АЦП 18, і передають до ПК 19.

В свою чергу, ПК сполучено з блоком результатів спектрального аналізу 20, блоком виділення частоти зриву вихорів і власної частоти корпусу 21, а також блоком обчислення об'ємної і масової витрати 22. Витратомір містить пристрої ручного 23 і автоматичного 24 управління.

У ланцюгу, утвореному ПК із зазначеними елементами, з результуючого сигналу за програмою спектрального аналізу вібрації (на основі перетворення Фур'є) виділяють частоти зриву

вихорів турбулізатора і власної частоти коливань корпусу.

Відомо [2, 3, 6], що турбулізатори правильної геометричної форми поперечного перетину при обтіканні поперечним потоком газу піддаються дії аеродинамічних збурюючих сил, які виникають унаслідок утворення вихрової доріжки Кармана. Коли частота зриву вихорів є близькою до власної частоти механіко-акустичного каналу, який утворений всіма елементами, що входять до складу вимірювальної ділянки газопроводу (поверхня стінок каналу, турбулізатор, датчики, газ), відбувається резонанс коливань на частоті вихроутворення. Поблизу резонансу основної власної частоти коливань цього каналу процес зриву виявляється надзвичайно впорядкованим, вихори йдуть в подовжньому напрямі, а частота зриву «захоплюється» власною частотою турбулізатора, що приводить до його самозбудження, виникає складна нелінійна взаємодія між ними. Все це істотно посилює циркуляцію вихорів і підсос їх

до турбулізатора. При цьому значно зростають амплітуди коливань газу, що підвищує точність вимірів корисного сигналу первинними датчиками, а також суттєво зменшує вплив зовнішніх та внутрішніх збурень у широкому діапазоні частот.

Зрештою, сам процес вимірювання витрати базований на вимірі частоти вихроутворення, яка є пропорційною витраті (швидкості) газу. При роботі у лінійному діапазоні щільність і в'язкість середовища не впливає на цю частоту виникнення вихорів за тілом обтікання, впливає тільки швидкість потоку (об'ємна витрата). Область стійкого існування доріжки вихорів відповідає закону Кармана. За числом $Re > 300$ це явище характеризує значення числа Струхалія (Sh):

$$Sh = \frac{f_s d}{w} \approx 0,2; \quad (1)$$

де: f_s – частота зриву вихорів;
 d – діаметр поперечного перетину турбулізатору;
 w – швидкість потоку газу.

Частоту вихроутворення обчислюють з виразу (1). При постійному числі Sh лінійність характеристики перетворення частоти в швидкість зберігається при числах Re від $2 \cdot 10^4$ до $7 \cdot 10^6$.

Використовуючи (1), отримаємо вираз для об'ємної витрати газу:

$$Q_w = \frac{\pi d_0 f_s d}{4 Sh}; \quad (2)$$

де: d_0 – внутрішній діаметр корпусу витратоміру.

За умовою резонансу $f_s = f_{кв}$ (власна частота корпусу), що забезпечує амплітудну модуляцію частоти вихроутворення f_s за амплітудою власних коливань корпусу. Спектр амплітудно-модульованого сигналу коливань корпусу витратоміру представлено на рисунку 3. Спектр містить набір комбінаційних частот $f_{кв} \pm kf_s, (k = 1, 2, \dots)$ з огинаючою у формі резонансної кривої гармонійного осцилятора [4].

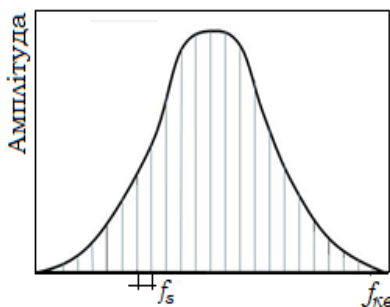


Рис. 3. Спектр амплітудно-імпульсної модуляції

Щільність газу, α , отже, і масову витрату, визначають з формули, що пов'язує різницю частот Δf

між власною частотою корпусу порожнього витратоміру і частотою корпусу витратоміру з газом зі щільністю газу:

$$\Delta f = f_{кпв} - f_{кпг} = f_{кпв} \cdot \alpha; \quad \alpha = m_r / 2 \cdot m_m, \quad (3)$$

де: $f_{кпв}, f_{кпг}$ – власна частота порожнього корпусу витратоміру і корпусу з газом;
 m_m, m_r – маса порожнього корпусу і газу відповідно.

Для циліндрового корпусу заповненого природним газом з робочим тиском P відношення мас (α) дорівнює:

$$\alpha = \frac{\rho_{гн} \cdot d_0 \cdot P}{4 \cdot \rho_m \cdot h}, \quad (4)$$

де: $\rho_{гн}, \rho_m$ – щільність газу (за нормальних умов) і матеріалу стінки витратоміру;
 h, d_0 – товщина стінки і внутрішній діаметр корпусу (рисунок 2); P – тиск газу при подачі в ГПА на КС (відома величина).

Із співвідношень (3) і (4) отримаємо вираз для визначення щільності газу за нормальних умов і з робочим тиском P :

$$\left. \begin{aligned} \rho_{г.н.} &= \frac{4 \Delta \tilde{f} \rho_m h}{P d_0} \\ \rho_r &\cong \rho_{г.н.} \cdot P \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

де: $\Delta \tilde{f} = \frac{f_{кпв} - f_{кпг}}{f_{кпв}}$ – відносна частота.

Це дозволяє обчислити масову витрату Q_m :

$$Q_m = m_r \cdot Q_w. \quad (6)$$

Промислові випробування витратоміру проводилися на ГПА ГТК 10-2 (КС Дашава УМГ «Львівтрансгаз») для оцінки витрати паливного газу. Загальний вигляд змонтованого на ГПА витратоміру показано на рис. 4.



Рис. 4. Загальний вигляд витратоміру, змонтованого на газоперекачувальному агрегаті ГТК 10-2

При проведенні вимірювань витримували прямолінійність ділянки труби довжиною у десять її діаметрів. Внутрішній діаметр корпусу $d_0 = 50$ мм, товщина $h = 5$ мм. Поперечний переріз турбулі-

затору має вигляд трикутної призми, основа якої дорівнює 16 мм, а висота 8 мм.

Швидкість потоку газу при робочому тиску в трубі $P \approx 1,8$ МПа забезпечувала чіткі спектральні викиди при зміні частоти зриву потоку доріжки Кармана в діапазоні від 300 Гц до 390 Гц. У всьому досліджуваному частотному діапазоні сторонні частотні викиди в спектрі пульсації тиску не спостерігалися, а були присутні в спектрі вібрації на корпусі витратоміра.

Середнє відношення мас газу до мас порожнього корпусу складало $\alpha = 0,05$, власна частота корпусу $f_{\text{кпв}} = 15$ кГц. Такі дані забезпечували інформативну різницю частот $\Delta f = 750$ Гц.

Сумарна похибка кола обчислення об'ємної витрати, отримана за методикою [11], стано-

вить $\pm 0,7$ % з довірчою ймовірністю 0,95. Коло складається з електромагнітного датчика власної конструкції, плати АЦП і програми швидкого перетворення Фур'є віброакустичного сигналу на ПЕОМ. При контрольних вимірах за допомогою зразкових приладів похибка по витраті при одnorазовому вимірі становить: 2,8%.

Висновки. Результати вимірювання об'ємної витрати і масової витрати потоку паливного газу запропонованим комбінованим витратоміром узгоджуються з даними прямого, спеціально організованого і метрологічно забезпеченого вимірювання витрат за перепадами тиску на витратомірній шайбі. Рівень похибки одnorазового вимірювання об'ємних та масових витрат природного газу на КС відповідає галузевим нормативним вимогам.

Список літератури:

1. Риболини Е.Е. Вихревой расходомер // *Метрология и измерительная техника*. 1988, № 9. С. 60–65.
2. Вихровий витратомір природного газу: пат. 100483 Україна : МКІ G 01 F 1/32 заявл. 18.02.15; опубл. 27.07.15. Бюл. № 14. 4 с.
3. Силин М. Д. Использование метода дорожки Кармана для создания вихревых расходомеров жидкости и газа: дис. ... канд. техн. наук: 15.13.01, 15.13.05. М., 2006. 26 с.
4. Кремлевский П.П. Расходомеры и счетчики количества. М.: Машиностроение, 1989. С. 440–443.
5. Лапин А.П., Дружков А.М., Кузнецова К.В. Вихревой метод измерения расхода: история вопроса и направления исследований. *Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника»*. 2014. Т. 14. № 3. С. 19–27.
6. Генкин М.Д., Соколова А.Г. Виброакустическая диагностика машин и механизмов. – М.: Машиностроение. 1987. 284 с.
7. Метод вимірювання витрати вихровим витратоміром Кармана та вихровий витратомір Кармана : пат. 204536 Японія : МКІ G01F 1/32; заявл. 29.05.20; опубл. 03.12.20.
8. Вихровий витратомір. пат. 14793 Україна : МКІ G01F1/32, опубл. 30.06.97. Бюл. № 14. 4 с.
9. А. с. СССР № 1392451 МКІ G01N 9/00. Дифференциальный вибрационный плотномер / Ю.К. Тараненко, В.И. Снегур, М.В. Кулаков, И.В. Кораблёв; заявл. 10.06.85; опубл. 30.04.88, Бюл. № 16.
10. Вихревые расходомеры. *Разработка и производство расходомеров, измерительных систем, поверочного оборудования ООО Прамень* : веб-сайт. URL : http://npropramen.ru/information/other-flowmeters/43-hydrodynamic-methods/10-vortex-flowmeters?jsn_setmobile=no (дата звернення 14.12.2022)
11. Самойлович Г.С., Яблоков Л.Д., Измерение периодически пульсирующих потоков в турбомашинах обычными пневмометрическими зондами. *Теплотехника*. 1970. № 9. С. 70-73.

Prokopenko O.O., Antonenko N.S., Huley O.B. VORTEX FLOW METER OF VOLUMETRIC AND MASS FLOW RATES OF NATURAL GAS OF THE GAS COMPRESSOR UNIT AT THE COMPRESSOR STATION

The article is devoted to the implementation of vortex methods in measuring the flow of natural gas by gas compressor units (GCU). The article presents an analysis of the physical mechanisms of vortex formation by the flow body in the gas flow and shows the principle of operation of the vortex flowmeter. Conducted literature search and analysis of known engineering solutions, examples of implemented vortex flowmeters are discussed and the task of improving their metrological characteristics and reliability of operation is grounded. A variant of a combined gas flowmeter (volumetric and mass) has been presented, in which the problem of improving the metrological characteristics of the measuring system formed by the flow body, vortex formation sensors, gas flow and the section of the gas pipeline body is solved at the apparatus level. To estimate gas density, a source of shock-impulse load is installed in the design of the measuring section. The source is made in the form of an electromagnet rod, the winding of which is supplied with an amplified signal from the output of the vortex formation frequency sensor. The rod creates an amplitude-modulated sequence of rectangular mechanical shock pulses. The frequency of passage of pulses is equal to the frequency of disruption of vortices. Impacts

of the rod cause vibration of the flow meter body. The self-oscillations of this body are evaluated using the spectral analysis of the piezoelectric vibration sensor signal. All this makes it possible to more accurately estimate the frequency of vortex formation, the natural frequency of oscillations of the body and the gas density. The accuracy of measurement of volume and mass flow of gas increases. Due to the controlled interaction of these elements, the metrological characteristics of the system (sensitivity, primary signal power, resistance to external disturbances) have been improved. The results of practical tests of the flowmeter have been presented, confirming the improvement of its metrological characteristics.

Key words: *vortex flow meter; turbulizer; Karman vortex track, vibration sensor; frequency, natural gas, resonance, flow rate.*

UDC 004.942; 519.6
 DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/30

Furtat I.E.

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

Furtat Yu.O.

Pukhov Institute for Modeling in Energy Engineering of NAS of Ukraine

DETERMINING PARAMETERS AND SIMULATING THE MOVEMENT OF THE TEMPERATURE FRONT IN NON-ISOTHERMAL FILTRATION

The dynamics of objects with distributed parameters are described using partial differential equations of the parabolic type, which with boundary conditions are mathematical models of many non-stationary nonlinear processes. Systems of equations of the parabolic type with the same boundary conditions were used to build mathematical models of heat and mass transfer.

The task is set to choose the optimal method of solving this or that field theory problem and the technical means of its implementation, taking into account the nonlinearity of real processes.

In the mathematical modeling of complex objects with distributed parameters, methods of discretization of the mathematical model by spatio-temporal quantization were used. The mathematical model of objects with distributed parameters is represented by systems of ordinary differential (or algebraic) equations, which allows them to be modeled on analog and digital computers.

It is assumed that the time of operation of the circulation system is limited by the time of reaching the temperature front of the production well. The conducted studies [1] established that the heat inflow from the rock massif surrounding the layer in real reservoir conditions does not have a significant effect on the time of operation of the circulation system in a constant temperature regime. Therefore, the heat inflow is neglected in the calculations. When extracting geothermal energy, pressure filtration takes place, in which the value of μ has a value of the order of 10-6 m-2. In this connection, the system enters the stationary mode in a time that is small compared to the time of its operation.

A method of modeling the movement of the temperature front using a differential model with transition to a finite-difference model is proposed. After calculating the first approximation of the value of the speed of movement of cold water, this value was refined using iterations on various parameters of the model.

Key words: mathematical model, temperature front, heat transfer agent.

Modeling the movement of the temperature front. If we assume that the temperature of the liquid changes in leaps and ranges from T_{hot} – the temperature of hot water to T_{cold} – the temperature of cold water, then the boundary B of the transition from one temperature to another is a temperature front. The filtration coefficient (in general, it can be piecewise-constant, that is, depending on the coordinates) when passing through the boundary B changes from K_{hot} – the filtration coefficient of hot water to K_{cold} – the filtration coefficient of cold water.

The following method of modeling the movement of the temperature front is proposed, based on the discontinuity of the fluid flow at the boundary B

$$-K_{cold} \left. \frac{\partial H_{cold}}{\partial n} \right|_B = -K_{hot} \left. \frac{\partial H_{hot}}{\partial n} \right|_B.$$

Taking into account all that was said above and considering the power of the layer as a piecewise-constant quantity, we proceed from the original system of differential equations [2, (1)-(2)] to the next system of equations

$$K_{cold} m \frac{\partial^2 H_{cold}}{\partial x^2} + K_{cold} m \frac{\partial^2 H_{cold}}{\partial y^2} = 0, \quad (1)$$

$$K_{hot} m \frac{\partial^2 H_{hot}}{\partial x^2} + K_{hot} m \frac{\partial^2 H_{hot}}{\partial y^2} = 0. \quad (2)$$

Let's discretize the system of equations (1) and (2) using finite-difference schemes. Then the system of equations for node i, j in the finite-difference form will have the form:

$$\frac{K_{cold} m}{h^2} [(H_{i+1,j}^{cold} - H_{i,j}^{cold}) + (H_{i-1,j}^{cold} - H_{i,j}^{cold}) + (H_{i,j+1}^{cold} - H_{i,j}^{cold}) + (H_{i,j-1}^{cold} - H_{i,j}^{cold})] = 0;$$

$$\frac{K_{hot} m}{h^2} [(H_{i+1,j}^{hot} - H_{i,j}^{hot}) + (H_{i-1,j}^{hot} - H_{i,j}^{hot}) + (H_{i,j+1}^{hot} - H_{i,j}^{hot}) + (H_{i,j-1}^{hot} - H_{i,j}^{hot})] = 0.$$

Let's enter the scale $H = K_H U + H_{min}$, we get

$$\frac{K_{cold} m}{h^2} (U_{i+1,j}^{cold} + U_{i-1,j}^{cold} + U_{i,j+1}^{cold} + U_{i,j-1}^{cold} - 4U_{i,j}^{cold}) = 0; \quad (3)$$

$$\frac{K_{hot} m}{h^2} (U_{i+1,j}^{hot} + U_{i-1,j}^{hot} + U_{i,j+1}^{hot} + U_{i,j-1}^{hot} - 4U_{i,j}^{hot}) = 0. \quad (4)$$

Kirchhoff's law for node i, j of the resistive grid will be written as follows

$$\frac{1}{R_{cold}} (U_{i+1,j}^{cold} + U_{i-1,j}^{cold} + U_{i,j+1}^{cold} + U_{i,j-1}^{cold} - 4U_{i,j}^{cold}) = 0; \quad (5)$$

$$\frac{1}{R_{hot}}(U_{i+1,j}^{hot} + U_{i-1,j}^{hot} + U_{i,j+1}^{hot} + U_{i,j-1}^{hot} - 4U_{i,j}^{hot}) = 0. \quad (6)$$

From equations (3)-(6), the following expressions can be obtained for grid resistances and currents simulating fluid flow

$$R_{cold} = \frac{K_R}{K_{cold}m}, R_{hot} = \frac{K_R}{K_{hot}m}, i = \frac{QU}{HK_{hot}mR_{hot}}.$$

The radial nature of the fluid flow near the wells is taken into account by the additional resistance, which is determined by the formula:

$$R_{add} = R \left(\frac{1}{2\pi} l_n \frac{h}{r_{well}} - \frac{1}{n} c t g \frac{\pi}{n} \right).$$

Methodology for modeling the system of equations (1)-(2) on we will consider the grid model using the example of a five-point model schemes placement of wells, and the number of nodes between wells is not plays a role to implement the method. Due to the symmetry of the problem, 1/8 of the block is considered.

Parameters of the movement of the temperature front. The determining factor is the speed of water running along the main flow line in the direction of grid nodes $i, j - i + 1, j + 1 - \dots - i + n, j + n$, etc.). The speed of water movement for the specific area under consideration is determined by the formula

$$v_{hot}^{i,j;i+1,j+1} = \frac{K_{hot} \Delta U_{hot}^{i,j;i+1,j+1} K_H}{lp},$$

where i, j are the indices of nodal points; $\Delta U_{hot}^{i,j;i+1,j+1}$ – potential difference between the corresponding nodal points; K_H – the scale of the dimensionality of the pressure function; l is the distance between the corresponding nodal points.

The rate of advance of the temperature front in this area is determined by the speed of movement of the coolant

$$v_T^{i,j;i+1,j+1} = \frac{v_{hot}^{i,j;i+1,j+1}}{f},$$

where f is a coefficient that takes into account the decrease in the speed of the temperature front in comparison with the hydrodynamic speed of the fluid's movement. Coefficient f is determined by the following dependence

$$f = \frac{c_0 \rho_0 (1-p) + c \rho p}{c_0 \rho_0 (1-p)} = 1 + \frac{c \rho p}{c_0 \rho_0 (1-p)}.$$

Then the time of movement of the temperature front along the considered area is determined by the formula

$$t^{i,j;i+1,j+1} = \frac{fl}{v_{hot}^{i,j;i+1,j+1}}.$$

speed of water running in the Y direction along the entire temperature front formed at the previous moment in time is determined by the formulas:

a) if movement in the Y direction starts from a nodal point

$$v_y^{i,j;i,j+1} = \frac{K_{hot} \Delta U_{hot}^{i,j;i,j+1}}{hp},$$

where $\Delta U_{hot}^{i,j;i,j+1}$ is the potential difference between the corresponding nodal points, h is the grid step;

b) if the movement of cold water begins between nodal points

$$v_y^{i,j;i,j+1} = \frac{K_{cold} \Delta U_y^{i,j;i,j+1} K_H (R_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'}{p (I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p (R_y^{i,j;i,j+1})'}$$

where $(R_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'$ is the resistance of the section of cold water between the corresponding nodal points at the previous time point along the Y axis, $(R_y^{i,j;i,j+1})'$ is the resistance of the entire water section between the corresponding nodal points at the previous time point along the Y axis, $(I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p$ is the distance traveled by the cold water at the previous time point.

Distances covered by the thermal front in the Y direction are determined by speed, taking into account time

$$I_{cold,y}^{i,j;i,j+1} = \frac{v_y^{i,j;i,j+1} t^{i,j;i+1,j+1}}{f} + (I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p.$$

If we $I_{cold,y}^{i,j;i,j+1} > h$, determine the time when the thermal front reaches the point

$$t_y^{i,j;i,j+1} = \frac{f \left[h - (I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p \right]}{v_y^{i,j;i,j+1}},$$

and

$$\Delta I_y^{i,j;i,j+1} = I_y^{i,j;i+1,j+1} - I_y^{i,j;i,j+1}.$$

Y axis

$$v_y^{i,j+1;i,j+2} = \frac{K_{hot} \Delta U_{y,hot}^{i,j+1;i,j+2} K_H}{ph}.$$

The distance traveled on this section is determined as

$$I_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2} = \frac{v_y^{i,j+1;i,j+2} \Delta t^{i,j;i,j+1}}{f}$$

etc. Then we form a front of cold water.

According to the configuration of the thermal front at the moment of time, the resistances of the electric grid in the Y and X directions are determined by the formulas:

$$R_y^{i,j;i,j+1} = R_{cold,y}^{i,j;i,j+1} + R_{hot,y}^{i,j;i,j+1} = R_{hot} \left(\frac{K_{hot} (I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p}{K_{cold} h} + \frac{I_{hot,y}^{i,j;i,j+1}}{h} \right);$$

$$R_x^{i,j;i+1,j} = \frac{R_{cold,x}^{i,j;i+1,j} \cdot R_{hot,x}^{i,j;i+1,j}}{R_{cold,x}^{i,j;i+1,j} + R_{hot,x}^{i,j;i+1,j}} = \frac{R_{hot} \frac{K_{hot}}{K_{cold}} h}{(F_{cold,x}^{i,j;i+1,j})'_p + \frac{K_{hot}}{K_{cold}} F_{hot,x}^{i,j;i+1,j}}$$

where $R_y^{i,j;i,j+1}$ and $R_x^{i,j;i+1,j}$ are the supports of the entire section between the corresponding nodal points (at the moment of time) along the Y and X axes, respectively, $(I_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p$ is the real distance occupied by cold water

due to the configuration of the thermal front, $R_{cold,y}^{i,j;i,j+1}$ and $R_{cold,x}^{i,j;i+1,j}$ are the supports of the sections of cold water between the corresponding nodal points (at the moment of time) along the Y and X axes, respectively, $l_{hot,y}^{i,j;i,j+1}$ is the distance occupied by hot water between the corresponding nodal points (at the moment of time) along the Y axis, $l_{hot,y}^{i,j;i,j+1} = h - (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_p$, $(F_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_p$ is the cross section occupied by cold water in the section modeled by the considered X resistance (at the current moment in time), $F_{hot,x}^{i,j;i+1,j}$ is the cross section occupied by hot water in the section simulated by the considered X resistance (at the current moment in time), $F_{hot,x}^{i,j;i+1,j} = h - (F_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_p$.

The values of the indicated resistances on the model are changed.

The speed of water running along the main flow line in cold water is calculated according to the formula

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})^* = \frac{K_{cold} (\Delta U_{cold}^{i,j;i+1,j+1})^* K_H}{lp},$$

where $(\Delta U_{cold}^{i,j;i+1,j+1})^*$ is the potential difference between the corresponding nodal points.

If the water velocity determined from the cold water matches the water velocity determined from the hot water, then this is a valid value of the velocity and all the data obtained do not need to be adjusted. If the values of the velocities determined by hot and cold water differ from each other, then there is a certain velocity according to the formula

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1 = \frac{v_{hot}^{i,j;i+1,j+1} + (v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})^*}{2}.$$

Then iterations are carried out until complete coincidence $(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n$ and $(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n^*$, where n is the iteration number.

The procedure for carrying out iterations to determine the speed of cold water:

1.1. First iteration. Determination of the speed of water running along the main flow line.

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1 = \frac{v_{hot}^{i,j;i+1,j+1} + (v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})^*}{2}.$$

1.n. nth iteration

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n = \frac{(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_{n-1} + (v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_{n-1}^*}{2}.$$

2.1. First iteration. Time it takes the water to pass the corresponding area.

$$t_1^{i,j;i+1,j+1} = \frac{fl}{(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1}.$$

2.n. nth iteration

$$t_n^{i,j;i+1,j+1} = \frac{fl}{(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n}.$$

3.1. First iteration. Determination of the speed of water running in the Y direction.

$$(v_y^{i,j;i,j+1})_1 = \frac{K_{cold} (\Delta U_{cold}^{i,j;i,j+1})_1 K_H R_{cold,y}^{i,j;i,j+1}}{p (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_p R_y^{i,j;i,j+1}}.$$

3.n. nth iteration

$$(v_y^{i,j;i,j+1})_n = \frac{K_{cold} (\Delta U_{cold}^{i,j;i,j+1})_n K_H (R_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_{n-1}}{p (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_{n-1,p} (R_y^{i,j;i,j+1})_{n-1}}.$$

4.1. First iteration. Determination of the distances traveled by the thermal front between the corresponding nodal points.

$$(l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_1 = \frac{(v_y^{i,j;i,j+1})_1 (t^{i,j;i+1,j+1})_1}{f} + (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p.$$

If $(l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_1 > h$, so

$$(t_y^{i,j;i,j+1})_1 = \frac{f \left[h - (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p \right]}{(v_y^{i,j;i,j+1})_1},$$

$$(\Delta t_y^{i,j;i,j+1})_1 = (t^{i,j;i+1,j+1})_1 - (t_y^{i,j;i,j+1})_1,$$

$$(v_y^{i,j+1;i,j+2})_1 = \frac{K_{cold} (\Delta U_y^{i,j+1;i,j+2})_1 K_H R_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2}}{p (l_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2})_p R_y^{i,j+1;i,j+2}},$$

$$(l_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2})_1 = \frac{(v_y^{i,j+1;i,j+2})_1 (\Delta t_y^{i,j;i,j+1})_1}{f}.$$

4.n. nth iteration

$$(l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_n = \frac{(v_y^{i,j;i,j+1})_n (t^{i,j;i+1,j+1})_n}{f} + (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p.$$

If $(l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_n > h$, so

$$(t_y^{i,j;i,j+1})_n = \frac{f \left[h - (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})'_p \right]}{(v_y^{i,j;i,j+1})_n},$$

$$(\Delta t_y^{i,j;i,j+1})_n = (t^{i,j;i+1,j+1})_n - (t_y^{i,j;i,j+1})_n,$$

$$(v_y^{i,j+1;i,j+2})_n = \frac{K_{cold} (\Delta U_y^{i,j+1;i,j+2})_n K_H (R_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2})_{n-1}}{p (l_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2})_{n-1} (R_y^{i,j+1;i,j+2})_{n-1}},$$

$$(l_{cold,y}^{i,j+1;i,j+2})_n = \frac{(v_y^{i,j+1;i,j+2})_n (\Delta t_y^{i,j;i,j+1})_n}{f}.$$

5.1. First iteration. According to the configuration of the thermal water front at the moment of time, the supports of the electric grid in the Y and X directions are determined.

$$(R_y^{i,j;i,j+1})_1 = (R_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_1 + (R_{hot,y}^{i,j;i,j+1})_1 = \frac{K_{hot} (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_{p,1} + (l_{hot,y}^{i,j;i,j+1})_1}{K_{cold} h};$$

$$(R_x^{i,j;i+1,j})_1 = \frac{(R_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_1 \cdot (R_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_1}{(R_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_1 + (R_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_1} = \frac{\frac{K_{hot} h}{K_{cold}}}{(F_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_{p,1} + \frac{K_{hot}}{K_{cold}} (F_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_1}.$$

5.n. nth iteration

$$(R_y^{i,j;i,j+1})_n = (R_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_n + (R_{hot,y}^{i,j;i,j+1})_n = \frac{K_{hot} (l_{cold,y}^{i,j;i,j+1})_{p,n} + (l_{hot,y}^{i,j;i,j+1})_n}{K_{cold} h};$$

$$(R_x^{i,j;i+1,j})_1 = \frac{(R_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_n \cdot (R_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_n}{(R_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_n + (R_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_n} = \frac{\frac{K_{hot} h}{K_{cold}}}{(F_{cold,x}^{i,j;i+1,j})_{p,n} + \frac{K_{hot}}{K_{cold}} (F_{hot,x}^{i,j;i+1,j})_{p,n}}.$$

6.1. – first iteration. The speed of water running along the main current line is recalculated.

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1^* = \frac{K_{cold} (\Delta U^{i,j;i+1,j+1})_1^* K_H}{ph}$$

A comparison is made with the speed obtained in paragraph 1.1 and, if there is a discrepancy between them, the average speed is determined.

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_2^* = \frac{(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1^* + (v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_1^*}{2}$$

6. n .n is the iteration

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n^* = \frac{K_{cold} (\Delta U^{i,j;i+1,j+1})_n^* K_H}{ph}$$

A comparison is made with the speed obtained in point 1.n and, if there is a discrepancy between them, the average speed is determined.

$$(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_{n+1}^* = \frac{(v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n^* + (v_{cold}^{i,j;i+1,j+1})_n^*}{2}$$

Speed value is found as a result of iterations, we move on to the next time step.

Conclusions. Differential or finite-difference models make it possible to effectively determine the parameters of the movement of the temperature front in the surrounding rocks with sufficient accuracy. But in case of complication of the configuration of the front or the area of heat and mass transfer, errors in input data and calculations begin to appear, which can significantly affect the accuracy of the final result. To reduce such errors, the possibility of switching to integro-differential or integral models is being considered for the problems of modeling the movement of the temperature front.

Bibliography:

1. Лялько В.И., Митник М.М. Исследование процессов переноса тепла и вещества в земной коре. К.: «Наукова думка», 1976. 152 с.
2. Фуртат И.Э., Фуртат Ю.О. Теплоперенос в подземных проницаемых пластах. *Current Issues and Prospects for the Development of Scientific Research*: матеріали III Міжнародної науково-практичної конференції (м. Орлеан, Франція, 19-20 серпня 2021 р.). Орлеан: Ері, 2021. С. 379-392.

Фуртат І.Е., Фуртат Ю.О. ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ТЕМПЕРАТУРНОГО ФРОНТУ ПРИ НЕІЗОТЕРМІЧНІЙ ФІЛЬТРАЦІЇ

Описано динаміку об'єктів з розподіленими параметрами з використанням диференціальних рівнянь в частинних похідних параболічного типу, які із крайовими умовами є математичними моделями багатьох нестационарних нелінійних процесів. Використано системи рівнянь параболічного типу з такими ж граничними умовами для побудови математичних моделей тепломасопереносу.

Поставлено задачу вибору оптимального методу розв'язку тієї або іншої задачі теорії поля і технічного засобу її реалізації з врахуванням нелінійності реальних процесів

При математичному моделюванні складних об'єктів з розподіленими параметрами використано методи дискретизації математичної моделі шляхом просторово-тимчасового квантування. Математичної моделі об'єктів з розподіленими параметрами представлено системами звичайних диференціальних (або алгебраїчних) рівнянь, що дозволяє моделювати їх на аналогових і цифрових обчислювальних машинах.

Прийнято, що час роботи циркуляційної системи обмежений часом досягнення температурним фронтом експлуатаційної свердловини. Проведеними дослідженнями [1] встановлено, що теплоприток від гірського масиву, що оточує шар, у реальних пластових умовах не виявляє істотного впливу на час роботи циркуляційної системи в постійному температурному режимі. Тому в розрахунках теплопритоком знехтовано. При добуванні геотермальної енергії має місце напірна фільтрація, при якій величина μ має значення порядку 10^{-6} м^2 . У зв'язку із цим система виходить на стаціонарний режим за час, малий в порівнянні з часом її роботи.

Запропоновано метод моделювання руху температурного фронту з використанням диференціальної моделі з переходом до кінцево-різницевої. Після обчислення першого наближення значення швидкості руху холодної води це значення уточнено з використанням ітерацій по різним параметрам моделі.

Ключові слова: математична модель, температурний фронт, теплоносій.

ХІМІЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 66.067.12:661.333]+542.8

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/31>

Золотарьова О.В.

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ПОТЕНЦІОМЕТРИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗКЛАДАННЯ ФОСФОРВМІСНОЇ СИРОВИНИ МІНЕРАЛЬНИМИ КИСЛОТАМИ

В науковій роботі розроблені методи дослідження, що мають експрес характер визначення потрібних речовин, і забезпечують високу точність і відтворюваність результатів; визначена швидкість розкладання апатитового концентрату азотною кислотою в залежності від концентрації, температури та часу її протікання; визначені кінетичні і активаційні параметри процесу азотнокислотного розкладання апатитового концентрату; досліджена розчинність кальційфосфатів, визначені можливі прийоми інтенсифікації кислотного розкладання апатитового концентрату; розроблена універсальна схема виробництва складних NPK-добрив з амідним азотом.

Розвиток тукової промисловості характеризується не тільки збільшенням кількості випущених добрив, розширенням їх асортименту, але й якісними перетвореннями.

В умовах ринкових відносин необхідне створення гнучкої технології виробництва складних NPK-добрив, що дозволяє здійснювати випуск різноманітних видів готового продукту з заданими властивостями на діючому обладнанні.

Для цього на початковому етапі необхідно відпрацювати технологію одержання складних добрив з регульованим складом з урахуванням діючого устаткування цехів з виробництва нітрофоски. Потім, при сприятливій матеріальній базі, перейти до створення нових виробництв з урахуванням досягнень науки та техніки.

Для реалізації цього напрямку необхідне знання не тільки макрокінетичних закономірностей процесу, а й визначення області протікання реакції, а також встановлення істиною кінетики.

З метою отримання цих відомостей необхідно розробити методи дослідження, що мають експрес характер визначення потрібних речовин, і забезпечують високу точність і відтворюваність результатів. Потім, вивчити швидкість розкладання апатитового концентрату азотною кислотою в залежності від концентрації, температури та часу її протікання; визначити кінетичні і активаційні параметри процесу азотнокислотного розкладання апатитового концентрату; вивчити розчинність кальційфосфатів, розглянути питання ретроградації фосфору та залежність розчинності кальційфосфатів від кислотності середовища; визначити можливі прийоми інтенсифікації кислотного розкладання апатитового концентрату; розробити універсальну схему виробництва складних NPK-добрив з регульованим складом.

Розроблено метод диференційованого визначення сильних кислот в їх суміші, в т.ч. в присутності іонів кальцію, в середовищі неводного розчинника в поєднанні з оригінальним прийомом посилення ступеня дисоціації фосфорної кислоти – введенням в аналізовану пробу дистильованої води;

За допомогою розроблених потенціометричних методів визначена швидкість розкладання апатитового концентрату азотною кислотою в інтервалі температур від 30 до 50°C, концентрації розкладального агента від 0,01 до 1,0 М і середнього розміру часток твердого реагенту від 0,05 до 1,6 мм. Встановлено:

- в початковий момент часу – справжня швидкість реакції підпорядковується першому порядку, що пояснюється розкладанням мінеральних домішок в апатитовому концентраті;
- через 120с від початку дослідження швидкість даної реакції підпорядковується нульовому порядку за протоном.

Розрахована і побудована діаграма розчинності кальційфосфатів і складу продукту в залежності від кислот, застосовуваних для розкладання, їх комбінацій і співвідношення $\text{CaO} : \text{P}_2\text{O}_5$.

Вивчення характеру розчинності сполук, що утворюються в процесі протікання реакції між апатитовим концентратом і кислотами, співвідношення кальцію до фосфору, кількісного співвідношення між кальцієм і сульфат-іоном, що забезпечує зв'язування кальцію в залежності від марки одержува-

ного добрива показало можливість одержання комплексних мінеральних добрив без виведення з реакційної суміші баластного кальцію.

Досліджено можливість отримання комплексних NPK-добрив з амідним азотом. Показана доцільність введення в нейтралізовану пульпу 60%-вого розчину карбаміду. Показано, що використання карбаміду в якості азотовмісного компонента підвищує агрохімічну ефективність і термостабільність зразків в порівнянні зі звичайною нітрофоскою, що необхідно в цілях пожежної безпеки при виробництві продукту.

На підставі проведених досліджень були отримані лабораторні зразки комплексного добрива. Фізико-хімічними методами аналізу встановлено, що вміст у них фосфатів в водо- і цитраторозчинній формах добре узгоджується з результатами розрахунків і, отримані зразки добрива не схильні до явища дефлаграції.

Ключові слова: потенціометричні дослідження, фосфоровмісна сировина, мінеральні кислоти, інтенсифікація, термостабільність.

Постановка проблеми. В останні роки розвиток тукової промисловості характеризується не тільки збільшенням кількості вироблених добрив, розширенням їх асортименту, але й якісними перетвореннями. В області виробництва NPK-добрив на перший план висувуються проблеми підвищення вмісту поживних речовин в готовому продукті, поліпшення фізико-хімічних і фізико-механічних властивостей добрив, розробки гнучкої технології отримання складних добрив на основі використання різних способів розкладання фосфоровмісної сировини. Альтернатива способів одержання складного добрива визначається економічними показниками та можливістю пристосування їх до існуючих методів виробництва. Асортимент NPK-добрив буде визначатися багатьма факторами: потребою сільського господарства, сировинними ресурсами, їх географічним розташуванням, ступенем економічності та прогресивності того чи іншого технологічного процесу, вимогами охорони навколишнього середовища від забруднення [1, с. 27].

Оцінюючи перспективи розвитку асортименту складних і комплексних добрив, доцільно зупинитися на тому, що мінеральні добрива, котрі випускаються в даний час, містять поживні речовини в формах, обґрунтованих агрохімією та фізіологією живлення рослин.

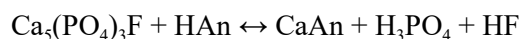
Необхідно взяти до уваги той факт, що внаслідок ерозії ґрунту щорічно втрачається така кількість елементів живлення рослин, яка дорівнює річному світовому виробництву мінеральних добрив. Тому поряд з розвитком виробництва добрив з високим вмістом в них поживних елементів, особливу увагу слід приділити підвищенню ефективності використання добрив. Для забезпечення оптимального розвитку рослин необхідно, щоб поживні речовини надходили в рослини в достатній кількості з самого початку й протягом усього вегетаційного періоду [2, с. 67]. Тому

здійснюються численні дослідження зі створення широкого асортименту добрив пролонгованої дії.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблеми дослідження розкладання фосфоровмісної сировини мінеральними кислотами та розробка технології одержання концентрованого NPK-добрива розглядалися у роботах Федюшкін Б. Ф., Почиталкіна І. А., Кобецької Н. Р. та інших вчених. Однак і сьогодні під час проведення експерименту, дана проблема викликає багато запитань.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка експрес-методу дослідження процесу кислотного розкладання апатитового концентрату з метою визначення макрокінетичних закономірностей процесу, а також області протікання реакції і встановлення істинною кінетики.

Виклад основного матеріалу дослідження. У процесі одержання фосфорних добрив з використанням в якості вихідної фосфатної сировини (apatитового концентрату) одним з важливих моментів є контроль за його ступенем розкладання, тобто співвідношення масової частки розчинних фосфатів (в перерахунку на P_2O_5) до їх загальної кількості, що вступила в процес. В даний час в літературі досить широко описані шляхи розкладання апатитового концентрату, в загальному вигляді цей процес описується рівнянням хімічної реакції:



в результаті чого одержують суміш азотної, фосфорної та плавикової кислот, що не прореагували, але повноту протікання реакції оцінюють за кількістю утвореної фосфорної кислоти.

Аналітично визначення вищевказаних форм фосфату проводиться, як правило, фотометричним методом, а за ним розраховується ступінь розкладання апатитового концентрату. Однак фотометричний метод визначення має ряд недоліків: трудомісткий і тривалий у виконанні, не враховує ступеня витрати кислоти, взятої на роз-

кладання мінеральної сировини та вплив домішок в реакційній суміші, не передбачає гальмування реакції, має досить велику похибку при високих ступенях конверсії.

Щоб уникнути зазначених труднощів були застосовані потенціометричні методи для вивчення процесу кислотного розкладання апатитового концентрату. Одним з яких є титрометричне визначення в неводному середовищі суміші кислот в пульпі, що одержують при кислотному розкладанні апатитового концентрату. Даний метод носить експрес-характер визначення, дає можливість одержання наочного зображення потенціометричних кривих, характерних для тієї чи іншої кислот. При титруванні точці еквівалентності кожної кислоти в досліджуваній суміші відповідає певне значення рН [3, с. 274].

Іншим потенціометричним методом є визначення досліджуваних іонів за допомогою іоноселективних електродів. Для встановлення залежності між потенціалом електрода та активністю або концентрацією визначуваних іонів будується емпірична калібрована крива. Експериментальні дані наносяться на папір з напівлогарифмічною сіткою, що дозволяє отримати в результаті лінійну залежність ($E - I_{ga}$) з кутом нахилу, що залежать від заряду іона та властивостей електрода.

Визначення суміші кислот, одержуваної в результаті кислотного розкладання апатитового концентрату, можливо проводити шляхом потенціометричного автоматичного титрування, що дозволяє збільшити точність і скоротити час виконання аналізу.

Для проведення даного методу аналізу була використана автоматична потенціометрична установка, що складається з аналітичної чарунки з електродами і магнітною мішалкою, іономіру І-130, автоматичної бюретки для титрування і самописця.

В основу роботи потенціометричної лабораторної установки покладено метод об'ємно-аналітичного визначення різних речовин з автоматичною фіксацією точки кінця титрування.

Процес титрування полягає в наступному: до визначеного об'єму аналізованої проби поступово додається титрант до тих пір, поки кількість речовин в суміші не досягне еквівалентного співвідношення (кінця точки титрування), що фіксується за зміною величини рН розчину. На самописці здійснюється запис кривих титрування в диференціальній формі, що полегшує знаходження точки кінця титрування, таким чином виходить крива титрування в координатах об'єм розчину – показання іономіру.

Принцип автоматичного потенціометричного титрування в основі має пропорційність і синхронізацію запису зміни рН зі швидкістю подачі титранта та рухом діаграми на самописці [4, с. 208].

При потенціометричному титруванні для вимірювання рН середовища використовується пара електродів: індикаторний скляний ЕСЛ-43-07 – служить для перетворення активності іонів водню водних розчинів в значення електрорушійної сили; допоміжний ЕВЛ-1МЗ.1. – призначений для створення опорного потенціалу при роботі в парі з індикаторним електродом. Калібрування електродів перед роботою проводиться за стандартними буферним розчинам згідно з інструкцією, що додається до приладу.

Методика виконання потенціометричного титрування

Перед початком робіт, знімається калібрувальна крива для розрахунку коефіцієнта діаграми, з тим, щоб використовувати його в подальших розрахунках концентрації кислот, які знаходяться в аналізованій пробі. Для цього в вимірювальну чарунку заливається визначена кількість фіксаналу соляної кислоти концентрацією 0,1 Н, яку відтитрують робочим розчином титранту (гідроксиду натрію). Коефіцієнт діаграми включає в себе значення нормальності титранту.

Далі, після визначення коефіцієнта діаграми, в вимірювальну комірку вноситься наважка досліджуваних розчинів. В залежності від аналізованої проби на бланку діаграми викреслюються криві, що містять в собі від одного до трьох різких переходів рН. Температурна компенсація здійснюється за допомогою автоматичного термокомпенсатором марки ТКА-2.

Щоб уникнути утворення градієнтів концентрації аналізованої проби або титранту застосовується перемішування за допомогою магнітної мішалки.

Методика іонометричного визначення концентрації протону без розділення суміші

В застосовуваному іонометричному методі для розшифровки сигналів іоноселективних електродів використовується градувальний графік, який, відповідно до рівняння Нернста-Тюріна, представляє собою залежність величини потенціалу електрода від логарифма активності потенціалоутворюючого іона. Для його побудови були виміряні потенціали скляного електрода в рівноважних модельних розчинах, що містять іони H^+ в кількостях, близьких до тих, які, ймовірно, існують при азотнокислотному розкладанні апатитового концентрату. Вихідний склад модельних розчинів представлений в табл. 1.

Таблиця 1
Склад модельних розчинів для побудови градувального графіка

№ модельного розчину	1	2	3	4	5
Вихідні концентрації азотної кислоти, моль/л	0,01	0,001	0,05	0,005	0,5

З метою контролю ходу взаємодії апатитового концентрату з азотною кислотою в інтервалі температур 25-50°C, для скляного електрода були побудовані градувальні залежності при температурах 25, 30, 35, 40, 45, 50°C. Паралельні вимірювання потенціалів проводилися не менше 5 разів.

Градувальний графік для T = 25°C.

У табл. 2 наведені результати вимірювань потенціалів іоноселективних електродів в модельних розчинах і розраховані логарифми активностей потенціаловизначальних іонів.

Таблиця 2
Результати вимірювання потенціалів іоноселективних електродів (скляний електрод)

№ модельного розчину	1	2	3	4	5
Логарифм активності, lgH ⁺	-2,01	-1,64	-1,37	-1,06	-0,46
Середнє значення потенціалу (E), мВ	0,2952	0,3234	0,3412	0,3644	0,4064

У разі азотнокислотного розкладання фосфатної сировини, скляний електрод реєструє активність іонів водню в реакційній суміші в процесі динамічного переходу системи з простої в складну за складом. Іонметричне визначення концентрації протона проводилося при постійній іонній силі розчину. Різниця потенціалу, що виникає при вимірюванні рН реакційної суміші прямо пропорційна активності іонів водню [5, с. 689].

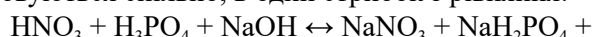
Роздільне визначення сильних мінеральних кислот в їх суміші потенціометричним титруванням

Сутність розробленої методики полягала в створенні модельної суміші та визначенні змісту кожної речовини, що знаходиться в ній. Наявність компонентів в суміші визначалася шляхом розкладання апатитового концентрату.

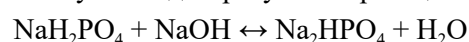
Моделювання кислотної витяжки здійснювалося приготуванням сумішей азотної та фосфорної, фосфорної та сірчаної, азотної, фосфорної та сірчаної кислот різних концентрацій. Після чого,

отримані суміші відтитровували розчином гідроксиду натрію в водному середовищі.

Визначення водних розчинів суміші сильних кислот простим титруванням не представляється можливим. У воді азотна кислота дисоціює без остачі. Значення константи дисоціації для фосфорної кислоти за першим ступенем дорівнює $7,1 \cdot 10^{-3}$, звідси очевидно, що ці кислоти відтитровуються спільно, в один стрибок з рівняння:



Константа дисоціації H_3PO_4 за другим ступенем дорівнює $6,2 \cdot 10^{-8}$. Оскільки, співвідношення значень констант дисоціації між першим і другим ступенями становить більше чотирьох порядків, необхідних для диференційованих стрибків титрування, то другий ступінь відтитровують за реакцією:

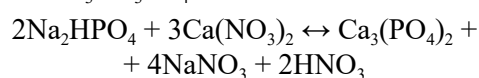


і буде давати самостійний стрибок.

Одним з можливих шляхів диференційованого визначення концентрації кислот в потенціометричному титруванні є метод заміни розчинника. Експериментально було встановлено, що при використанні різних розчинників найкращі результати отримані при титруванні в середовищі ацетону, діелектрична проникність якого в чотири рази менше, ніж у воді і становить 20 одиниць.

У середовищі диметилкетону отримали добре помітний стрибок титрування, відповідний азотній кислоті. Однак, внаслідок зменшення дисоціації фосфорної кислоти важко ідентифікувати стрибок, відповідний I-му ступеню дисоціації фосфорної кислоти, вона дає менш виражений перехід рН. Для підвищення роздільної здатності визначення H_3PO_4 , застосований метод заміни розчинника, що полягає у введенні в аналізовану суміш після повного відтитрування азотної кислоти деякої кількості води. Цей прийом дозволяє підвищити точність визначення за рахунок більш різкого стрибка титрування.

При моделюванні азотнокислотної витяжки спостерігалися відмінності в результатах титрування, що пояснюється зміною характеру реакції нейтралізації зі зростанням значень рН в присутності солей кальцію. Збільшення рН середовища супроводжується зменшенням розчинності солей кальцію. У початковий момент титрування взаємодія HNO_3 і H_3PO_4 .



За реакцією видно, що виділяється вільна азотна кислота, яку в свою чергу, відтитровують спільно з II-м ступенем фосфорної кислоти, що є причиною спотворення картини титру-

вання. Щоб уникнути цього явища, були зроблені спроби замаскувати іони кальцію. З цією метою в модельну суміш вводили комплексоутворювальну сполуку – сульфат натрію. Експериментальним методом підібраний дворазовий надлишок сульфату натрію по відношенню до нітрату кальцію, це дозволило отримати чітко виражені переходи рН на потенціограмі.

Оскільки розкладання апатитового концентрату можливо здійснювати сумішшю сірчаної та фосфорної кислот виникає необхідність їх визначення в суміші. Сірчана кислота є сильною мінеральною кислотою, в воді вона за I-м ступенем дисоціює без остачі, за II-м ступенем значення константи дисоціації дорівнює $1,15 \cdot 10^{-2}$, отже, в водному середовищі вона відтитровується в один стрибок. Константа дисоціації H_3PO_4 за першим ступенем дорівнює $7,1 \cdot 10^{-3}$, отже при одночасній присутності цих кислот в суміші сірчана кислота за обома ступенями та фосфорна кислота за I-ми ступенем відтитровується в один стрибок, другий ступінь H_3PO_4 відтитровується в другому стрибку, що підтверджується експериментально.

Дослідження кінетики розкладання апатитового концентрату іонометричним методом із використанням скляного електроду

Початковою стадією одержання складних NPK-добрих є розкладання фосфорвмісного мінералу сильною кислотою. Незважаючи на наявну велику промислову практику отримання подібних добрив і незліченну кількість робіт, присвячених вивченню цієї тематики, питання про основні закономірності реакцій, що протікають в процесі переробки апатитового концентрату вивчений в недостатній мірі.

У даній роботі було проведено дослідження кінетики азотнокислотного розкладання апатитового концентрату. Для підвищення надійності та відтворюваності експериментальних даних за допомогою ситового аналізу були виділені 10 монофракцій твердого реагенту. Вивчення кінетики розкладання апатиту азотною кислотою проводили в реакційному обсязі 100 мл, маса наважки твердого реагенту склала 0,5 г; досліджували процес кислотного розкладання для 7 вихідних концентрацій азотної кислоти в інтервалі температур 30-50°C.

Для топохімічних реакцій, до яких відноситься азотнокислотне розкладання апатиту найбільш характерною є зовнішньодифузійна область протікання реакції, швидкість якої визначається, в основному, дифузиею речовини з об'єму рідкого реагенту до поверхні часток. Оскільки зазначена область протікання реакції є найбільш повільною з усіх можливих, то усунення зовнішньодифузій-

ного гальмування необхідно як для інтенсифікації промислових процесів, так і для вивчення механізму взаємодії кислот з твердими реагентами. Бажаного результату можна досягти організацією в реакційному об'ємі такого гідродинамічного режиму (підвищення критерію Рейнольдса), який би забезпечив мінімальну різницю концентрацій на поверхні частки апатиту і в об'ємі, а також мінімальну товщину дифузійного шару. В силу вищесказаного, неодмінною умовою для виходу в кінетичну область було створення інтенсивного перемішування, що забезпечує рівномірне підведення-відведення речовин в реакційному об'ємі.

Дослідження залежності розчинності кальцій фосфатів від різних факторів

Одним з найпоширеніших джерел фосфору для виробництва комплексних NPK-добрих є апатит, що містить в своєму складі найбільшу кількість цільового компонента з усіх доступних фосфорвмісних мінералів. Однак, при цьому в його складі знаходиться близько 40% кальцію, який в разі невиведення його з системи, є баластом в одержуваному добриві. У процесах отримання добрив, що використовують технології виведення кальцію в вигляді його сполук, сумарний вміст поживних речовин (N, P, K) може перевищувати 50%, однак ціна таких добрив значна. Добрива, що містять баластовий кальцій, набагато дешевші, але сума поживних компонентів при цьому, не набагато більше 30%.

Одним з основних завдань при отриманні фосфорних добрив є переведення фосфатів з фосфорвмісної сировини в розчинну або цитратно-розчинну форму. Більшість сполук, що містять кальцієві та фосфатні іони малорозчинні або нерозчинні у воді. Добуток розчинності монокальційфосфату ($Ca(H_2PO_4)_2$) дорівнює $1 \cdot 10^{-3}$, дикальційфосфату ($CaHPO_4$) – $2,7 \cdot 10^{-7}$, трикальційфосфату ($Ca_3(PO_4)_2$) – $2,0 \cdot 10^{-29}$.

Розчинність кальційфосфатів має оборотний характер і, як для більшості солей, що гідролізуються, залежить від кислотності середовища. Чим менше значення константи дисоціації або добуток розчинності солі, тим більшою мірою кислотність середовища позначається на розчинності солі.

Крім того, розчинність фосфатів кальцію залежить від співвідношення концентрацій фосфатних іонів і іонів кальцію. В трикальційфосфаті теоретичне еквівалентне співвідношення Ca^{2+} до PO_4^{3-} становить 1,5, а в апатиті – 1,67.

Таким чином, варіюючи кислотність середовища і концентрацією іонів кальцію в розчині можна регулювати частку розчинної частини фосфатів (табл. 3).

Залежність розчинності кальційфосфатів від концентрації іонів кальцію та кислотності середовища

рН	Значення коефіцієнта а					
	1,67	1,5	1,0	0,75	0,5	0,25
3,5	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$	$2,12 \cdot 10^{-2}$	$2,52 \cdot 10^{-2}$	$3,22 \cdot 10^{-2}$	$4,88 \cdot 10^{-2}$
4,0	$3,9 \cdot 10^{-3}$	$4,16 \cdot 10^{-3}$	$5,33 \cdot 10^{-3}$	$6,34 \cdot 10^{-3}$	$8,1 \cdot 10^{-3}$	$1,22 \cdot 10^{-2}$
4,5	$9,78 \cdot 10^{-4}$	$1,05 \cdot 10^{-3}$	$1,34 \cdot 10^{-3}$	$1,59 \cdot 10^{-3}$	$2,03 \cdot 10^{-3}$	$3,08 \cdot 10^{-2}$
5,0	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$2,04 \cdot 10^{-3}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$4,0 \cdot 10^{-3}$	$5,1 \cdot 10^{-3}$	$7,73 \cdot 10^{-2}$

Розраховуючи розчинність трикальційфосфату для умов амонізації пульпи, отриманої азотно-кислотним розкладанням апатиту знаходимо, що випадання осаду солі спостерігається при рН = 3,5-3,8. При здійсненні реакції нейтралізації кислотність середовища оцінюють, як правило, за значенням рН 10%-вого розчину амонізованої пульпи, тобто істинна величина водневого показника в суміші на одиницю менше. Однією з основних вимог до добрив є їх кислотно-основна нейтральність, тобто значення рН пульпи після нейтралізації продуктів кислотного розкладання апатиту повинна бути близько семи, на жаль, ця умова неможлива через можливість протікання реакції ретроградації фосфорних сполук, яка описується рівнянням:



Утворення нерозчинних солей можливо в тому випадку, якщо вміст утвореного кальційфосфатів перевищує їх розчинність [5, с. 723].

Розв'язання цієї нерівності для стехіометричного співвідношення реагентів і концентрації вихідної мінеральної кислоти 1 моль/л дає значення ступеня розкладання більш 0,99, а при застосуванні надлишку кислоти або її більш високої концентрації, величина X прагне до одиниці. Отже, за відсутності зовнішньодифузійних труднощів розкладання апатитового концентрату концентрованими мінеральними кислотами, що не утворюють нерозчинних сполук, протікає практично без остачі в кінетичній області.

Основним напрямом, що дозволяє знизити кислотність готового продукту (підвищити рН середовища на стадії амонізації пульпи) є зменшення концентрації іонів кальцію в суспензії після розкладання апатиту. В виробництві нітрофоски для досягнення цієї мети іони кальцію зв'язують в CaSO_4 , розчинність якого не залежить від кислотності середовища.

На практиці, для забезпечення рівномірного введення аміаку в азотнокислотну витяжку застосовують каскад реакторів, в яких відбувається

поступове збільшення рН середовища до заданого значення, що дорівнює 4,5.

Висновки. Розроблено метод диференційованого визначення сильних кислот в їх суміші, в т.ч. в присутності іонів кальцію, в середовищі неводного розчинника в поєднанні з оригінальним прийомом посилення ступеня дисоціації фосфорної кислоти – введенням в аналізовану пробу дистильованої води;

За допомогою розроблених потенціометричних методів визначена швидкість розкладання апатитового концентрату азотною кислотою в інтервалі температур від 30 до 50°C, концентрації розкладального агента від 0,01 до 1,0 М і середнього розміру часток твердого реагенту від 0,05 до 1,6 мм. Встановлено:

- в початковий момент часу – справжня швидкість реакції підпорядковується першому порядку, що пояснюється розкладанням мінеральних домішок в апатитовому концентраті;
- через 120с від початку досліду швидкість даної реакції підпорядковується нульовому порядку за протоном.

Вивчення характеру розчинності сполук, що утворюються в процесі протікання реакції між апатитовим концентратом і кислотами, співвідношення кальцію до фосфору, кількісного співвідношення між кальцієм і сульфат-іоном, що забезпечує зв'язування кальцію в залежності від марки одержуваного добрива показало можливість одержання комплексних мінеральних добрив без виведення з реакційної суміші баластного кальцію.

Досліджено можливість отримання комплексних НРК-добрив з амідним азотом. Показана доцільність введення в нейтралізовану пульпу 60%-вого розчину карбаміду. Показано, що використання карбаміду в якості

азотовмісного компонента підвищує агрохімічну ефективність і термостабільність зразків в порівнянні зі звичайною нітрофоскою, що необхідно в цілях пожежної безпеки при виробництві продукту.

Список літератури:

1. Технология фосфорных и комплексных удобрений / М. В. Андреев, А. А. Бродский, Ю. А. Забелешинский [и др.]; под ред. С. Д. Эвенчика. М.: Химия, 1987. 496 с.
2. Позин М. Е. Технология минеральных солей (удобрений, пестицидов, промышленных солей, окислов и кислот). Ч. 2. / М. Е. Позин. Л.: Химия, 1974. 768 с.
3. Эвенчик С. Д., Бродский А. А. Технология фосфорных и комплексных удобрений: учеб. Пособие. М.: Химия, 1987. 464 с.
4. Кочетков В.Н. Фосфоросодержащие удобрения. Справочник / В.Н. Кочетков. М.: Химия, 1982. 400 с.
5. Постников Н. Н. Термическая фосфорная кислота, соли и удобрения на ее основе / Н. Н. Постников. Л.: Химия, 1970. 1555 с.

Zolotarova O.V. POTENTIOMETRIC STUDIES OF THE DECOMPOSITION OF PHOSPHORUS-CONTAINING MATERIALS BY MINERAL ACIDS

Research methods have been developed in the scientific work, which have an express nature of determining the necessary substances, and ensure high accuracy and reproducibility of the results; the rate of decomposition of apatite concentrate by nitric acid was determined, depending on the concentration, temperature and time of its flow; determined kinetic and activation parameters of the process of nitric acid decomposition of apatite concentrate; the solubility of calcium phosphates was studied, possible methods of intensification of acid decomposition of apatite concentrate were determined; a universal scheme for the production of complex NPK-fertilizers with amide nitrogen was developed.

The development of the fertilizer industry is characterized not only by an increase in the quantity of released fertilizers, an expansion of their assortment, but also by qualitative transformations.

In the conditions of market relations, it is necessary to create a flexible technology for the production of complex NPK-fertilizers, which allows the production of various types of finished products with specified properties on existing equipment.

For this, at the initial stage, it is necessary to work out the technology of obtaining complex fertilizers with an adjustable composition, taking into account the existing equipment of workshops for the production of nitrophosphate. Then, with a favorable material base, it is important to turn to the creation of new industries taking into account the achievements of science and technology.

In order to implement this direction, it is necessary to know not only the macrokinetic patterns of the process, but also the determination of the reaction area, as well as establishing the truth of the kinetics.

For obtaining this information, it is necessary to develop research methods that have an express nature of determining the necessary substances and ensure high accuracy and reproducibility of the results. Then, it is crucial to study the rate of decomposition of apatite concentrate by nitric acid depending on the concentration, temperature and time of its flow; to determine the kinetic and activation parameters of the process of nitric acid decomposition of apatite concentrate; to study the solubility of calcium phosphates, to consider the issue of retrogradation of phosphorus and the dependence of the solubility of calcium phosphates on the acidity of the environment; to determine possible methods of intensification of acid decomposition of apatite concentrate; to develop a universal scheme for the production of complex NPK-fertilizers with an adjustable composition.

A method of differential determination of strong acids in their mixture was developed, including in the presence of calcium ions, in the medium of a non-aqueous solvent in combination with the original technique of increasing the degree of dissociation of phosphoric acid, i.e. the introduction of distilled water into the analyzed sample.

Using the developed potentiometric methods, the rate of decomposition of apatite concentrate by nitric acid was determined in the temperature range from 30 to 50°C, the concentration of the decomposing agent from 0.01 to 1.0 M, and the average particle size of the solid reagent from 0.05 to 1.6 mm. It is installed:

- at the initial moment of time - the true reaction rate is subject to the first order, which is explained by the decomposition of mineral impurities in the apatite concentrate;
- after 120s from the beginning of the experiment, the rate of this reaction is subject to the zero order of the proton.

A diagram of the solubility of calcium phosphates and the composition of the product depending on the acids used for decomposition, their combinations and ratio $\text{CaO} : \text{P}_2\text{O}_5$ was calculated and constructed.

The study of the nature of the solubility of compounds formed during the reaction between apatite concentrate and acids, the ratio of calcium to phosphorus, the quantitative ratio between calcium and sulfate ion, which ensures the binding of calcium depending on the brand of the received fertilizer; showed the possibility of obtaining complex mineral fertilizers without removal of ballast calcium from the reaction mixture.

The possibility of obtaining complex NRK-fertilizers with amide nitrogen was investigated. The expediency of introducing a 60% urea solution into the neutralized pulp was shown. It was shown that the use of urea

as nitrogen-containing component increases the agrochemical efficiency and thermal stability of the samples in comparison with the usual nitrophosphate, which is necessary for the purposes of fire safety during the production of the product.

On the basis of the conducted research, laboratory samples of complex fertilizer were obtained. Physico-chemical methods of analysis established that the content of phosphates in water- and citrate-soluble forms is in good agreement with the results of calculations, and the obtained fertilizer samples are not prone to the phenomenon of deflagration.

Key words: *potentiometric studies, phosphorus-containing materials, mineral acids, intensification, thermal stability.*

UDC 662.74.001.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/32>**Kutovyi D.S.**

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

Kazakov V.V.

National Technical University “Kharkiv Polytechnic Institute”

OPTIMIZATION OF THE GASIFICATION PROCESS OF LOW-METAMORPHOSED COAL: REGRESSION ANALYSIS

In recent decades, global changes in the world's natural environment have become a significant restraining factor in the development of society, which requires the development of scientific approaches to reducing the negative technogenic impact on the environment. The need to establish a balance between meeting the modern needs of humanity and protecting the interests of future generations requires the harmony between social, economic, and ecological components of the transformation of society. In European countries, particularly in Ukraine, environmental risks are mainly caused by the industrial sector. The production activity of coal industry enterprises leads to a significant territorial deterioration of the environment. Therefore, increasing environmental safety in the direction of energy development of Ukraine is relevant, has practical significance, and involves research on the creation of ecological methods of thermochemical processing of substandard carbon-containing raw materials.

The article provides a comprehensive analysis of the gasification process of a solid product obtained by the thermolysis of low-metamorphosed coal. The article's main goal is to optimize the gasification process parameters depending on the intended use of the obtained gas, using regression analysis. To solve this problem and explore different approaches to its solution, the latest research and publications in this field were analyzed.

The article presents the obtained regression equations for determining the degree of influence of various technological conditions on the final parameters of the gasification process. Each regression equation is presented as a graph that provides a visual representation of the data and makes it easier for readers to understand the relationships between variables.

The unsolved parts of the general problem, which are investigated in the article, are shown. The challenges and limitations of current approaches are reviewed and future directions for research in this area are outlined.

The authors' detailed analysis and approach to solving the problem make this article a valuable scientific resource for scientists and energy specialists and can serve as a basis for further research on the parameters of the gasification process depending on the intended use of the obtained gas.

Key words: gasification, thermolysis, low-metamorphosed coal, optimization, process conditions, regression equations, energy industry.

Formulation of the problem. The problem of optimizing the gasification process of solid products from the thermolysis of low-metamorphosed coal is a crucial challenge in the energy industry. The production of gas, which can be used for various purposes such as energy production, methanol production, or other chemical processes, requires precise control of process conditions. These conditions, such as air and steam consumption, the temperature in the reaction zone, and the residence time of the material, have a significant impact on the yield and composition of the resulting gas. The article aims to present regression equations that capture the relationship between process conditions and the final parameters of the gasification process, as well as to provide insights into how these parameters can be optimized for different uses of the resulting gas

through graphs that demonstrate the degree of the process conditions' influence. This research provides a valuable contribution to the scientific and practical tasks of improving the efficiency and sustainability of energy production through the gasification process of solid products from the thermolysis of low-metamorphosed coal.

An analysis of the latest research and publications. Research, modernization, and improvement of the processes of gasification of carbon-containing raw materials to increase their energy efficiency is an urgent task for the development of Ukrainian industry. The importance of this problem is emphasized in many other publications [1–2, 4–6]. However, there are still certain difficulties in the development of modern technologies, namely their large volume, and cost. The current direction of

research in this field is aimed at reducing their volume and costs. The use of mathematical modeling allows you to implement this approach, choose and make a choice of rational process parameters.

Formulation of the goals of the article. The article aims to present the regression equations for the gasification process of the solid product of thermolysis of low-metamorphosed coal and to analyze the effect of process parameters (air consumption, steam consumption, temperature, residence time) on the yields of various gases (methane, carbon dioxide, hydrogen, carbon monoxide, nitrogen, oxygen) as well as the final parameters of the process (dry gas yield, humidity, net calorific value, density, the conversion rate of carbon, the conversion rate of steam). The article also aims to provide insights on how to optimize these parameters to achieve the best gas for different purposes (methanol production, energy industry).

Outline of the main research material. Table 1 provides technological parameters and results of 20 laboratory experiments on the gasification of the

solid product of thermolysis of low-metamorphosed coal carried out by the authors, where x_1 is air consumption, l/100g of the solid product, x_2 is steam consumption, g/100g of the solid product, x_3 is the temperature in the reaction zone, ° C, x_4 – residence time of the material in the reaction zone, min.

Data analysis in the Minitab® software yielded the following regression equations describing the available data.

Composition of dry gas:

• Methane

$$CH_4 = 6,35 - 0,017x_1 - 0,01x_2 - 0,005x_4 + 0,000015x_1^2$$

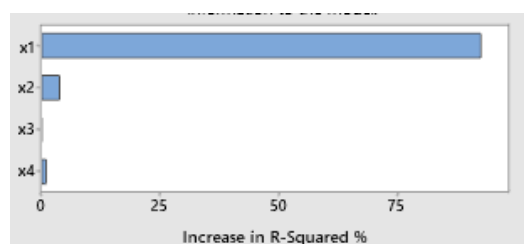


Fig. 1. Influence of initial parameters on methane yield

Table 1

№	Technological factors of the process				Composition of dry gas, % vol						Dry gas properties				Conversion rate, %	
	x1	x2	x3	x4	CH ₄	CO ₂	H ₂	CO	N ₂	O ₂	Yield, m ³ /kg semi-coke	Humidity, g/m ³	Net calorific value, MJ/m ³	Density, g/m ³	Carbon	Steam
1	500	80	1000	60	0,5	11,7	12,3	18,0	51,7	1,1	4,21	138	3,6	1198	95,8	25,0
2	300	80	1000	60	1,4	10,3	12,8	21,4	50,9	0,4	4,71	134	4,9	1043	96,4	21,8
3	500	60	1000	60	0,7	13,9	15,8	16,0	54,6	1,6	4,09	67	3,8	1236	91,2	44,5
4	300	60	1000	60	1,7	11,1	16,4	20,4	56,5	0,8	4,44	70	4,8	1130	99,3	40,1
5	500	80	800	60	0,5	11,5	16,4	17,9	56,4	1,1	4,73	98	4,1	1140	101,1	42,9
6	300	80	800	60	1,4	11,5	16,1	20,5	51,8	0,7	4,65	132	5,2	1086	92,0	29,8
7	500	60	800	60	0,7	16,2	17,2	14,4	50,2	1,4	4,18	65	4,1	1107	88,9	48,3
8	300	60	800	60	1,6	11,5	15,2	18,5	47,9	0,4	4,93	65	4,8	1093	96,7	51,6
9	500	80	1000	40	0,5	13,1	13,7	16,5	56,8	1,5	4,19	156	3,7	1151	93,4	23,3
10	300	80	1000	40	1,6	10,9	12,6	19,7	55,0	0,1	3,92	157	4,8	1186	100,3	17,9
11	500	60	1000	40	0,8	14,8	14,1	12,5	52,8	0,9	4,24	80	3,3	1265	89,5	33,4
12	300	60	1000	40	1,9	11,9	13,4	15,6	49,7	0,9	4,38	96	4,3	1066	80,3	34,3
13	500	80	800	40	0,6	16,7	13,8	14,6	52,8	1,6	4,47	130	3,5	1292	95,6	27,4
14	300	80	800	40	1,6	14,0	15,0	15,3	54,4	0,1	4,68	121	3,9	1279	91,5	29,3
15	500	60	800	40	0,8	16,6	14,9	10,6	50,9	1,1	4,31	76	3,2	1076	83,3	39,0
16	300	60	800	40	1,9	14,3	13,9	14,1	49,4	0,5	4,02	83	4,0	1061	90,9	42,3
17	400	70	900	50	1,0	14,2	14,2	14,7	52,7	1,0	4,26	126	3,9	1206	77,5	21,4
18	400	70	900	50	1,2	14,0	12,2	16,6	52,4	1,1	3,76	138	4,1	1267	88,4	17,2
19	400	70	900	50	0,9	14,2	12,1	14,4	60,2	1,1	4,45	134	3,8	1168	86,3	20,4
20	400	70	900	50	0,9	14,4	12,8	13,9	52,3	1,3	3,91	123	3,7	1235	82,5	19,5

Analyzing the equation and Fig. 1 we can see that air consumption (x_1) has a negative linear effect and a positive quadratic effect on the methane yield. An increase in air consumption will reduce the methane yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x_2) also has a negative linear effect on methane yield. An increase in steam consumption will reduce the methane yield.

The temperature in the reaction zone (x_3) does not affect the methane yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x_4) has a negative linear effect on methane yield. An increase in residence time will reduce the methane yield.

- Carbon dioxide

$$\text{CO}_2 = -8,49 + 0,1806x_1 - 0,0688x_2 - 0,00712x_3 - 0,0787x_4 - 0,000209x_1^2$$

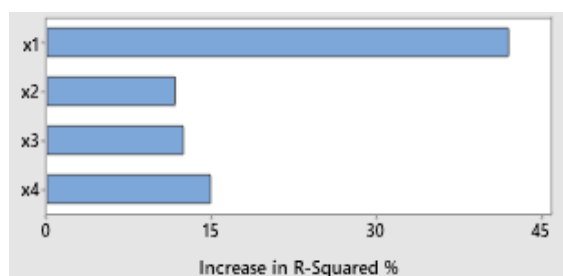


Fig. 2. Influence of initial parameters on the yield of carbon dioxide

Looking at the equation and Fig. 2 it is clear that air consumption (x_1) has a positive linear effect and a negative quadratic effect on the carbon dioxide yield. An increase in air consumption will increase the carbon dioxide yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x_2) has a negative linear effect on carbon dioxide yield. An increase in steam consumption will reduce the carbon dioxide yield.

The temperature in the reaction zone (x_3) has a negative linear effect on carbon dioxide yield. An increase in temperature will reduce the carbon dioxide yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x_4) has a negative linear effect on carbon dioxide yield. An increase in residence time will reduce the carbon dioxide yield.

- Hydrogen

$$\text{H}_2 = 43,62 - 0,1278x_1 - 0,05063x_2 - 0,004062x_3 + 0,03562x_4 + 0,000161x_1^2$$

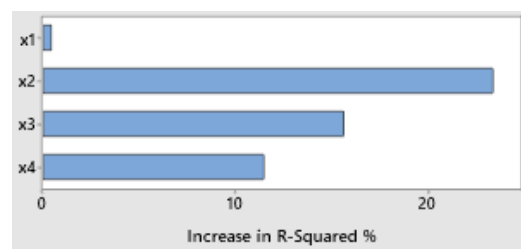


Fig. 3. Influence of initial parameters on hydrogen yield

Judging from the equation model for hydrogen and Fig.1 we can see that air consumption (x_1) has a negative linear effect and a positive quadratic effect on the hydrogen yield. An increase in air consumption will reduce the hydrogen yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases. Change in air consumption almost does not impact hydrogen yield.

Steam consumption (x_2) has a negative linear effect on hydrogen yield. An increase in steam consumption will reduce the hydrogen yield.

The temperature in the reaction zone (x_3) has a negative linear effect on hydrogen yield. An increase in temperature will reduce the hydrogen yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x_4) has a positive linear effect on hydrogen yield. An increase in residence time will increase the hydrogen yield.

- Carbon monoxide

$$\text{CO} = 20,76 - 0,1564x_1 + 0,1238x_2 + 0,01363x_3 + 0,1562x_4 + 0,000174x_1^2$$

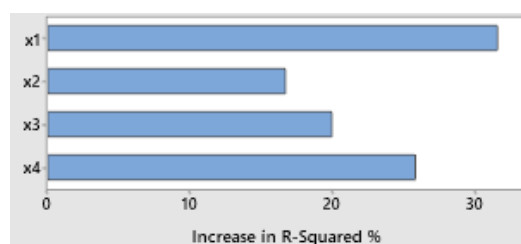


Fig. 4. Influence of initial parameters on the output of carbon monoxide

By looking at the equation and Fig. 4 we can say that air consumption (x_1) has a negative linear effect and a positive quadratic effect on the carbon monoxide yield. An increase in air consumption will reduce the carbon monoxide yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x_2) has a positive linear effect on carbon monoxide yield. An increase in steam consumption will increase the carbon monoxide yield.

The temperature in the reaction zone (x_3) has a positive linear effect on carbon monoxide yield.

An increase in temperature will increase the carbon monoxide yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a positive linear effect on carbon monoxide yield. An increase in residence time will increase the carbon monoxide yield.

The influence of parameters fluctuates from 17% (steam consumption) to 32% (air consumption).

• Nitrogen

$$N_2 = 40,35 + 0,0981x_1 - 0,1125x_4 - 0,000117x_1^2$$

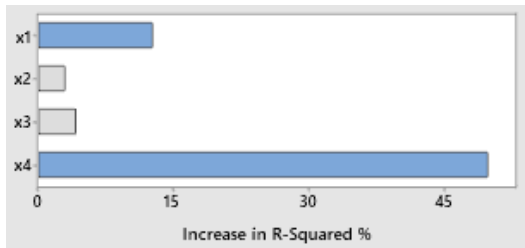


Fig. 5. Influence of initial parameters on nitrogen yield

From the equation and Fig. 5, we can see that Air consumption (x1) has a positive linear effect and a negative quadratic effect on the nitrogen yield. An increase in air consumption will increase the nitrogen yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a negative linear effect on nitrogen yield. An increase in residence time will reduce the nitrogen yield.

The residence time has the most impact on the nitrogen yield and steam consumption with temperature does not impact it at all.

• Oxygen

$$O_2 = -3,70 + 0,0208x_1 - 0,00750x_2 + 0,000125x_3 + 0,00625x_4 - 0,000021x_1^2$$

Looking at this equation we can say that air consumption (x1) has a positive linear effect and a negative quadratic effect on the oxygen yield. An increase in air consumption will increase the oxygen yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x2) has a negative linear effect on oxygen yield. An increase in steam consumption will reduce the oxygen yield.

The temperature in the reaction zone (x3) has a positive linear effect on oxygen yield. An increase in temperature will increase the oxygen yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a positive linear effect on oxygen yield. An increase in residence time will increase the oxygen yield.

Dry gas properties:

• Yield, m³/kg semi-coke

$$\text{Yield} = 6,06 - 0,02534x_1 + 0,0525x_2 + 0,00295x_3 + 0,00719x_4 + 0,000032x_1^2 - 0,000057x_2x_3$$

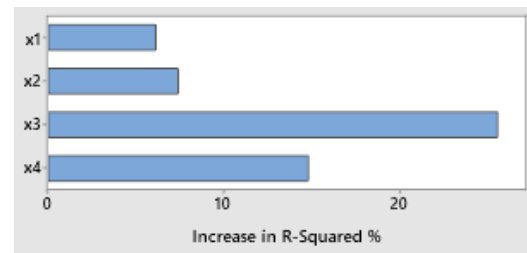


Fig. 6. Influence of initial parameters on the yield of dry gas, m³/kg semi-coke

Fig. 6 shows that the dry gas yield is most affected by the temperature in the reaction zone (25%) and the Residence time of the material in the reaction zone (15%).

The corresponding equation shows that air consumption (x1) has a negative linear effect and a positive quadratic effect on the dry gas yield. An increase in air consumption will reduce the dry gas yield, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x2) has a positive linear effect on dry gas yield. An increase in steam consumption will increase the dry gas yield.

The temperature in the reaction zone (x3) has a positive linear effect on dry gas yield. An increase in temperature will increase the dry gas yield.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a positive linear effect on dry gas yield. An increase in residence time will increase the dry gas yield.

The interaction between steam consumption (x2) and temperature in the reaction zone (x3) has a negative linear effect on dry gas yield. The effect of temperature on dry gas yield is weaker as steam consumption increases.

• Humidity, g/m³

$$\text{Humidity} = -340 + 2,519x_1 - 1,11x_2 - 0,196x_3 - 0,681x_4 - 0,003169x_1^2 + 0,00419x_2x_3$$

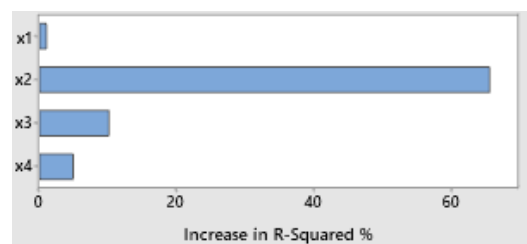


Fig. 7. Influence of initial parameters on gas humidity, g/m³

Fig. 7 shows that the gas humidity is most influenced by the Steam consumption (65%), the

temperature in the reaction zone slightly affects (7%), and the other parameters practically do not affect the gas humidity (<5%).

From the equation, we can conclude that Air consumption (x1) has a positive linear effect and a negative quadratic effect on the humidity in the resulting gas. An increase in air consumption will increase the humidity in the resulting gas, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x2) has a negative linear effect on the humidity in the resulting gas. An increase in steam consumption will decrease the humidity in the resulting gas.

The temperature in the reaction zone (x3) has a negative linear effect on the humidity in the resulting gas. An increase in temperature will decrease the humidity in the resulting gas.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a negative linear effect on the humidity in the resulting gas. An increase in residence time will decrease the humidity in the resulting gas.

The interaction between steam consumption (x2) and temperature in the reaction zone (x3) has a positive linear effect on the humidity in the resulting gas. The effect of temperature on the humidity in the resulting gas is stronger as steam consumption increases.

- Net calorific value, MJ/m³

$$NHV = 8,987 - 0,03487x_1 + 0,00625x_2 + 0,001x_3 + 0,0225x_4 + 0,000039x_1^2$$

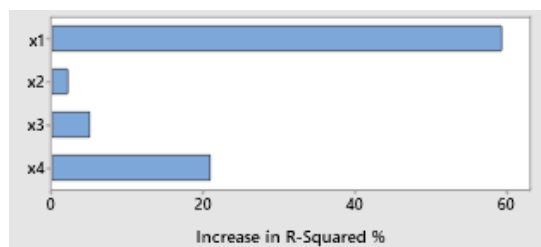


Fig. 8. Influence of initial parameters on the net calorific value, kcal/m³

Fig. 8 shows that the lower calorific value is most affected by air consumption (60%), the residence time of the raw material in the reaction zone affects it less (21%) and the other parameters practically do not affect it (<5%).

From the equation, we can see that air consumption (x1) has a negative linear effect and a positive quadratic effect on the net calorific value of the resulting gas. An increase in air consumption will decrease the net calorific value of the resulting gas, but the effect becomes weaker as air consumption increases.

Steam consumption (x2) has a positive linear effect on the net calorific value of the resulting gas. An increase in steam consumption will increase the net calorific value of the resulting gas.

The temperature in the reaction zone (x3) has a positive linear effect on the net calorific value of the resulting gas. An increase in temperature will increase the net calorific value of the resulting gas.

The residence time of the material in the reaction zone (x4) has a positive linear effect on the net calorific value of the resulting gas. An increase in residence time will increase the net calorific value of the resulting gas.

- Density, g/m³

$$\text{Density} = 637,9 + 2,923x_1 - 0,0025x_3 + 0,125x_2 - 0,937x_4 - 0,003500x_1^2$$

We can see that the density of the resulting gas is positively influenced by air consumption (x1), and negatively influenced by temperature (x3) and steam consumption (x2) in the reaction zone. The density also decreases with increased residence time (x4) in the reaction zone. The effect of air consumption (x1) on the density of the resulting gas is more significant as it is multiplied by a higher coefficient (2.923) compared to temperature (x3) and steam consumption (x2).

- Conversion rate, %

$$\text{CarbConvRate} = 162,67 - 0,4995x_1 - 0,001500x_3 + 0,15000x_2 + 0,36500x_4 + 0,000597x_1^2$$

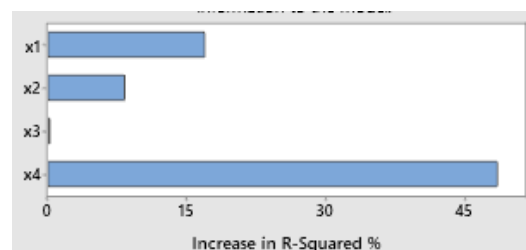


Fig. 9. Influence of initial parameters on the degree of carbon conversion, %

Fig. 9 shows that the lower calorific value is most affected by the residence time of the raw material in the reaction zone (48%), air consumption (17%) and steam consumption (8%) affect it less, the temperature in the reaction zone practically does not affect it (< 1%).

From the equation, we can conclude an increase in air consumption (x1) leads to a decrease in the conversion rate of carbon. This can be seen by the negative coefficient of -0,4995 associated with x1.

An increase in steam consumption (x2) leads to an increase in the conversion rate of the carbon, as seen by the positive coefficient of 0.15000 associated with x2.

The temperature in the reaction zone (x_3) has a negative effect on the conversion rate of the carbon. A higher temperature leads to a decrease in the conversion rate, as indicated by the negative coefficient of -0.001500 associated with x_3 .

The residence time of the material in the reaction zone (x_4) has a positive effect on the conversion rate of the carbon, which can be seen by the positive coefficient of 0.36500 associated with x_4 .

The influence of the square of air consumption (x_1^2) on the conversion rate of carbon is not straightforward. The coefficient of 0.000597 associated with x_1^2 suggests that the effect of x_1 on the conversion rate is not linear, and further analysis may be needed to determine the specific relationship.

• Steam

$$\text{SteamConvRate} = 335,3 - 1,221x_1 - 0,7625x_2 - 0,04150x_3 + 0,3512x_4 + 0,001538 x_1^2$$

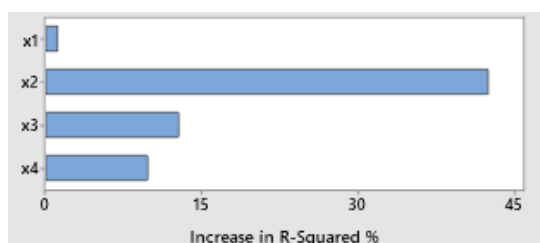


Fig. 10. Influence of initial parameters on the degree of steam conversion, %

Fig. 10 shows that the lower calorific value is most affected by steam consumption (42%), the temperature in the reaction zone and the residence time of the raw material in the reaction zone affect it less, and the air consumption practically does not affect it (<1%).

The equation shows that increasing air consumption (x_1) results in a decrease in the conversion rate of steam while increasing steam consumption (x_2) leads to a further decrease in the conversion rate.

The higher temperature in the reaction zone (x_3) has a negative effect on the conversion rate, while the longer residence time of the material in the reaction zone (x_4) leads to an increase in the conversion rate.

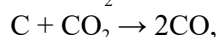
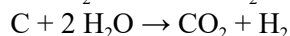
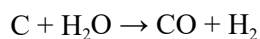
The influence of the square of air consumption (x_1^2) on the conversion rate is positive.

Conclusions. An analysis of the obtained regression equations shows that with an increase in airflow, the methane content will decrease, the amount of carbon dioxide will increase, and the content of nitrogen and unreacted oxygen will increase.

An increase in steam consumption entails a decrease in the methane content in the final gas since methane is formed during gasification by thermochemical transformations of raw materials without the participation of a blast.

The amount of carbon dioxide and hydrogen also decreases, which is explained by a decrease in the conversion of water vapor due to its excess, in contrast to carbon monoxide, the content of which increases. The decrease in water vapor conversion also explains the increase in the humidity of the resulting gas.

Increasing the temperature in the reaction zone promotes the reactions:



the result is a decrease in the percentage of carbon dioxide and hydrogen, with an increase in the proportion of carbon monoxide.

Increasing the residence time of the raw material in the reaction zone increases the proportion of hydrogen and carbon monoxide in the generator gas, and reduces the proportion of carbon dioxide. And since it is the reactions of obtaining CO and H₂ that are characterized by the highest volumetric yield per unit mass of raw materials, the percentage of ballast nitrogen in the gas obtained after gasification decreases, the lower calorific value and the degree of conversion of carbon and hydrogen increase.

The regression equations obtained as a result of calculations show a complex dependence of the parameters of the produced gas and the conditions for carrying out the gasification process. This leads to the impossibility of choosing the ideal reaction parameters for all cases of using the generator gas. For example, to achieve the best gas for the energy industry, the parameters must be optimized to maximize the net calorific value and minimize the humidity of the resulting gas, while maintaining a high conversion rate of carbon and steam. Some steps that can be taken to achieve these goals are:

Increase the temperature in the reaction zone, as this has a positive impact on the net calorific value and a negative impact on the humidity of the resulting gas.

Decrease air consumption, as this has a positive impact on the net calorific value and a negative impact on the humidity of the resulting gas.

Increase steam consumption, as this has a positive impact on the net calorific value and a negative impact on the humidity of the resulting gas.

Adjust the residence time of the material in the reaction zone to optimize the net calorific value while maintaining a low humidity and a high conversion rate of carbon and steam.

To achieve the best gas for methanol production, the parameters must be optimized to maximize the hydrogen and carbon monoxide yields and minimize the carbon dioxide and nitrogen yields, while maintaining

a high conversion rate of carbon and steam. Some steps that can be taken to achieve these goals are:

Increase the temperature in the reaction zone, as this has a positive impact on the carbon monoxide yield and a negative impact on the carbon dioxide yield.

Decrease air consumption, as this has a negative impact on the methane and hydrogen yields, and a positive impact on the carbon monoxide yield.

Increase steam consumption, as this has a positive impact on the hydrogen yield and a negative impact on the carbon dioxide yield.

Adjust the residence time of the material in the reaction zone to optimize the yield of the desired gases while maintaining a high conversion rate of carbon and steam.

The method for determining the optimal technological parameters of the process of gasification

of a solid thermolysis product based on the theory of multicriteria vector optimization is described by the authors in [3, 97-100].

As a result of the work carried out in the course of this article, regression equations for the gasification process were derived that are as close as possible to the process, without crossing the "overfitting" line, which occurs when the equation is overcomplicated in an effort to fit all the data for a perfect match. The resulting equations are easily analyzed, which simplifies the work with them. The article also presents graphs for each regression equation on the degree of influence on the final parameters of the process conditions, which makes it possible to understand the change in which specific technological factors will give the greatest result.

Bibliography:

1. Шульга, И. В., Гринь, Г. И., Кутовой, Д. С., Эйхман, В. А., & Зеленский, О. И. Исследование получения синтез-газа для производства аммиака и метанола. *Вісник Національного технічного університету ХПІ. Серія: Хімія, хімічна технологія та екологія*. 2017. №49. С. 86-93.
2. Гринь Г.И., Кутовая О.В., Кутовой Д.С., Шульга И.В. Определение оптимальных параметров процесса газификации твердого продукта термолиза. *Питання хімії та хімічної технології*. 2018. №5. С. 97-101.
3. Казаков В.В., Кутовой Д.С., Гринь Г.И., Шульга И.В., Зеленский О.И., Ковалевская И.В. Микроскопические исследования образцов углеродосодержащего сырья для каталитической газификации" *Norwegian Journal of Development of the International Science*. №60-2. 2021. С. 21-27.
4. Карвацький А.Я. Теоретичні та експериментальні дослідження теплоелектричного та механічного стану високотемпературних агрегатів: монографія / А.Я. Карвацький, Є.М. Панов, С.В. Кутузов, І.Л. Шилович, Г.М. Васильченко, С.В. Лелека. 2012. 350 с.
5. Мирошниченко І.В. Розширення сировинної бази коксування та поліпшення властивостей коксу як доменного палива: монографія / І.В. Мирошниченко, С.В. Фатенко, Д.В. Мірошниченко, І.В. Шульга. Харків–Тернопіль: НТУ «ХПІ», Видавництво «Крок». 2022. 254 с.
6. Рудика, В. І. Аналіз досвіду комерціалізації технологій зрідження вугілля в непрямий спосіб у світі. *Проблеми економіки*. 2017. № 3. С. 13-19.

Кутовий Д.С., Казаков В.В. ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ГАЗИФІКАЦІЇ МАЛОМЕТАМОРФІЗОВАНОГО ВУГІЛЛЯ: РЕГРЕСІЙНИЙ АНАЛІЗ

У останні десятиліття глобальні зміни навколишнього природного середовища світу стали суттєвим стримуючим фактором розвитку суспільства, що потребує розроблення наукових підходів до зменшення негативного техногенного впливу на екологію. Необхідність встановлення балансу між задоволенням сучасних потреб людства і захистом інтересів майбутніх поколінь передбачає гармонізацію соціальних, економічних та екологічних складових трансформації суспільства. У країнах Європи, зокрема в Україні, екологічні ризики переважно спричинені промисловим сектором. Виробнича діяльність підприємств вугільної галузі призводить до значного територіального погіршення стану довкілля. Отже, підвищення екологічної безпеки у напрямку енергетичного розвитку України є актуальною, має практичне значення та передбачає проведення досліджень щодо створення екологічних способів термохімічного перероблення некондиційної вуглецевмісної сировини.

У статті проведено комплексний аналіз процесу газифікації твердого продукту, отриманого термомолізом малометаморфізованого вугілля. Основною метою статті є оптимізація параметрів процесу газифікації в залежності від цільового використання отриманого газу шляхом використання регресійного аналізу. Для вирішення цієї проблеми та дослідження різних підходів до її вирішення проаналізовано останні дослідження та публікації в цій галузі.

У статті наведено рівняння регресії, які були виведені для визначення ступеня впливу різних умов процесу на кінцеві параметри процесу газифікації. Графічно охарактеризовано кожне рівняння регресії, надаючи візуальне представлення даних і полегшуючи читачам розуміння зв'язків між змінними.

Показано невирішені частини загальної проблеми, які досліджуються в статті. Розглянуто проблеми та обмеження поточних підходів і окреслюють майбутні напрямки досліджень у цій галузі.

Детальний аналіз та підхід авторів до вирішення проблеми роблять цю статтю цінним науковим ресурсом для науковців та фахівців енергетики та може слугувати підґрунтям для подальших досліджень щодо параметрів процесу газифікації в залежності від цільового використання отриманого газу.

Ключові слова: *газифікація, термоліз, малометаморфізоване вугілля, оптимізація, умови процесу, рівняння регресії, енергетика.*

Мельник Л.І.Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АСПЕКТИ ВИГОТОВЛЕННЯ СТРУМОПРОВІДНИХ ПОЛІМЕРНИХ КОМПОЗИТІВ

Дана стаття розглядає питання створення термостійких силоксанграфітових електропровідних композиційних матеріалів з регульованими електричними властивостями. Що можуть використовуватися в якості обігрівачів в приміщеннях різного призначення, обігріву взуття, протибурулькочий засіб на дахах будівель. В статті представлені результати створення та дослідження термостійких електропровідних систем поліорганосилоксан-графіт, та поліорганосилоксан – терморозширений графіт (ПОС – ТРГ). Запропоновані технологічні схеми виготовлення композиційних матеріалів на основі даних систем у вигляді як покриттів так і об'ємних композитів в широких межах варіювання струмопровідного наповнювача. Що включає поєднання наступних операцій: механоактивацію композицій, доведення до певної концентрації, нанесення та формування покриття при нормальних умовах та їх послідовна термообробка. При виготовленні об'ємних зразків необхідно виконати наступні кроки: просочення ТРГ розчином ПОС, визрівання та термообробка композиції, формування заготовки методом пресування та послідовна термообробка композитів. Встановлені перколяційні пороги для даних систем, так для систем поліорганосилоксан-графіт не залежно від виду кремнійорганічного зв'язуючого він знаходиться в межах приблизно 30-35 мас.% графіту. Для об'ємних композитів на основі системи ПОС – ТРГ при концентраціях ТРГ від 5 до 15 мас.% електроопір різко зменшується. Слід відзначити, що при концентраціях ТРГ до 15 мас.% анізотропія електричних властивостей є незначною. Визначено температурний коефіцієнт опору для покриттів та можливості його регулювання за рахунок марки графіту, концентрації наповнювача та введення спеціальних добавок. Для об'ємних композитів досліджено коефіцієнт теплопровідності та його залежність від вмісту зв'язуючого. Визначена теплова потужність з одиниці поверхні покриттів, що складає від 0,16 до 1,026 Вт/см² при температурі поверхні 50-250°C.

Ключові слова: струмопровідність, графіт, ТРГ, перколяційний ефект, перколяційний поріг, тепловиділення, поліорганосилоксан.

Постановка проблеми. Постійно розширюються асортимент та області застосування полімерних композиційних матеріалів, в тому числі струмопровідних, змінюється їх функціональне призначення і технології виготовлення. При цьому виникає можливість керувати процесами формування структури та отримувати вироби з наперед заданими властивостями з їх регулюванням в потрібному температурному інтервалі [1].

Побут, техніка, медицина, текстильна промисловість – найбільш затребувані галузі застосування полімерних струмопровідних композитів. З них виготовляють не лише нагрівальні елементи, еластичні електроди і датчики, але і саморозігрівальний одяг, п'єзорезистивні зонди та екрани від електромагнітних перешкод [2-8].

Отже вдосконалення технології та розробка нових електропровідних композиційних матеріалів з підвищеною термостійкістю є актуальною проблемою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В останній час багато досліджень проводяться

в рамках розробки полімерних струмопровідних матеріалів шляхом їх синтезу [9]. Інший більш простіший і ефективніший спосіб це поєднання струмопровідного наповнювача з полімерною матрицею [10-12]. Останній спосіб дає можливість широкого варіювання властивостей композиційних матеріалів за рахунок підбору полімерної матриці та провідного наповнювача. [13-16].

Теоретичні та експериментальні дослідження підтвердили природу провідності полімерних композитів, що виникає за рахунок ланцюга зі струмопровідного наповнювача [17, 18].

Формування цілей дослідження. Метою даної роботи було створення струмопровідних композиційних матеріалів з підвищеною термостійкістю та регульованими електричними властивостями. Однією з задач було дослідження можливості регулювання властивостей композитів за рахунок зміни форми та дисперсності наповнювача.

В якості основних компонентів для дослідження було обрано: як полімерну матрицю –

поліорганосилоксани (КО-921 та КО-85ф) з ряду причин:

- в такій якості їх ще не досліджували;
- не зважаючи на їх високий об’ємний опір, проте вони характеризуються високою термостійкістю і довговічністю;
- вони легко поєднуються з модифікаторами і наповнювачами, а також можна дослідити вплив природи радикалу на властивості композиції.

В якості струмопровідного наповнювача обрано графіт (марок ГЛС-1, ГАК-2, С-1) через його відмінні електричні показники, низьку вартість та доступність. Фізико-хімічні властивості поверхні та структуру різних видів графітів розглянуто в роботах [19].

Виклад основного матеріалу. Розробка нових видів композиційних матеріалів на основі системи поліорганосилоксан – графіт передбачає ефективне використання цінних в технічному відношенні властивостей кожного з інгредієнтів згаданої системи. Забезпечення такого використання можливе на базі раціонального поєднання графітів різних марок з поліорганосилоксаном, а в разі необхідності і з спеціальними функціональними добавками. В свою чергу вибір методу поєднання потребує спеціальної інформації по фізико-хімічним властивостям інгре-

дієнтів і зокрема природних та терморозширених графітів. Відомо [20], що основні процеси взаємодії при отриманні композиційних матеріалів різноманітного призначення в першу чергу пов’язані з участю функціональних груп поверхні їх компонентів. Важливу роль при цьому відіграють хімічний склад та структура останніх.

Спираючись на попередні дослідження [19] по визначенню структурних особливостей та фізико-хімічних властивостей поверхні різних видів графітів та процесів взаємодії в системі поліорганосилоксан – графіт [20] було запропоновано різні варіанти композиційних матеріалів: у вигляді покриттів та об’ємних елементів.

Зважаючи на значну різницю в дисперсності вихідних наповнювачів (питома поверхня для ГЛС-1 склала 0,8, а для С-1 – 4,1 м²/г виміряна за повітрепроникністю на приладі Т-3) та вмісту сухого залишку полімеру в лакові (КО-921 – вміст сухого залишку складає 50 мас.%, для КО-85 фм – цей показник лише 20 мас.%) було запропоновано різні способи виготовлення зразків. Технологічна схема виготовлення композиційних матеріалів у вигляді покриттів наведена на рис. 1.

Проведені дослідження електрофізичних властивостей (виміри питомого об’ємного електро-



Рис. 1. Технологічна схема виготовлення композиційних матеріалів у вигляді покриттів

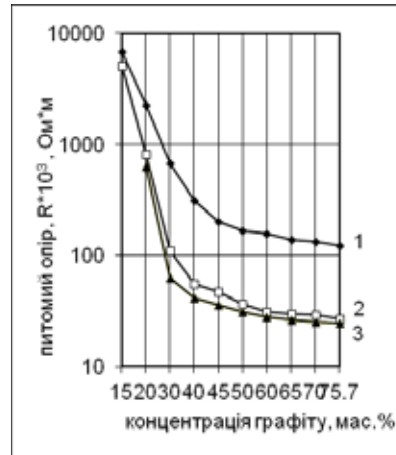
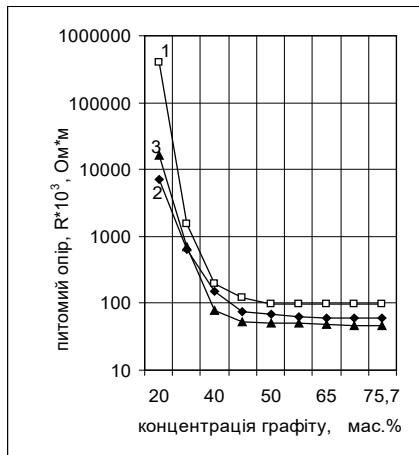


Рис. 2. Залежність питомого електричного об'ємного опору від концентрації графіту в системі: ПМФС+ГЛС-1 (а); ПФС+ГЛС-1 (б): 1 – вихідний матеріал; 2 – після термообробки 1 годину при 250°C; 3 – після старіння на повітрі 3000 годин

опору на постійному струмі двохелектродним та чотирьохзондовим компенсаційним методами) підтвердили теоретичні відомості стосовно перколяційного ефекту в межах більше 30 мас.% наповнювача (рис. 2). При наповненні системи до концентрації 32 мас.% наповнювача спостерігається різке зменшення електричного опору на 3-5 десяткових порядки у вузькому інтервалі концентрацій, що зумовлено утворенням струмопровідних вуглецевих ланцюжків в структурі композиції. Подальше збільшення концентрації наповнювача практично не змінює електричний опір покриттів.

Як видно електричний опір покриттів зменшується з $(250-100) \cdot 10^{-3}$ Ом·м до $(105-80) \cdot 10^{-3}$ Ом·м, та до $(90-70) \cdot 10^{-3}$ Ом·м в інтервалі концентрацій наповнювача 40-75,7 мас.% відповідно після термообробки 1 годину при 250°C, та після старіння на повітрі 3000 годин.

Заміна графіту марки ГЛС-1 на С-1 в системі ПМФС – графіт дозволяє зменшити питомий електричний об'ємний опір покриття ще на один порядок причому його анізотропія несуттєва, і змінюється в межах від 2,0 до 0,9 в інтервалі концентрацій 20-50 мас.%.

Системи ПОС+ГЛС-1 мають від'ємний температурний коефіцієнт опору (ТКО) (рис. 3), але з ростом концентрації наповнювача він збільшується і при вмісті графіту 76,5 мас.% практично досягає нульового значення.

Заміна наповнювача ГЛС-1 на ГЛС-2 дозволяє отримати позитивний ТКО. Додаткове введення ТРГ (1мас.%) зменшує ТКО практично до 0.

Дослідження температурної залежності ТКО в інтервалі до 170 °С (рис. 4), виявило аналогічні

закономірності. Додаткове введення в систему ПМФС – ГЛС-2 1 мас.% ТРГ дозволяє стабілізувати значення ТКО в широкому температурному інтервалі 20-170°C при концентрації графіту 25-35 мас.%.

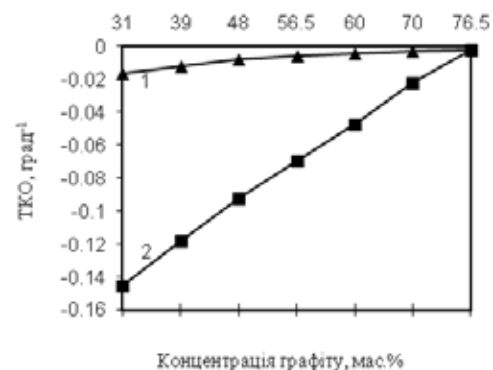


Рис. 3. Залежність температурного коефіцієнта опору від концентрації графіту для систем: 1 – ПМФС+ГЛС-1; 2 – ПФС+ГЛС-1

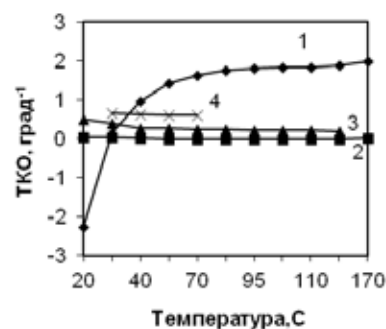


Рис. 4. Залежність ТКО від температури для систем ПМФС+ГЛС-2 з вмістом останнього мас. %: 1 – 30%; 2 – 35%+1%ТРГ; 3 – 30%+1%ТРГ; 4 – 25%+1%ТРГ

Дані системи пройшли випробування в якості тепловиділяючих елементів (виміри максимального тепловиділення з одиниці поверхні по розробленій методиці на спеціально зібраній установці) і встановлено, що теплова потужність з одиниці поверхні складає від 0,16 до 1,026 Вт/см² при температурі поверхні 50-250°C.

Що стосується об'ємних композиційних матеріалів на основі кремнійорганічних зв'язуючих та терморозширеного графіту (ТРГ) рис. 5.

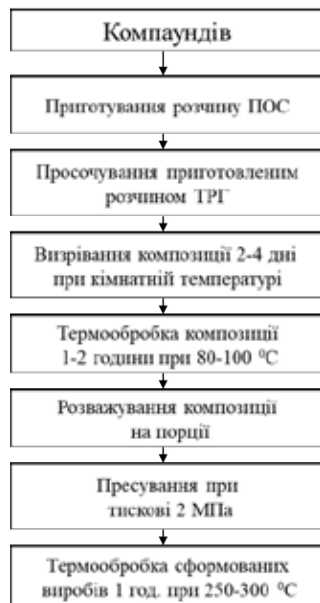


Рис. 5. Технологічна схема виготовлення об'ємних композиційних матеріалів

Електрофізичні характеристики КМ оцінювались по зміні електроопору при кімнатній температурі вздовж (ρ_c) і перпендикулярно (ρ_a) вісі пресування (рис. 6) та визначено параметр анізотропії ρ_c/ρ_a , а також досліджено температурні залежності електроопору перпендикулярно вісі пресування ρ_a .

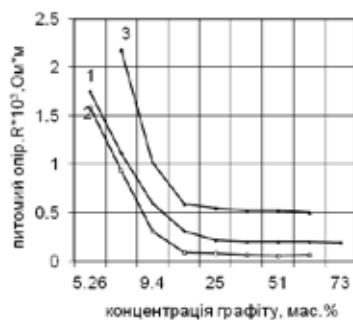


Рис. 6. Залежність питомого електроопору від концентрації ТРГ в системах ПОС-ТРГ: 1 – ПФС-ТРГ, (R_c); 2 – ПМФС-ТРГ, (R_a); 3 – ПМФС-ТРГ, (R_c)

Залежності R_a та R_c від концентрації ТРГ в КМ мають однаковий вигляд. При концентраціях ТРГ від 5 до 15 мас.% електроопір різко зменшується R_a від $\sim 10^{-2}$ Ом·м до $\sim 7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м, R_c від $\sim 1,8 \cdot 10^{-3}$ Ом·м до $\sim 1,7 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Подальше збільшення концентрації ТРГ в КМ супроводжується продовженням зменшення електроопору, який і складає для матеріалу з концентрацією 25 мас.% ТРГ $R_a = 5 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $R_c = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м. Чистий ТРГ відповідної густини має $R_a = 1 \cdot 10^{-5}$ Ом·м, $R_c = 5 \cdot 10^{-4}$ Ом·м.

Параметр анізотропії є малим $\sim 2-5$ при концентраціях ТРГ до 15 мас.%, а збільшення вмісту ТРГ в КМ до 50 мас.% супроводжується його зростанням до 15.

Аналіз залежностей електроопору вздовж і перпендикулярно вісі пресування та параметру анізотропії дозволяє виявити основні механізми електропровідності в КМ системи ПОС-ТРГ.

З точки зору теорії перколяції система ПОС-ТРГ подібна до моделі трьохмірної сітки з електропровідними вузлами з частинок ТРГ та блокованими ПОС вузлами. Поблизу порогу протікання, тобто при концентраціях ТРГ, при яких спостерігається різке зменшення електроопору, окремі кластери графіту з'єднуються між собою і утворюється безперервний кластер, що і приводить до різкого зменшення електроопору. При подальшому зростанні концентрації ТРГ зменшується число "тупикових шляхів" в безкінечному кластері, що призводить до незначного зменшення електроопору. Треба відмітити, що дійсний поріг протікання (~ 5) мас.% часток, який виявлено для даної системи ПОС-ТРГ, є значно нижчим, ніж передбачає теорія перколяції $\sim 16\%$.

Визначення теплофізичних властивостей композитів, проводили по оцінці температурного коефіцієнта лінійного розширення (ТКЛР) та коефіцієнту теплопровідності.

Оцінка ТКЛР композитів проводилась у напрямку перпендикулярному до орієнтації базисних площин (вздовж вісі c), показала (табл. 1), що збільшення концентрації ПОС призводить до зростання його значення в порівнянні з чистим ТРГ в 10-17 разів

Таблиця 1
ТКЛР композитів ПМФС-ТРГ

Матеріал	Густина, г/см ³	ТКЛР, К ⁻¹
Чистий ТРГ	1,00	$2,3 \cdot 10^{-5}$
ПОС-ТРГ ($C_{тр} = 67,6$ мас.%)	1,1	$2,6 \cdot 10^{-4}$
ПОС-ТРГ ($C_{тр} = 51,0$ мас.%)	1,03	$3,56 \cdot 10^{-4}$
ПОС-ТРГ ($C_{тр} = 25,0$ мас.%)	1,05	$3,9 \cdot 10^{-4}$

На теплопровідність КМ системи ПОС-ТРГ, отриманого методом одноосного пресування сильно впливає анізотропія матеріалу. Тому виміри теплопровідності здійснювались у напрямку перпендикулярному до орієнтації базисних площин (вздовж вісі c). Як показали дослідження вміст ПОС в КМ значно впливає на коефіцієнт теплопровідності. При концентрації ПОС приблизно 40-50 мас.% коефіцієнт теплопровідності значно вищий (майже вдвічі), ніж у чистого ТРГ, аналогічної густини. Композити з вмістом ПОС 75 мас.% характеризуються значенням коефіцієнту теплопровідності близьким до значення в чистому ТРГ. Матеріали, що містять 92-95 мас.% ПОС мають досить низьку теплопровідність – (1-2) Вт/м·К, що втричі нижча за коефіцієнт теплопровідності в чистому ТРГ.

Висновки.

Встановлено, що системи ПОС-графіт мають різке зменшення електроопору на 3-5 десяткових порядки у вузькому інтервалі концентрацій 30-32 мас.%. Подальше збільшення концентрації наповнювача не суттєво змінює його значення. Що стосується систем ПОС-ТРГ то виявлено пер-

коляційний ефект при концентрації наповнювача (~5 мас.%), що значно нижче ніж передбачає теорія перколяції.

В залежності від виду графіту та його концентрації можна змінювати температурний коефіцієнт опору дослідних систем. Так системи ПОС+ГЛС-1 мають від'ємний ТКО, який з ростом концентрації ГЛС-1 в системі зменшується. Заміна графіту марки ГЛС-1 на ГЛС-2 дає змогу одержати позитивні значення цього показника.

Теплова потужність з одиниці поверхні композитів у вигляді покриттів складає від 0,16 до 1,026 Вт/см² при температурі поверхні 50-250°C.

Щодо об'ємних композитів, то відмічено, що при концентрації ПОС приблизно 40-50 мас.% коефіцієнт теплопровідності значно вищий (майже вдвічі), ніж у чистого ТРГ, аналогічної густини. Композити з вмістом ПОС 75 мас.% характеризуються значенням коефіцієнта теплопровідності близьким до значення в чистому ТРГ. Матеріали, що містять 92-95 мас.% ПОС мають досить низьку теплопровідність – (1-2) Вт/м·К, що втричі нижча за коефіцієнт теплопровідності в чистому ТРГ.

Список літератури:

1. Закономірності формування і застосування термостійких струмопровідних силоксанграфітових матеріалів ЛІ Мельник - Автореферат дисертації. Київ, 2009. 22 с.
2. Shen B., Zhai W., Tao M., Ling J., Zheng W. Lightweight, multifunctional polyetherimide/-graphene@Fe₃O₄ composite foams for shielding of electromagnetic pollution. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2013. № 5. P. 11383-11391. Doi: 10.1021/am4036527.
3. Wang M., Zhang K., Dai X.X., Li Y., Guo J., Liu H., Li G.H., Tan Y.J., Zeng J.B., Guo Z. Enhanced electrical conductivity and piezoresistive sensing in multi-wall carbon nanotubes/polydimethylsiloxane nanocomposites via the construction of a self-segregated structure. *Nanoscale*. 2017. №9. P. 11017-11026. Doi: 10.1039/C7NR02322G.
4. Cao M.-S., Wang X.-X., Cao W.-Q., Yuan J. Temperature dependent microwave absorption of ultrathin graphene composites. *J. Mater. Chem. C*. 2015. №3. P. 10017-10022. Doi: 10.1039/C5TC02185E.
5. Geetha S., Kumar K.S., Rao C.R., Vijayan M., Trivedi D.C. EMI Shielding: Methods and Materials—A Review. *J. Appl. Polym. Sci*. 2009. №112. P.2073-2086. Doi: 10.1002/app.29812.
6. Abbas N., Kim H.T. Multi-walled carbon nanotube/polyethersulfone nanocomposites for enhanced electrical conductivity, dielectric properties and efficient electromagnetic interference shielding at low thickness. *Macromol. Res*. 2016. № 24. P.1084-1090. Doi: 10.1007/s13233-016-4152-z.
7. Shen B., Li Y., Zhai W., Zheng W. Compressible Graphene-Coated Polymer Foams with Ultralow Density for Adjustable Electromagnetic Interference (EMI) Shielding. *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2016. №8. P. 8050-8057. Doi: 10.1021/acsami.5b11715.
8. Boyle, A.; Geniès, E.M.; Lapkowski, M. Application of the electronic conducting polymers as sensors: Polyaniline in the solid state for detection of solvent vapours and polypyrrole for detection of biological ions in solutions. *Synth. Met*. 1989. № 28. P. 769-774.
9. Inzelt, G. *Conducting Polymers*; Scholz, F., Ed.; Springer: Berlin/Heidelberg, Germany, 2008. P. 309.
10. Wu D., Gao X., Sun J., Wu D., Liu Y., Kormakov S., Zheng X., Wu L., Huang Y., Guo Z. Spatial confining forced network assembly for preparation of high-performance conductive polymeric composites. *Compos. Part A*. 2017. №102. P.88-95. Doi: 10.1016/j.compositesa.2017.07.027.
11. Deng H., Lin L., Ji M.A., Zhang S., Yang M., Fu Q. Progress on the morphological control of conductive network in conductive polymer composites and the use as electroactive multifunctional materials. *Prog. Polym. Sci*. 2014. №39. P.627-655. Doi: 10.1016/j.progpolymsci.2013.07.007.
12. Bauhofer W., Kovacs J.Z. A review and analysis of electrical percolation in carbon nanotube polymer composites. *Compos. Sci. Technol*. 2009. №69. P.1486-1498. Doi: 10.1016/j.compscitech.2008.06.018.

13. L. Vovchenko, L. Matzui, O. Yakovenko, V. Oliynyk, T. Len, A. Naumenko, L. Kulikov. Microwave absorption in epoxy composites filled with MoS₂ and carbon nanotubes. *J. Appl. Phys.* 2022. № 131(3).
14. Дослідження електричних властивостей епоксидного композиту з вуглецевими наповнювачами/ Мельник Л.І.// Технологический аудит и резервы производства, 2017. № 3/1(35). С. 28-33.
15. Мельник Л.І. Полімерні композити на основі поліпропілену та вуглецевих нанотрубок / Л.І. Мельник // Системи розроблення та постановлення продукції на виробництво. Індустрія.. Сучасний напрямок автоматизації та обміну даними у виробничих технологіях: матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції (м. Суми 22-26 травня 2017 р.) Суми: СумДУ, 2017. С. 138-139.
16. O. V. Lozitsky, L. L. Vovchenko, L. Y. Matzui, Y. S. Milovanov, V. V. Garashchenko. Electrical properties of epoxy composites with carbon nanotubes, mixed with TiO₂ or Fe particles. *Applied Nanoscience* 2021. № 11. P.1827-1837. Doi:10.1007/s13204-021-01838-z2
17. Xie P., Sun K., Wang Z., Liu Y., Fan R., Zhang Z., Schumacher G. Negative permittivity adjusted by SiO₂-coated metallic particles in percolative composites. *J. Alloys Compd.* 2017. № 725. P. 1259-1263. Doi: 10.1016/j.jallcom.2017.04.248.
18. Cheng C., Fan R., Ren Y., Ding T., Qian L., Guo J., Li X., An L., Lei Y., Yin Y., et al. Radio frequency negative permittivity in random carbon nanotubes/alumina nanocomposites. *Nanoscale.* 2017. № 9. P.5779-5787. Doi: 10.1039/C7NR01516J.
19. Структура і фізико-хімічні властивості природних та терморозширених графітів / Л.І. Мельник, Р.П. Волинець, Д.О. Будя // Наукові вісті національного технічного університету України "КПІ". 2010. № 6. С. 141-146.
20. Особливості процесів взаємодії в системі поліорганосилоксан–графіт / ВА Свідерський, ЛІ Мельник, АД Петухов // Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2007. № 4(36). С. 36-41.

Melnyk L.I. ASPECTS OF MANUFACTURING OF CONDUCTIVE POLYMER COMPOSITES

This article considers the issue of creating heat-resistant siloxane-graphite electrically conductive composite materials with adjustable electrical properties. Such materials can be used as heaters in rooms for various purposes, for heating shoes, as a means against the formation of icicles on the roofs of buildings. the results of the creation and research of heat-resistant conductive systems polyorganosiloxane-graphite, and polyorganosiloxane – thermally expanded graphite (POS – TRG). The technological schemes for the production of composite materials based on these systems in the form of coatings and volumetric composites within a wide range of variations of the conductive filler are proposed. The scheme includes a combination of the following operations: mechanical activation of compositions, bringing them to a certain concentration, applying and forming a coating under normal conditions, and their subsequent heat treatment. In the production of bulk samples, the following steps must be performed: impregnation of TRH with a POS solution, aging and heat treatment of the composition, forming the workpiece by pressing and subsequent heat treatment of the composites. Percolation thresholds are set for these systems. It is within the range of approximately 30-35 wt.% of graphite for polyorganosiloxane-graphite systems, regardless of the type of organosilicon binder. The electrical resistance sharply decreases in the case of volumetric composites based on the POS-TRH system at concentrations of TRH from 5 to 15 wt.%. It should be noted that at TRH concentrations up to 15 wt.%, the anisotropy of the electrical properties is insignificant. The temperature coefficient of resistance for coatings and the possibility of its adjustment due to the grade of graphite, the concentration of the filler and the introduction of special additives have been determined. The coefficient of thermal conductivity has been established for bulk composites and staleness in place of the caustic. The thermal attenuation of a single surface coating was determined, which became 0.16 to 1.026 W/sm² at a surface temperature of 50-250°C.

Key words: *strum conductivity, graphite, TRG, percolation effect, percolation threshold, thermal imaging, polyorganosiloxane.*

УДК 66.048.5.069.834

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/34>**Радовенчик Я.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Гордієнко К.Ю.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Крисенко Т.В.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**Іваненко О.І.**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИДАЛЕННЯ СПЛУК МАГНІЮ З ВОДИ В ПРОЦЕСАХ ЇЇ ПОМ'ЯКШЕННЯ

В роботі наведені результати дослідження ефективності відділення утвореної твердої фази від води в процесах її пом'якшення. Встановлено, що фосфат – аніони є досить ефективними в процесах видалення із водних розчинів іонів магнію. Однак, загальна ефективність процесу пом'якшення може бути забезпечена лише у випадку повного розділення твердої та рідкої фаз, яке може бути реалізовано шляхом відстоювання чи фільтрування. Для систем малої та середньої продуктивності більш прийнятним видається застосування фільтрування, яке не потребує високооб'ємного обладнання. Швидкість фільтрування суспензії частинок фосфату магнію в значній мірі залежить від умов і найкраще проходить в кислому чи лужному середовищі. Однак, корегування водневого показника не завжди зручне в умовах використання систем малої та середньої продуктивності, тому для підвищення швидкості фільтрування необхідно застосовувати додаткові реагенти у вигляді флокулянтів. Позитивний ефект забезпечують всі типи флокулянтів - неіоногенний флокулянт поліакриламід, флокулянт аніонного типу Magnofloc – 336 фірми Сіба, флокулянт катіонного типу Zetag – 7692 фірми Сіба. При застосуванні поліакриламідів позитивним є той факт, що основний об'єм рідкої фази відфільтровується в перші 15 – 20 хв., а при дозі флокулянта 50 мг/дм³ – навіть в перші 10 хв. При цьому об'єм рідкої фази складає приблизно 80 % від початкового об'єму суспензії. Решта 20 % рідкої фази залишається в осаді. Порівняння отриманих результатів з фільтруванням за тих же умов без флокулянта показує, що його додавання сприяє швидкому зневодненню суспензії, але суттєво збільшує вологість осаду. Меншою вологістю осаду відрізняється використання флокулянта аніонного типу Magnofloc – 336. При дозі 50 мг/дм³ 80 % загального об'єму суспензії відфільтровується за 5 хв, 96 % – за 60 хв. Однак, найкращі результати отримані при використанні флокулянту катіонного типу Zetag – 7692. Цей флокулянт дозволяє отримати 96 – 98 % фільтрату при тривалості фільтрування 10 – 15 хв. Особливо привабливою видається концентрація флокулянта в 30 мг/дм³, при якій процес фільтрування триває 15 хв. і в подальшому кількість фільтрату не збільшується. Збільшення дози флокулянта призводить до зниження швидкості фільтрування.

Ключові слова: пом'якшення води, магній, фосфати, флокулянт, іони жорсткості.

Постановка проблеми. Сучасне катастрофічне погіршення якості природних вод змушує обов'язково проводити їх очищення перед споживанням населенням чи використанням в промисловості. Досить часто в природних водах не відповідає вимогам чинних нормативних документів така характеристика води як жорсткість,

яка визначається вмістом сполук кальцію та магнію. Територія України характеризується збільшенням жорсткості води поверхневих водойм в напрямку з північного заходу на південний схід. Так, для вод Дніпра характерна жорсткість на рівні 4 – 5 мг-екв/дм³, а для річок Приазов'я цей показник зростає до 15 – 30 мг-екв/дм³ [1, с. 34].

Щодо жорсткості води більш об'ємних водойм, то можна зауважити, що якщо для вод Світового океану вона складає біля 130,5 мг-екв/дм³, то в Чорному та Каспійському морях знижується до 65,5 мг-екв/дм³ та 66,4 мг-екв/дм³ відповідно.

Сумарний вміст іонів кальцію та магнію визначає загальну жорсткість. Іони магнію формують магнієву жорсткість, котра у водах поверхневих водойм сягає, зазвичай, 30 % загальної жорсткості. В окремих регіонах України (наприклад, Донбасу) магнієва жорсткість може збільшуватися до 60 %, а для вод Світового океану – майже до 83 %. Тому проблема зниження вмісту іонів магнію в природних водах сьогодні стає надзвичайно гострою та актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Чинними нормативними документами України показник загальної жорсткості води для споживання людиною обмежується рівнем в 7 мг-екв/дм³ [2, с. 13]. Разом з тим, показники фізіологічної повноцінності мінерального складу питної води визначені для мінімальної загальної жорсткості на рівні 1,5 мг-екв/дм³, а вміст іонів магнію рекомендовано в межах 10 – 50 мг/дм³. Окремі галузі промисловості більш вимогливі до хімічного складу води. Так, харчова промисловість споживає воду з жорсткістю на рівні 0,1 – 0,2 мг-екв/дм³, а енергетика - взагалі на рівні 0,03 – 0,05 мг-екв/дм³ [3, с. 186]. Тому більшість природних вод потребує пом'якшення – видалення надлишкової кількості сполук кальцію та магнію. Традиційною сьогодні вважається содово – вапняна (натрієва) технологія пом'якшення води. Згідно з цією технологією на першому етапі жорстка вода обробляється карбонатом натрію для зв'язування іонів кальцію, на другому - вапном чи гідроксидом натрію для осадження іонів магнію [4, с. 67]. Технологія потребує тривалого відстоювання та видалення твердої фази, коригування водневого показника від значень 10,0 – 11,0 до нейтрального. Незважаючи на складність, технологія не забезпечує достатню ефективність, оскільки навіть при температурі пом'якшеної води 35 – 40 °С залишкова її жорсткість складає 0,5 – 1,0 мг-екв/дм³. Незважаючи на приведені недоліки, ця технологія вважається базовою для промислового використання, оскільки не критична до концентрацій іонів кальцію та магнію і дозволяє споруджувати системи різної продуктивності.

Зважаючи на значні об'єми вод централізованого водопостачання (наприклад, в м. Києві до 1 млн. м³/добу), пом'якшувати таку кількість вод досить затратно. Тому останнім часом набувають

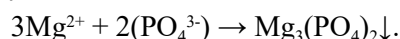
поширення системи пом'якшення води в офісах та приватних будинках і квартирах. Продуктивність таких систем порівняно невелика і базуються вони на використанні іонного обміну [5, с. 118]. В таких системах для регенерації катіоніту застосовують 6–8%-ий розчин хлориду натрію. Після використання його без будь-якої обробки скидають в каналізаційні системи. В результаті в гідросферу, крім іонів кальцію та магнію, надходить значно більша кількість хлориду натрію [6, с. 210]. Крім цього, 20 – 30 % обробленої установкою води витрачається на її обслуговування [7, с. 380]. Виходячи із тенденції погіршення якості природних вод, можна прогнозувати ріст кількості таких малопотужних систем і, відповідно, ріст їх негативного впливу на довкілля. Вже сьогодні гострота цієї проблеми досить висока і вона давно чекає свого вирішення.

Мета роботи. Проведені раніше дослідження [8, с. 88] показали, що ефективно видалення іонів магнію шляхом їх гідролізу потребує підтримання водневого показника на рівні 10,5, що пов'язано із значною витратою реагентів та не завжди прийнятно з технологічної точки зору. Тому нами було досліджено ефективність використання в якості реагенту для пом'якшення води в побутових та офісних системах фосфату натрію, котрий мало впливає на початкові характеристики води. Однак, значну проблему складає розділення рідкої та твердої фаз, що утворюються в результаті змішування реагентів. Дана робота присвячена вивченню ефективності видалення сполук магнію із пом'якшених вод з використанням різноманітних реагентів.

Опис методики досліджень. Методика роботи полягала в попередньому приготуванні модельних розчинів із вмістом іонів магнію на рівні 15 – 17 мг-екв/дм³ та обробці їх фосфатом натрію за різних умов або сумішшю фосфату натрію та флокулянта. В останньому випадку доза фосфату натрію залишалася постійною і відповідає стехіометрії, а доза флокулянта змінювалася в межах 0 – 50 мг/дм³. В якості допоміжних реагентів використовували поліакриламід (ПАА) – як неіоногенний флокулянт, Magnofloc – 336 фірми Ciba – як флокулянт аніонного типу з молекулярною масою до 20 млн. в.о., Zetag – 7692 фірми Ciba – як флокулянт катіонного типу з молекулярною масою до 20 млн. в.о. Оброблені такою сумішшю модельні розчини заливали в мірні циліндри та знімали криві відстоювання. Фільтрування досліджували на комплекті, що складався із мірного циліндра об'ємом 100 см³ та лійки відповідного розміру.

Для відділення твердої фази застосовували паперові фільтри «синя стрічка» діаметром 110 мм. В процесі фільтрування оброблені відповідним чином модельні розчини заливали в лійку з фільтрувальним папером та фіксували зміну об'єму фільтрату в часі, підтримуючи рівень суспензії в лійці на максимальному рівні.

Виклад основного матеріалу. Досить часто в науковій літературі для осадження іонів магнію пропонується застосовувати фосфати [6, с. 185]. При цьому вважається, що в обробленій воді проходять реакції, котрі в спрощеному вигляді можуть бути записані як:



В результаті реакції іони магнію зв'язуються в фосфат магнію і можуть бути видалені із обробленої води. В процесі приведеної реакції може утворюватися ряд проміжних сполук, які не враховані в приведеному рівнянні. Більш детально про такі сполуки можна довідатися, наприклад у [9, с. 64].

Загальна ефективність реагентних методів пом'якшення може бути забезпечена лише у випадку повного розділення твердої та рідкої фаз. Цього можливо досягти двома способами – фільтруванням та відстоюванням. Фільтрування – більш прийнятний спосіб для систем невеликої продуктивності – побутових, офісних і т.п., де не завжди можливо встановити ємкості значного об'єму. Відстоювання більш прийнятне для промислових продуктивних систем із відстійниками необхідного об'єму, але може також свідчити про ступінь сформованості частинок твердої фази.

На першому етапі були проведені дослідження щодо оцінки впливу різних факторів на швидкість фільтрування отриманої в результаті пом'якшення суспензії. Вони показали, що найкращі результати забезпечують співвідношення реагентів, близькі до стехіометричних, при яких формуються тверді частинки найбільш досконалої структури. Навіть в кислому середовищі вони фільтруються із швидкістю, близькою до швидкості фільтрування дистильованої води (рис. 1). Зміна співвідношення в будь який бік від стехіометрії погіршує умови фільтрування твердої фази, а збільшення співвідношення K до 2 майже в 2 рази збільшує термін фільтрування. Якщо зважити на жорсткі вимоги до вмісту у питних та стічних водах фосфатів, то очевидно, що перевагу необхідно надавати саме стехіометричним співвідношенням реагентів, коли фосфати найповніше зв'язуються в нерозчинні сполуки.

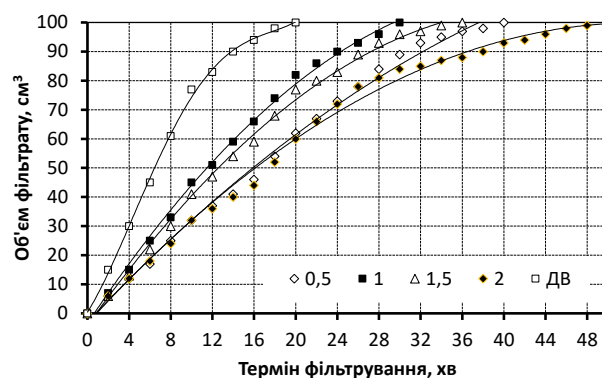


Рис. 1. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при різних значеннях $K = [\text{PO}_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}]$ при температурі розчину 21°C , початковій жорсткості $15,9 \text{ мг-екв/дм}$, $\text{pH } 3,16$ (ДВ – дистильована вода)

В нейтральному середовищі, яке найбільш близьке до умов застосування технології пом'якшення, швидкість фільтрування для всіх значень коефіцієнта K суттєво знижується (рис. 2). Термін фільтрування 100 см^3 суспензії, отриманої після обробки модельного розчину реагентом, зростає в 2 – 3 рази. Очевидно, що в даному випадку для забезпечення достатньої ефективності процесу пом'якшення необхідні додаткові реагенти або більш сприятливі умови – підігрів води, дозування додаткової твердої фази і т.п. Правда, останні заходи значно ускладнюють технологію, що для систем малої та середньої продуктивності мало прийнятно.

Найкращі умови фільтрування забезпечуються в лужному середовищі (рис. 3). Криві інтенсивності фільтрування досить близькі до кривих фільтрування дистильованої води. Для $K=0,5$ близькість кривої фільтрування до кривої фільтрування дистильованої води пояснюється формуванням лише половини можливої твердої фази. Тому тверді частки менше перешкоджають проходженню рідкої фази через пори утвореного середовища. Не дуже значний вплив частинок утвореної твердої фази на швидкість фільтрування і при стехіометричному співвідношенні реагентів. Однак, при надлишку фосфатів при утворенні твердої фази ($K = 1,5 - 2,0$) формується аморфне желеподібне середовище, котре суттєво впливає на швидкість фільтрування, збільшуючи відповідний термін в кілька разів.

Причому, вологість утвореної твердої фази близька до 99 %. Цей факт ще раз свідчить на користь проведення реакції видалення іонів магнію при стехіометричному співвідношенні компонентів. В той же час, використання додаткових реагентів і в цих умовах може бути позитивним.

Використання в якості додаткового реагенту флокулянту ПАА в різних дозах показало, що інтенсивність фільтрування суспензії суттєво зростає навіть при незначних його дозах (рис. 4).

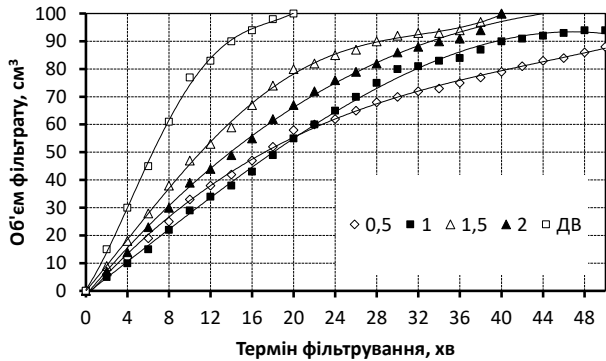


Рис. 2. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при різних значеннях $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}]$ при температурі розчину 21°C , початковій жорсткості $16,3 \text{ мг-екв/дм}$, рН $6,58$ (ДВ – дистильована вода)

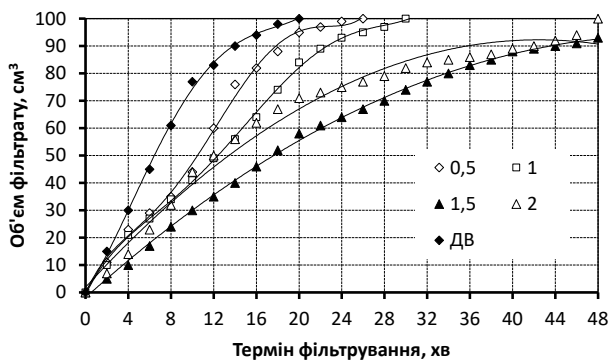


Рис. 3. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при різних значеннях $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}]$ при температурі розчину 21°C , початковій жорсткості $16,3 \text{ мг-екв/дм}$, рН $10,07$ (ДВ – дистильована вода)

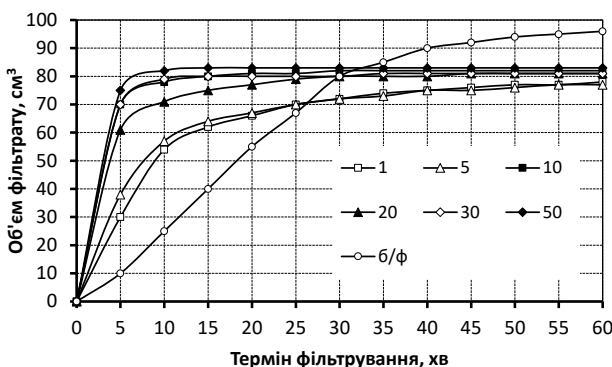


Рис. 4. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, різних концентраціях ПАА (мг/дм^3), температурі розчину 21°C , початковій жорсткості $17,0 \text{ мг-екв/дм}$, рН $6,71$ (б/ф – без флокулянта)

Позитивним є той факт, що основний об'єм рідкої фази відфільтровується в перші 15 – 20 хв., а при дозі ПАА 50 мг/дм^3 – навіть в перші 10 хв. При цьому об'єм рідкої фази складає приблизно 80 % від початкового об'єму суспензії. Решта 20 % рідкої фази залишається в осаді. Якщо порівнювати отримані результати з фільтруванням за тих же умов суспензії без флокулянта, то можна відмітити, що його додавання сприяє швидкому зневодненню суспензії, але суттєво збільшує вологість осаду. В цілому можна вважати отримані результати досить перспективними.

Меншою вологістю осаду відрізняється використання флокулянта аніонного типу Magnofloc – 336 (рис. 5). При дозі 50 мг/дм^3 80 % загального об'єму суспензії відфільтровується за 5 хв, 96 % – за 60 хв. При дозі в 1 мг/дм^3 аналогічні показники складають 40 та 88 % відповідно. На відміну від ПАА, Magnofloc – 336 дозволяє отримати осади меншої вологості та дещо більшу швидкість їх зневоднення.

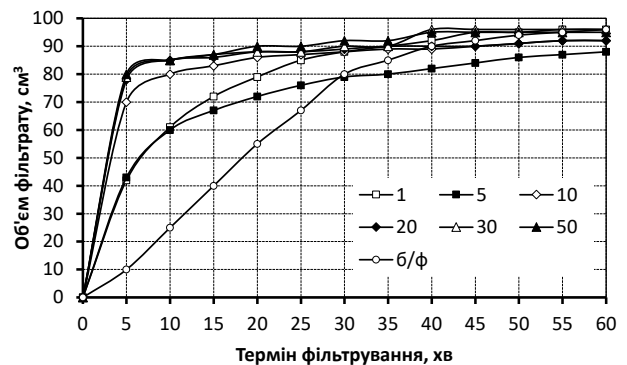


Рис. 5. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при $K = [PO_4^{3-}, \text{мг-екв}]/[Mg^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, різних концентраціях Magnofloc (мг/дм^3), температурі розчину 21°C , початковій жорсткості $17,0 \text{ мг-екв/дм}$, рН $6,71$ (б/ф – без флокулянта)

Однак, найкращі результати, на нашу думку, отримані при використанні флокулянту катіонного типу Zetag – 7692 (рис. 6). Цей флокулянт дозволяє отримати 96 – 98 % фільтрату при тривалості фільтрування 10 – 15 хв. Особливо привабливою видається концентрація флокулянта в 30 мг/дм^3 , при якій процес фільтрування триває 15 хв і в подальшому кількість фільтрату не збільшується. При подальшому збільшенні дози флокулянта швидкість фільтрування знижується.

Висока ефективність флокулянта Zetag підтверджується і процесами відстоювання (рис. 7). Причому, для суспензії, обробленої цим флокулянтом, характерний визначений період формування структури твердої фази, після якого спо-

стерігається стрімке осідання твердих частинок. Варто звернути увагу на досить високу початкову жорсткість води – 33 мг-екв/дм³. При цьому уявний об'єм твердої фази склав після годинного відстоювання біля 23 % від початкового об'єму суспензії. І це при тому, що без флокулянта аналогічний показник склав біля 96 %, а з використанням ПАА та флокулянту Magnofloc – 78 % та 51 % відповідно.

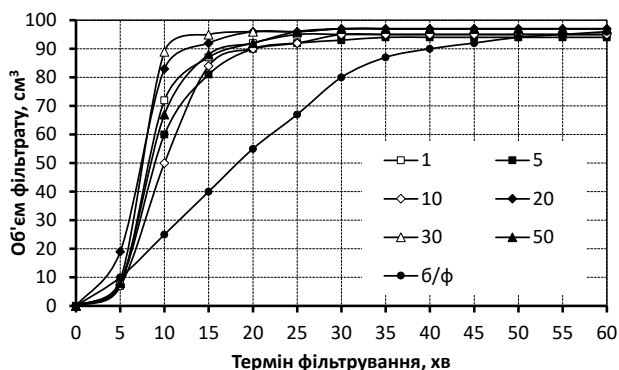


Рис. 6. Залежність швидкості фільтрування суспензії в часі при $K = [\text{PO}_4^3, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, різних концентраціях Zetag (мг/дм³), температурі розчину 21°С, початковій жорсткості 17,0 мг-екв/дм, рН 6,71 (б/ф – без флокулянта)

Тому очевидно, що в процесах видалення із рідкої фази твердих часток фосфату магнію можливо рекомендувати використання флокулянту катіонного типу з молекулярною масою до 20 млн. в.о. Zetag – 7692 фірми Сіба.

Висновки. Проведеними дослідженнями встановлено, що для ефективного відділення утвореного при пом'якшенні води осаду фосфату магнію варто дотримуватися стехіометричного співвідно-

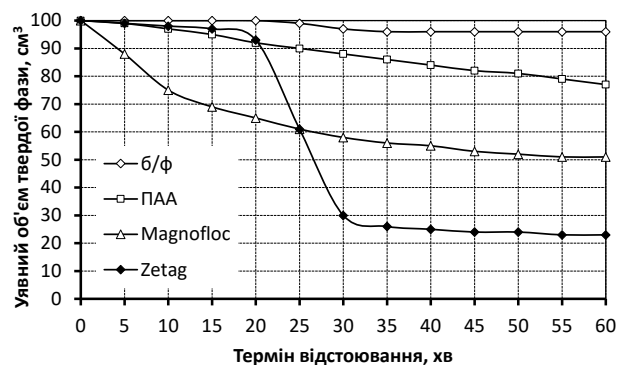


Рис. 7. Залежність швидкості відстоювання суспензії в часі при $K = [\text{PO}_4^3, \text{мг-екв}]/[\text{Mg}^{2+}, \text{мг-екв}] = 1$, концентрації флокулянтів 20 мг/дм³, температурі розчину 21°С, початковій жорсткості 33,0 мг-екв/дм, рН 6,82 (б/ф – без флокулянта)

шення між компонентами, оскільки саме за такої умови забезпечується максимальна швидкість фільтрування. Разом з тим встановлено, що гірше всього відбувається відділення твердої фази в нейтральному середовищі і пришвидшується в кислому та лужному. Оскільки корегування водневого показника в офісних та побутових умовах недоцільно, досліджено можливість інтенсифікації процесу розділення фаз з використанням додаткових реагентів – флокулянтів. Із досліджених трьох типів флокулянтів перевага надана флокулянту катіонного типу з молекулярною масою до 20 млн. в.о. Zetag – 7692 фірми Сіба. Використання цього флокулянту забезпечує отримання 96 – 98 % фільтрату при тривалості фільтрування 10 – 15 хв. Найбільш ефективною можна вважати концентрацію флокулянту в 30 мг/дм³, при якій процес фільтрування триває 15 хв і в подальшому кількість фільтрату не збільшується.

Список літератури:

1. Горєв Л. М., Пелешенко В. І., Хільчевський В. К. Гідрохімія України. К.: Вища школа, 1995. 307 с.
2. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. ДСанПіН 2.2.4 – 171 – 10.
3. Рябчиков Б. Е. Современные методы подготовки воды для промышленного и бытового использования. М.: ДеЛи принт, 2004. 301 с.
4. Карелин В. А. Водоподготовка. Физико-химические основы процессов обработки воды: учебное пособие. Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2012. 97 с.
5. Лифшиц О. В. Справочник по водоподготовке котельных установок. Москва: Энергия, 1980. 288 с.
6. Шаблій Т. О., Радовенчик В. М., Гомеля М. Д. Застосування нових реагентів і технологій в промисловому водоспоживанні. К.: Інфодрук, 2014. 302 с.
7. Дикаревский В. С., Караваев И. И. Обработка воды для теплоэнергетических установок ж/д транспорта. Москва: Транспорт, 1986. 460 с.
8. Радовенчик Я. В., Гордієнко К. Ю., Крисенко Т. В., Радовенчик В. М. Ефективність видалення іонів магнію з води в процесах її пом'якшення. Вісник НТУУ "КПІ імені Ігоря Сікорського". Серія: Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2022. № 4. С. 88 – 94. <https://doi.org/10.20535/2617-9741.4.2022.269815>.
9. Василенко К. В. Одержання високочистих орто- і пірофосфатів натрію, калію, амонію та кальцію для використання в якості харчових добавок: дис. на здобуття наук. ступеня доктора філософії. Дніпро. 2021. 199 с.

Radovenchyk I.V., Gordienko K.Yu., Krysenko T.V., Ivanenko O.I. INCREASING THE EFFICIENCY OF REMOVAL OF MAGNESIUM COMPOUNDS FROM WATER IN ITS SOFTENING PROCESSES

The paper presents the results of the study of the effectiveness of the separation of the formed solid phase from water in the processes of its softening. It was established that phosphate ions are quite effective in the processes of removing magnesium ions from aqueous solutions. However, the overall efficiency of the softening process can be ensured only in the case of complete separation of solid and liquid phases, which can be realized by settling or filtering. For low- and medium-capacity systems, the use of filtration, which does not require high-volume units, seems to be more appropriate. The rate of filtration of a suspension of magnesium phosphate particles is largely dependent on the conditions and is best performed in an acidic or alkaline environment. However, the correction of the hydrogen indicator is not always convenient in the conditions of using systems of low and medium productivity, therefore, to increase the filtration speed, it is necessary to use additional reagents in the form of flocculants. A positive effect is provided by all types of flocculants - nonionic flocculant polyacrylamide, anionic flocculant Magnofloc - 336 from Ciba, cationic flocculant Zetag - 7692 from Ciba. When using polyacrylamide, it is positive that the main volume of the liquid phase is filtered in the first 15-20 minutes, and with a flocculant dose of 50 mg/dm³ - even in the first 10 minutes. At the same time, the volume of the liquid phase is approximately 80% of the initial volume of the suspension. The remaining 20% of the liquid phase remains in the sediment. A comparison of the obtained results with filtration under the same conditions without a flocculant shows that its addition contributes to the rapid dehydration of the suspension, but significantly increases the humidity of the sediment. The use of Magnofloc - 336 anionic flocculant is characterized by lower sediment moisture. At a dose of 50 mg/dm³, 80% of the total suspension volume is filtered in 5 minutes, 96% - in 60 minutes. However, the best results are obtained when using Zetag - 7692 cationic flocculant. This flocculant allows you to obtain 96 - 98% of the filtrate with a filtration time of 10 - 15 minutes. The flocculant concentration of 30 mg/dm³ seems particularly attractive, at which the filtration process lasts 15 minutes and the amount of filtrate does not increase thereafter. An increase in the flocculant dose leads to a decrease in the filtration rate.

Key words: water softening, magnesium, phosphates, flocculant, hardness ions.

УДК 666:973.6.

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/35>**Римар Т.Е.**

Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля

ЗАСТОСУВАННЯ ГРАНУЛЬОВАНОГО ЗАПОВНЮВАЧА ДЛЯ УДОСКОНАЛЕННЯ ВЛАСТИВОСТЕЙ РІДИННОСКЛЯНИХ ТЕПЛОІЗОЛЯЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ ОТРИМАНИХ ПІД ДІЄЮ НВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ

У статті проводиться дослідження застосування пористого гранульованого заповнювача при виробництві композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла. Причому пропонується використовувати не заздалегідь спучені гранули, а сирцевий неспучений напівфабрикат та проводити виготовлення теплоізоляційних виробів шляхом одночасної поризації гранул і зв'язуючого. Такий прийом дозволяє отримати об'ємно омонолічений матеріал, у якому простір між гранулами заповнено спученим зв'язуючим, обмеженим більш щільним поверхневим шаром, який утворюється при дії НВЧ випромінювання. Перевагою застосування НВЧ технології спучення рідинноскляної композиції є можливість об'ємного нагріву зсередини матеріалу, що на відміну від традиційного конвективного нагріву, дозволяє одночасно спучити і гранули, і зв'язуюче та при вірному виборі співвідношення гранул до зв'язуючого, отримати однорідноструктурний матеріал, який представляє собою не окремо склеєні гранули, а монолітний блок та відрізняється достатньо високими фізико-механічними властивостями. В роботі було встановлено, що оптимальним є співвідношення кількості гранульованого заповнювача до зв'язуючого 1 : 1. В даному випадку матеріал має рівномірну пористу структуру і низьку середню густину – 220-240 кг/м³, водопоглинання при цьому складає 30-31 %, сорбційна вологість – 4-5 %, а міцність 0,8-0,9 МПа та 0,6-0,7 МПа відповідно на згин і на стиск. Застосування зернистого заповнювача сприяє зменшенню усадкових процесів і дозволяє уникнути розтріскування матеріалу при подальшій експлуатації, підвищує міцнісні властивості теплоізоляційних матеріалів, оскільки гранули мають деяку пластичну деформацію, а також знижує його гігроскопічність, завдяки створенню під дією НВЧ випромінювання ущільненої поверхневої оболонки.

Ключові слова: НВЧ випромінювання, рідинноскляні композиції, теплоізоляційні матеріали, зернистий заповнювач, зв'язуюче, фізико-механічні властивості.

Постановка проблеми. Теплоізоляційні матеріали на основі рідинного скла включають широку гаму матеріалів, основним структуроутворюючим елементом яких є продукти спучення гідратованих розчинних стекл (гідратованих лужних силікатів). За природою спучення рідинноскляні матеріали поділяються на термоспучені і спучені в результаті хімічної взаємодії рідинного скла зі спеціальними речовинами, що вводяться в сировинну суміш. До термоспучених матеріалів відносять зернисті, а також обжигові монолітні матеріали. До спучених хімічним шляхом – заливальні композиції, в які вводять газоутворюючий компонент.

Теплоізоляційні композиційні матеріали на основі рідинного скла залежно від способу затвердіння (полімеризації) основного компоненту ділять на матеріали холодного (за температури навколишнього середовища) і гарячого (термічного) спучення [1].

Переваги та недоліки ТІМ, отриманих шляхом термічного спучення, та шляхи їх удосконалення наведені на рис. 1.

На рис. 1 зазначено, що для усунення недоліків технології термічного спучення пропонується застосовувати НВЧ випромінювання замість традиційного конвективного нагріву.

Надвисокочастотне випромінювання або мікрохвильове випромінювання – електромагнітне випромінювання, що включає в себе дециметровий, сантиметровий і міліметровий діапазон радіохвиль (довжина хвилі від 1 м – частота 300 МГц до 1 мм – 300 ГГц). Однак межі між інфрачервоним, терагерцовим, мікрохвильовим випромінюванням і ультрависокочастотними радіохвилями приблизні і можуть визначатися по-різному. Діапазон довжин хвиль мікрохвильового випромінювання лежить між довжинами хвиль інфрачервоного світла і радіохвилями. Побутові та промислові мікрохвильові печі працюють на частоті 2,45 ГГц.



Рис. 1. Переваги та недоліки ТІМ, отриманих шляхом термічного спучення

Ця частота була обрана, як оптимальна по швидкості нагріву води і залишається незмінною у всіх печах, щоб уникнути інтерференції з радарними та телекомунікаційними системами [2].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням теорії і практики розвитку виробництва теплоізоляційних матеріалів (ТІМ) і виробів, в тому числі і на основі рідинного скла (РС), приділено увагу такими вченими, як Ю.П. Горлов, А.П. Меркин, К.Е. Горайнов, І.Л. Майзель, В.Г. Сандлер, М.Ф. Сухарев, М.І. Малявський, В.А. Лотов, М.Ю. Иванов, А.І. Кудяков, І.В. Гребенщиков, В.А. Китайцев, К.Д. Некрасов та ін. Ними сформульовані наукові концепції, розкриті закономірності отримання матеріалів з пористою структурою, що забезпечує високі функціональні властивості виробів, одержуваних з різного виду сировини, розроблені ефективні способи порутворення, викладені теоретичні основи формування оптимальної пористої структури, загальні принципи виробництва виробів з високопористих композицій.

Розширенню сфер застосування потужної НВЧ електроніки в технологічних процесах в останні роки сприяють завдання створення нових композиційних матеріалів з поліпшеними характерис-

тиками, питання інтенсифікації синтезу різних матеріалів, для утилізації і переробки відходів виробництва і т.ін.

Так у роботі [3] проаналізовані дані з мікрохвильового синтезу індивідуальних і багатокомпонентних оксидів. Наведені переваги і недоліки використання мікрохвильового нагріву при синтезі оксидних матеріалів.

У роботі [4] проведений аналіз методів формування під дією мікрохвильового випромінювання функціональних композиційних матеріалів в порошкоподібному виді, зокрема, ультрадисперсних наноструктурованих порошкоподібних зразків оксидів цинку, міді і оксиду ітрію, активованого іонами рідкоземельних елементів.

Великі перспективи має застосування НВЧ випромінювання для утилізації і переробки фосфогіпсів, які займають великі території і є джерелом екологічного забруднення довкілля. Результати досліджень, проведених у ВНТУ (Вінницькому Національному технічному університеті) показали, що водорозчинні фосфати і фториди переходять в нерозчинні з'єднання, що не випаровуються при термообробці. Такий метод нейтралізації не вимагає додаткових технологічних переподілів і екологічно ефективний. Взаємодія НВЧ випро-

мінювання із задалегідь нейтралізованим вапном, фосфогипсом, цементом і пуцолановими добавками забезпечує створення малоенергоємкої технології виготовлення водостійкого в'язучого. Наявність активованої НВЧ випромінюванням золи-виносу, фосфогипсу, вапна і опоковидного мергелю в умовах одного регіону (Вінницька область) створює сприятливі умови виробництва енергоефективних аналогів відомим алюмосульфатшлаковим цementsам (АСШЦ), які були розроблені в минулому столітті в МГСУ (МІСІ) [5].

Відомі приклади застосування мікрохвильового випромінювання і у технології силікатних матеріалів.

Наприклад, в патенті [6] спучений вермікуліт змішують з рідинним склом, меленим доломітом і іншими добавками, ущільнюють масу з коефіцієнтом стискування 2-3. Сушку сирих плит здійснюють в два етапи, причому на завершальному етапі використовують для нагріву НВЧ випромінювання.

Також відомий спосіб [7] отримання алюмосилікатного пористого матеріалу, який включає приготування сировинної суміші, що містить природний глинистий мінерал і воду, заповнення форми сировинною сумішшю, попереднє обезводнення суміші в полі джерела струму високої частоти, сушку і випалення, при цьому попереднє обезводнення під дією НВЧ випромінювання ведуть до вологості від 22 до 24%, джерело НВЧ випромінювання розташовують так, щоб напрям поширення випромінювання співпадав із заданою орієнтацією осі витягнутих пор в матеріалі, а сушку здійснюють у потоці інфрачервоного випромінювання з довжиною хвилі від 5 до 10 мкм при температурі від 40 до 110 °С. Недоліком цього способу є його низька продуктивність, оскільки проведення окремо кожної операції вимагає витрати часу і забезпечення розташування джерела НВЧ випромінювання, так щоб напрям поширення випромінювання співпадав із заданою орієнтацією осі витягнутих пор, що досить проблематично.

Використовуючи вилуговування порошку склобою за допомогою гідросилікату натрію при температурі 40-50°C [8] можна отримати пористі пінобетони використовуючи метод при якому виготовляють будівельні блоки, сформовані із суміші легких природних пористих заповнювачів з рідинним склом, шляхом спікання, наприклад, в НВЧ полі з питомою витратою енергії 0,7-1,5 кДж/см³.

Існує спосіб виробництва теплоізоляційних конструкційних матеріалів, що включає подрібнення силікат-брили, змішування її з модифікато-

ром, зміцнюючою добавкою – портландцементом, базальтовою мікрофіброю і водою, переміщення отриманої суміші в форму, теплову обробку струмами НВЧ протягом 15 хв при температурі 300 °С. Технічний результат – поліпшення фізико-механічних властивостей, зниження собівартості за допомогою зменшення енерговитрат і часу виготовлення теплоізоляційних виробів при прийнятних теплофізичних (міцнісних, звукоізоляційних, теплоізоляційних і ін.) характеристиках, а також при знакозмінних температурних впливах [9].

Постановка завдання. Застосування НВЧ випромінювання при виробництві розглянутих теплоізоляційних силікатних матеріалів полягає в їх спученні або сушці під впливом цього виду енергії. Більшість з них стосується отримання матеріалів в плитній формі шляхом спучення під дією НВЧ випромінювання композиції певного складу, що не містить зернистого заповнювача. Застосування ж зернистого заповнювача сприяє зменшенню усадкових процесів і дозволяє уникнути розтріскування матеріалу при подальшій експлуатації, підвищує міцнісні властивості ТІМ, оскільки гранули мають деяку пластичну деформацію, а також знижує його гігроскопічність, завдяки створенню під дією НВЧ випромінювання ущільненої поверхневої оболонки гранул. Тому застосування НВЧ випромінювання для отримання композиційних пористих силікатних матеріалів на основі рідинноскляного зернистого заповнювача і додатково поризованого зв'язуючого, так само на основі рідинного скла, є досить актуальним і новим дослідженням, яке дозволить отримувати якісні теплоізоляційні вироби з високими експлуатаційними властивостями.

Таким чином, **метою роботи** є визначення впливу зернистого заповнювача на властивості композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла, отриманих під дією НВЧ випромінювання.

В роботі [10] було спробовано здійснити процес спучення таких матеріалів і при традиційному конвектовному нагріві, однак отримані матеріали відрізнялись незадовільними зовнішнім виглядом і фізико-механічними властивостями.

Виклад основного матеріалу дослідження. Рідинноскляна композиція (зв'язуюче), що використовується для виготовлення композиційних теплоізоляційних матеріалів, містить: як основний компонент – рідинне натрієве скло, як модифікатори коагуляційно-кристалізаційних процесів – оксид цинку і напівводний гіпс, як пороутворювач – пероксид водню, як піностабі-

лізатор – оксиетильований алкілфенол. Як зернистий заповнювач використовуються неспучені гранули на основі РС і оксиду цинку.

В роботі пропонується дослідити вплив різного співвідношення гранульованого заповнювача до зв'язуючого на властивості композиційних матеріалів. Дані залежності наведені на рис. 2-4.

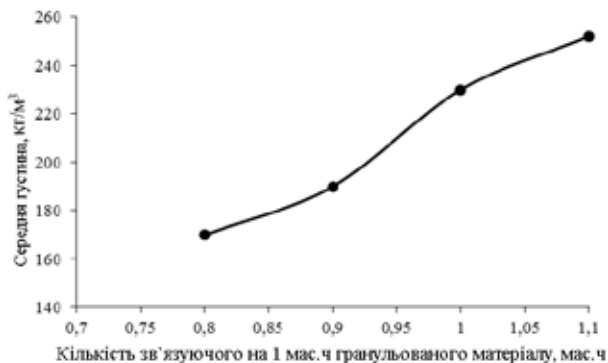


Рис. 2. Вплив співвідношення зв'язуючого до гранульованого заповнювача на середню густину композиційного матеріалу

Як видно з наведених даних, найнижча середня густина композиційного матеріалу, а саме $\sim 170 \text{ кг/м}^3$, спостерігається при співвідношенні гранульованого заповнювача до зв'язуючого 1 : 0,8. Проте така кількість зв'язуючого недостатня для отримання якісного блоку, оскільки не весь об'єм гранул покритий зв'язуючим і після закінчення спучення утворюється «хвиляста» поверхня зразка. При подальшому збільшенні співвідношення гранульованого заповнювача до зв'язуючого від 1 : 0,9 до 1 : 1,1 середня густина матеріалу збіль-

шується від 190 кг/м^3 до 250 кг/м^3 . При кількості зв'язуючого 1,1 мас.ч відносно 1 мас.ч гранульованого заповнювача не спостерігається склеювання гранул між собою в процесі спучення, оскільки зв'язуючого надто багато, і в міжгранульному просторі мають великі порожнечі. Оптимальним співвідношенням зв'язуючого до гранул є 1 : 1, оскільки в цьому випадку матеріал має прийнятний зовнішній вигляд і низьку середню густину $\sim 230 \text{ кг/м}^3$.

Як видно з рис. 3, збільшення показників водопоглинання і сорбційної вологості мають майже прямопропорційну залежність від співвідношення кількості гранульованого заповнювача до зв'язуючого. При збільшенні зв'язуючого на 1 мас.ч гранульованого матеріалу збільшується і водопоглинання, і гігроскопічність, оскільки зростає пористість матеріалу у міжгранульному просторі.

Оптимальним є співвідношення кількості гранульованого заповнювача до зв'язуючого 1 : 1, в даному випадку водопоглинання складає 30-31 %, а сорбційна вологість – 4-5 %.

Як видно з даних рис. 4, при співвідношенні кількості гранульованого заповнювача до зв'язуючого 1 : 0,8 міцність на згин і стиск композиційного матеріалу складає 0,9-0,95 МПа і 0,65-0,7 МПа відповідно. Низька кількість зв'язуючого по відношенню до кількості гранульованого заповнювача дозволила досягти щільної упаковки гранул і їх склеювання між собою впродовж процесу спучення. Звідси і отримані результати міцнісних характеристик. Проте зовнішній вигляд такого матеріалу не

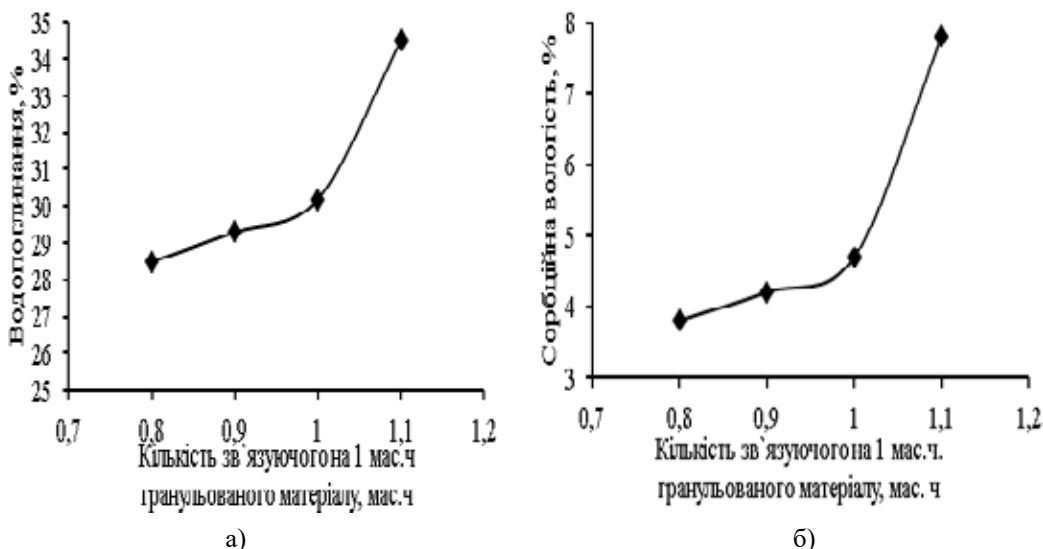


Рис. 3. Вплив співвідношення зв'язуючого до гранульованого заповнювача на водопоглинання (а) і сорбційну вологість (б) композиційного матеріалу

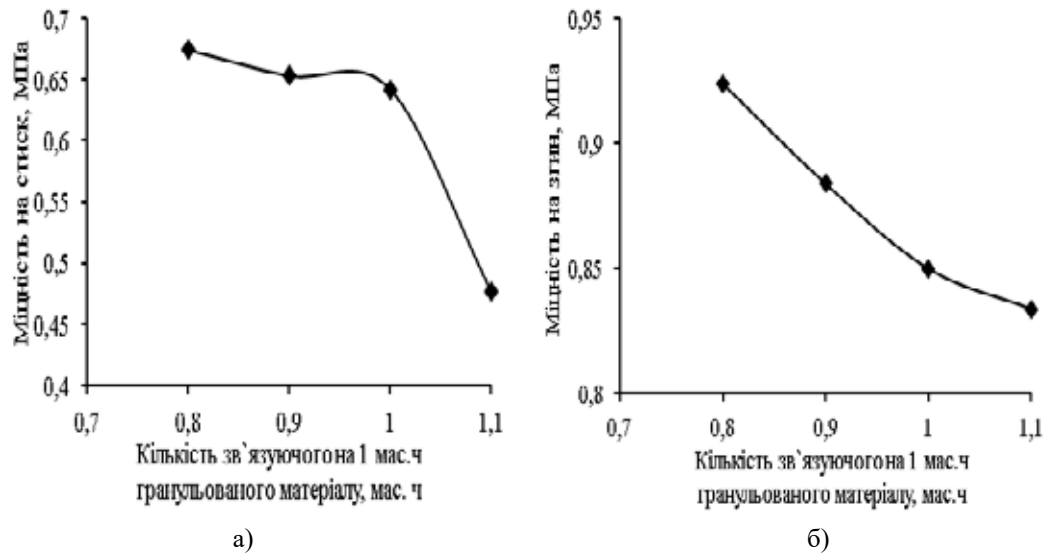


Рис. 4. Вплив співвідношення зв'язуючого до гранульованого заповнювача на міцність композиційного матеріалу: на стиск (а) і на згин (б)

є задовільним, оскільки, спучуючись, гранули створюють горбисту поверхню, виступаючи над шаром зв'язуючого. Зі збільшенням кількості зв'язуючого по відношенню до гранул 1,1 : 1, міцність на згин поступово зменшується до 0,8-0,85 МПа, оскільки росте пористість зразків, і основна частина зернистого заповнювача не склеюється між собою, а омонолічується за допомогою зв'язуючого. Такий же ефект спостерігається і для показника міцності на стиск – зі збільшенням вмісту зв'язуючого даний показник зменшується до 0,45-0,5 МПа. Оптимального значення міцнісних характеристик, що поєднуються із задовільним зовнішнім виглядом і дрібнопористою структурою матеріалу вдається досягти при співвідношенні зв'язуючого до гранульованого заповнювача 1:1. Так, міцність на згин для такого співвідношення складає 0,8-0,9 МПа, а на стиск – 0,6-0,7 МПа, що є задовільним для даної середньої густини матеріалу 220-240 кг/м³.

Висновки. На даний момент не налагоджено великомасштабного промислового виробництва композиційних матеріалів на основі рідинного скла шляхом термічного спучення. Обумовлено це нерівномірною тепловою обробкою зовнішніх і внутрішніх шарів РСК при застосуванні традиційного конвективного нагріву, а отримані таким чином ТІМ мають незадовільні експлуатаційні властивості. Дану проблему пропонується вирішити застосувавши НВЧ технологію спучення РСК, перевагою якої є можливість об'ємного нагріву зсередини матеріалу. Завдяки швидкому і інтенсивному об'ємному розігріву можна застосувати технологію одночасного спучення гранульованого напівфабрикату та зв'язуючого, що дозволяє отримати однорідно-структурний та об'ємно омонолічений матеріал, який представляє собою не окремо склеєні гранули, а монолітний блок та відрізняється достатньо високими фізико-механічними властивостями.

Список літератури:

1. Морозов А.П. Пенобетоны и другие теплоизоляционные материалы. Магнитогорск, 2008. 103 с.
2. Особенности и возможности микроволновой химии. URL: <http://bibliofond.ru/view.aspx?id=513806>.
3. Ванецев А.С. Спекание оксидных порошков с использованием микроволнового воздействия. М.: МГУ, 2011. 32 с.
4. Павленок А.В., Подденежный Е.Н., Бойко А.А. Особенности получения наноструктурированных оксидных порошков с использованием микроволнового излучения. Вестник Гомельского государственного технологического университета им. П.О. Сухого, 2011. № 3. С. 45-53.
5. Шахин И.Х., Шапоров В.П. Обработка природного карбоната кальция в СВЧ печи при воздействии поля бегущей электромагнитной волны. *Интегрированные технологии и энергосбережение*. Харьков: НТУ "ХПИ", 2004. №2. С. 96-107.
6. Сырьевая смесь для огнезащитных теплоизоляционных плит и способ их изготовления: пат. 2126776 Россия: МПК С04В28/26. № 98112982/03; заявл. 16.07.1998, опубл. 27.02.1999. Бюл. № 6.
7. Способ получения алюмосиликатного пористого материала: пат. 2197423 Россия: МПК С01В33/26, С04В38/00. № 2002104052/12; заявл. 19.02.2002, опубл. 27.01.2003. Бюл. № 5.

8. Руменцев Б.М, Зайцева Е.И. Получение теплоизоляционных материалов из стеклобоя. *Известия вузов. Строительство*. 2002. № 8. С. 24-26.
9. Способ изготовления конструкционно-теплоизоляционного материала: пат. 2524364 Россия: МПК С04В28/26, С04В111/20, С04В111/40. № 2011145253/03; заявл. 11.08.2011; опубл. 27.07.2014. Бюл. № 21.
10. Римар Т.Е. Дослідження впливу НВЧ випромінювання на властивості композиційних теплоізоляційних матеріалів на основі рідинного скла. *Науковий вісник будівництва*. Харків. 2021. Т. 104. № 2. С. 284-291.

Rimar T.E. APPLICATION OF GRANULAR AGGREGATE TO IMPROVE THE PROPERTIES OF LIQUID GLASS THERMAL INSULATION MATERIALS OBTAINED UNDER THE ACTION MICROWAVE RADIATION

The article investigates the use of porous granular aggregate in the production of composite thermal insulating materials based on liquid glass. Moreover, it is suggested to use not pre-swollen granules, but a raw unswollen semi-finished product and to manufacture heat-insulating products by simultaneous poring of granules and binder. This technique allows you to obtain a volumetrically homogenized material in which the space between the granules is filled with a swollen binder, limited by a denser surface layer, which is formed under the action of microwave radiation. The advantage of using microwave technology for swelling liquid-glass composition is the possibility of volumetric heating from the inside of the material, which, unlike traditional convective heating, allows you to simultaneously swell both the granules and the binder, and with the correct selection of the ratio of granules to the binder, obtain a homogeneously structured material, which is not individually glued granules, but a monolithic block and has sufficiently high physical and mechanical properties. In the work, it was established that the optimal ratio of the amount of granular aggregate to the binder is 1:1. In this case, the material has an acceptable appearance and a low average density – 220-240 kg/m³, water absorption is 30-31%, hygroscopicity – 4-5%, and strength 0.8-0.9 MPa and 0.6-0.7 MPa, respectively, for bending and compression. The use of granular aggregate helps reduce shrinkage processes and avoids cracking of the material during further operation, increases the strength properties of thermal insulating materials, since the granules have some plastic deformation, and also reduces its hygroscopicity, thanks to the creation of a compacted surface shell under the influence of microwave radiation.

Key words: *microwave radiation, liquid glass compositions, thermal insulation materials, granular aggregate, binder, physical and mechanical power.*

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 612.292:667.54

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/36>**Єфімова В.Г.**

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК БІОЛОГІЧНО АКТИВНОЇ ДОБАВКИ З НАСІННЯ САФЛОРУ

В дослідженні показано, що покращити харчування населення можливо шляхом розширення асортименту продуктів повсякденного вживання, за рахунок введення до складу біологічно активних добавок.

Дані роботи показують, що у рамках імпортозаміщення особливу увагу слід приділяти отриманню та використанню у виробництві продуктів харчування компонентів з регіональної сировини. В якості такого компонента в дослідженні було обрано продукти переробки насіння сафлору, що має унікальний хімічний склад, а саме містить велику кількість поліненасичених жирних кислот.

Показано, що на першому етапі дослідження біологічно активної добавки з меленого насіння сафлору було визначено органолептичні та фізико-хімічні властивості біологічно активних речовин, що входять до її складу.

В роботі відпрацьовано схему виготовлення біологічно активної добавки, а також визначено її органолептичні показники згідно ДСТУ 8840:2019.

Згідно ДСТУ ISO 10565:2003 одночасно було визначено масова частка вологи та вміст олії.

Показано, що для визначення перекисного та кислотного числа згідно ДСТУ 4350:2004 та ДСТУ 4570:2006 було проведене виділення масла з біологічно активної добавки насіння сафлору.

Визначено розмір частинок біологічно активної добавки, а також встановлено склад харчових та біологічно активних речовин, що містяться у біологічно активній добавці згідно ДСТУ 7491:2013.

Методом спектроскопії визначено вміст азоту та сирого протеїну у біологічно активній добавці ДСТУ 7169:2010.

З використанням метода газорідинної хроматографії було визначено жирно-кислотний склад біологічно активної добавки.

З використанням хроматографічних методів проведено аналіз амінокислотного складу білка біологічно активної добавки з насіння сафлору.

Визначено біологічну цінність біологічно активної добавки шляхом розрахунку амінокислотного скору.

Проведені дослідження показали, що біологічно активна добавка, яка була досліджена має високу харчову цінність, містить високий відсоток жиру білка та цілого ряду мікро- та макронутриєнтів, які є незамінними елементами здорового харчування.

Розрахунок амінокислотного скору показав сумарну долю незамінних амінокислот у білку біологічно активної добавки, а також дозволив визначити лімітуючу амінокислоту.

Отже, в результаті виконаного комплексу науково-дослідних робіт експериментально обґрунтовано вибір біологічно активної добавки з меленого насіння сафлору, яку можна буде використовувати у хлібопекарному виробництві.

Ключові слова: біологічно активна добавка, насіння сафлору, кислотне число, перекисне число, амінокислотний скор, нутрієнтний склад, незамінні амінокислоти.

Постановка проблеми в загальному вигляді.

Відомо, що однією з причин зростання кількості хронічних захворювань населення працездатного віку, є незбалансоване харчування за нутрієнтним складом. Поліпшення харчування населення можливе шляхом розширення асортименту збагачених продуктів повсякденного споживання, до яких

у нашій країні, безсумнівно, належить хліб. Маючи традиційно звичний смак і аромат, енергетичну і харчову цінність, хліб корисний практично всім категоріям населення незалежно від віку, фізичної активності, особливостей життєдіяльності.

При цьому особливу увагу слід приділяти отриманню та використанню при виробництві

продуктів харчування компонентів з регіональної сировини, одними з яких можуть бути продукти переробки насіння сафлору, що має унікальний хімічний склад.

Таким чином, актуальними є дослідження в галузі розробки технології отримання біологічно активної добавки з насіння сафлору, що дозволяють отримувати на основі раціонального використання рослинної сировини продуктів, які сприяють покращенню структури харчування населення.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Дослідження [1] показують, що квітки та насіння сафлору використовуються у світовій фармацевтичній практиці. Зокрема, за кордоном застосовується настій, настоянка, відвар квіток, олія насіння та суха сировина сафлору. У фармацевтичній промисловості України сафлору використовують

лише як компонент для виробництва біологічних активних добавок (БАД) [2].

В роботах [3, 4] наведено технологічні розробки існуючих функціональних продуктів харчування, зокрема, хлібобулочні вироби з харчовими інгредієнтами у дозах від 3% до 20-30% до загальної маси борошна – висівками, різними зерновими продуктами, соєвим борошном та інш; з мікронутрієнтами – вітамінами, мінеральними та іншими речовинами. Показано, що на сьогоднішній час асортимент таких продуктів невеликий, і є необхідність розширення асортименту продуктів харчування з рослинними біокоректорами, що, у свою чергу, буде сприяти розширенню сегмента здорових продуктів Українського ринку, і буде ще одним із шляхів раціональної переробки нетрадиційної рослинної сировини. В роботах [5, 6] зазначено, що останніми роками в раціонах харчування знизився вміст життєво важливих харчових речовин.

Відповідно до положення теорії адекватного харчування, поліненасичені жирні кислоти (ПНЖК) є функціональними інгредієнтами їжі,

що грають важливу роль у будові клітин, зменшенні рівня холестерину в крові та профілактиці формування атеросклерозу нестача ПНЖК у продуктах харчування, що відзначається сьогодні у всіх розвинених країнах світу, викликало бурхливе зростання робіт зі створення продуктів харчування із підвищеним вмістом ПНЖК.

При створенні таких продуктів необхідно враховувати комплексну оцінку ефективності ПНЖК, що передбачає аналіз хімічної структури та властивостей добавок із вмістом ПНЖК, на підставі яких прогнозується їх можливий вплив на реоло-

гічні, структурномеханічні властивості та фізіологічні ефекти, зумовлені споживанням харчового продукту, що містить ПНЖК.

Формування цілей статті. Метою роботи є теоретично обґрунтувати та підтвердити доцільність використання помеленого насіння сафлору у якості біологічно активної добавки, а саме дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників, складу харчових та біологічно активних речовин, що входять до її складу з використанням сучасних фізико-хімічних та органолептичних досліджень.

Виклад основного матеріалу досліджень. Серед місцевих ресурсів нетрадиційної рослинної сировини для хлібобулочних виробів можна виділити сафлор. Сафлор (сафлор фарбувальний, американський шафран, дикий шафран (лат. *Carthamus tinctorius* L.) – однорічна рослина з сімейства Айстрових (Asteraceae).

Сафлор фарбувальний широко застосовується у виробництві харчової олії, яку одержують з насіння цієї рослини.

Воно містить тригліцериди двічі ненасиченої лінолевої кислоти (70%) і тричі ненасиченої ліноленової кислоти (10%), причому з порівняно високим вмістом вітаміну Е. У сафлорі містяться пігменти (картамін), лігнани, полісахариди, ефірні олії, жирні олії (арахідонова кислота, лінолева кислота, ліноленова кислота, пальмітинова кислота, стеаринова кислота). Завдяки високому вмісту ПНЖК та невибагливості в обробці сафлор значно виграє серед інших олійних культур.

Нестача лінолевої кислоти у продуктах харчування або порушення метаболізму лінолевої кислоти іноді є причиною деяких захворювань.

Лінолева кислота зміцнює структуру клітинних мембран, при внутрішньому застосуванні сприяє зниженню рівня холестерину. Крім цього, лінолева кислота, що входить до складу олії сафлору володіє здатністю до регулювання метаболізму ліпідів, зниження маси тіла та жирових відкладень.

Все вищезазначене дає можливість застосування сафлору у якості нетрадиційної рослинної добавки для виробництва хлібобулочних виробів для тих, хто має надмірну масу тіла.

В цьому дослідженні для отримання біологічно активної добавки насіння сафлору було промите, висушене гарячим повітрям до остаточної вологості 10%, а потім помелене до розміру частинок не більше 0,4 мм.

Визначення органолептичних показників біологічно активної добавки здійснювали за стан-

дартною методикою згідно ДСТУ 8840:2019 Насіння олійних культур. Методи визначення кольору та запаху.

Органолептичні показники біологічно активної добавки з меленого насіння сафлору наведено у Таблиці 1.

Масову частку вологи та вмісту олії в біологічно активній добавці з насіння сафлору визначали за ДСТУ ISO 10565:2003. Насіння олійних культур. Одночасне визначення вмісту олії та вологи.

Масову частку вологи та вмісту олії в біологічно активній добавці з насіння сафлору визначали за ДСТУ ISO 10565:2003. Насіння олійних культур. Одночасне визначення вмісту олії та вологи.

Далі було проведено виділення масла з біологічно активної добавки для визначення перекисного та кислотного числа здійснювали методом настоювання в етиловому ефірі.

Таблиця 1

Органолептичні показники біологічно активної добавки

Найменування показника	Характеристика показника	Вимоги ДСТУ 8840:2019
Зовнішній вигляд	Подрібнений сипкий продукт без сторонніх та великих включень	Подрібнений сипкий продукт без сторонніх та великих включень
Колір	Сірий з коричневим відтінком	Сірий з коричневим відтінком
Запах	Властивий запах сафлору. Без стороннього запаху	Властивий запах сафлору. Без стороннього запаху

Кислотне число олії, яка була виділена з біологічно активної добавки визначали згідно з ДСТУ 4350:2004. «Олії. Методи визначення кислотного числа», а перекисне число за ДСТУ 4570:2006 «Жири рослинні та олії. Методи визначення».

Розмір частинок визначали шляхом просіювання через сито лабораторне з діаметром отворів 355 мкм.

Склад харчових та біологічно активних речовин, що містяться у біологічно активній добавці визначали за загальноприйнятими методиками:

ДСТУ 7491:2013 Насіння олійне, макухи та шроту. Визначання вологи, жиру, протеїну та клітковини методом спектроскопії в ближній інфрачервоній зоні; ДСТУ 7169:2010 Корми, комбікорми, комбікормова сировина. Методи визначення вмісту азоту і сирого протеїну. Жирно-кислотний

склад біологічно активної добавки з насіння сафлору та метилові ефіри насичених жирних кислот визначали методом газорідинної хроматографії на газорідинному хроматографі GC-2010 Shimadzu (Німеччина) з полум'яно-іонізаційним детектором.

Аналіз амінокислотного складу білка біологічно активної добавки з насіння сафлору проводили на хроматографі Dionex Ultimate 3000 Thermo Scientific (США).

Біологічну цінність визначали шляхом розрахунку амінокислотного скору. Амінокислотний скор визначали як відсоткове співвідношення вмісту незамінної амінокислоти в білку продукту до її вмісту в «ідеальному білку» за формулою:

$$A = \frac{X_1}{X_2} \cdot 100\%, \quad (1)$$

X_1 – масова частка незамінної амінокислоти у продукту, що досліджується, мг на 1 г білка; X_2 – масова частка незамінної амінокислоти в «еталонному білку», мг на 1 г білка. Еталонний білок — це теоретичний білок, ідеально збалансований за амінокислотним складом. Відповідно, СКОР усіх амінокислот в еталонному білку дорівнює 100%.

У таблиці 2 наведені фізико-хімічні показники біологічно активної добавки з насіння сафлору.

Таблиця 2

Фізико-хімічні показники біологічно-активної добавки з насіння сафлору

Найменування показник	Значення показника	Норма
Масова доля вологи, %	7,9	не більше 10
Масова доля масла, %	35,2	35,0-37,0
Кислотне число масла, що виділяється з біологічно активної добавки, мг КОН/г	1,7	не більше 4
Перекисне число масла, що виділяється з біологічно активної добавки, ммоль активного кисню/кг	4,5	не більше 10
Розмір частинок, мм	менше 0,37	не більше 0,37

Отже, дані, що наведені у Таблицях 1 та 2 свідчать, що біологічно активна добавка, що досліджується за органолептичними та фізико-хімічними показниками відповідає вимогам ДСТУ-Н CODEX STAN 192:2014 «Харчові добавки. Номенклатура та загальні вимоги».

У Таблиці 3 наведено склад харчових та біологічно активних речовин, що містяться у біологічно активній добавці з насіння сафлору.

Таблиця 3

Склад харчових та біологічно активних речовин, що містяться у харчовій добавці з насіння сафлору

Найменування харчової та біологічно активної речовини	Вміст харчової та біологічно активної речовини у 100 гр біологічно активної добавки
Жири, г	35,2
Білки, г	16,2
Моно- та дисахариди, г	1,2
Харчові волокна, г	33,0
Мінеральні речовини, г	6,5
Макроелементи, мг:	
Калій	687,3
Кальцій	78,2
Магній	353,3
Фосфор	644,2
Мікроелементи:	
Залізо, мг	4,9
Вітаміни, мг:	
B ₁	1,16
B ₂	0,42
B ₅	4,04
PP	2,28
E	1,23
Енергетична цінність, ккал	454,4

З даних таблиці 3 випливає, що біологічно активна добавка з насіння сафлору характеризується підвищеною харчовою цінністю, відрізняється високим вмістом жиру (у середньому 35,2%), білка (в середньому 16,2%) та цілого ряду мікро- та макронутриєнтів. Макро та мікроелементи, а також вітаміни, що містяться у харчовій добавці з мelenого насіння сафлору, – незамінні елементи здорового харчування.

Жирно – кислотний склад ліпідів, що міститься у харчовій добавці з мelenого насіння сафлору наведено у Таблиці 4.

Результати досліджень амінокислотного складу і розрахунку амінокислотного скору білка наведено у Таблиці 5.

Дані таблиці 5 свідчать, що сумарна доля незамінних амінокислот у білку біологічно активної добавки з насіння сафлору становить 31% від маси білка, що обумовлює його високу біологічну цінність (74,4%). Розрахунок амінокислотного скору у білковій біологічно активній добавці свідчить про те, що лімітуючою амінокислотою є триптофан. Дані наведені в Таблиці 6.

Таблиця 4

Жирно-кислотний склад ліпідів, що міститься у харчовій добавці з мelenого насіння сафлору

Найменування жирної кислоти	Вміст жирної кислоти, % від загальної суми жирних кислот
Насичені:	8,9
пальмітинова кислота C16:0	6,4
стеаринова кислота C18:0	2,3
бегенова кислота C22:0	0,2
Мононенасичені:	9,8
олеїнова кислота C18:1 (ω-9)	9,0
елаїдинова кислота C18:1 (ω-9)	0,8
Поліненасичені:	81,3
лінолева кислота C18:2 (ω-6)	48,4
руменова кислота C18:2	29,4
арахідонова кислота C20:4 (ω-6)	1,8
докозагексоєнова кислота C22:6 (ω-6)	1,7

Таблиця 5

Амінокислотний склад та амінокислотний скор білка біологічно активної добавки мelenого насіння сафлору

Найменування амінокислоти	Вміст амінокислоти, мг на 1 г білку/ амінокислотний скор відносно еталонного білка, %
Валін	54,2/90,4
Лейцин	57,8/81,9
Ізолейцин	29,4/73,5
Лізін	34,2/62,2
Метіонін + Цистин	38,9/111,1
Треонін	35,8/89,5
Триптофан	1,1/1,1
Фенілаланін+тирозин	63,7/106,2
Сума незмінних амінокислот, мг	305,6
Біологічна цінність білка, %	74,4

Таблиця 6

Амінокислотний скор білків біологічно активної добавки

Найменування амінокислоти	Вміст амінокислоти, мг на 1 г білку
Валін	90
Лейцин	82
Ізолейцин	73
Лізін	62
Метіонін + Цистин	110
Треонін	90
Триптофан	1
Фенілаланін+тирозин	108

Отже аналіз даних хімічного складу біологічно активної добавки з меленого насіння сафлору показав, що її можна використовувати при виробництві хліба.

Висновки із зазначених проблем і перспективи подальших досліджень. В результаті проведених досліджень визначено органолептичні

та фізико-хімічні показники біологічно активної добавки з меленого насіння сафлору.

Таким чином було показано можливість застосування біологічно активної добавки у рецептурах хліба з метою покращення якості та підвищення харчової цінності за рахунок зростання у готових виробів вмісту білка, харчових волокон та поліненасичених жирних кислот.

Список літератури:

1. Middeke J., Vivanti A. Predictors of nutrition care process knowledge and use among dietitians internationally. *Journal of human nutrition and dietetics*. 2022. Vol 35 (3). P. 466–478.
2. Alobo A.P. Effect of grewia venusta fresen mucilage on the proximate composition, physical and sensory properties of bread produced from wheat and cassava composite flours. *International Journal of Food Studies*. 2021. Vol. 6. P. 192–200.
3. Bergman J.W. Registration of ‘Nutrasaff’ safflower. *Journal of Plant Registration*. 2017. Vol. 2(1). P. 1639–1640.
4. Golkar P. Inheritance of flower color and spinelessness in safflower. *Journal of Genetics*. 2020. Vol. 2 (89). P. 259–262.
5. He J. New polyacetylene glucosides from the florets of *Carthamus tinctorius* and their weak anti-inflammatory activities. *Carbohydr Res*. 2018. Vol 13. P. 1903–1908.
6. Jabeen N. The activity of antioxidant enzymes in response to salt stress in safflower (*Carthamus tinctorius* L.) and sunflower (*Helianthus annuus* L.) seedlings raised from seed treated with chitosan. *J. Sci. Food Agric.* – 2019. Vol. 7. P. 1699–1705.

Yefimova V.G. STUDY OF THE PHYSICAL AND CHEMICAL CHARACTERISTICS OF A SAFFLOWER BIOLOGICALLY ACTIVE SUPPLEMENT

In the following, it is shown that it is possible to improve the eating habits of the population by expanding the range of products of everyday living, for the sake of introducing biologically active additives to the warehouse.

These works show that, within the framework of import substitution, special respect should be given to the selection of products from the regional raw. In the capacity of such a component, the product of the processing of safflower, which has a unique chemical warehouse, and itself avenges a large number of polyunsaturated fatty acids, was taken into consideration.

It is shown that at the first stage of adding biologically active additives from ground safflower, the organoleptic and physical and chemical powers of biologically active speeches were determined, which can be included up to the warehouse.

In the work, a scheme for the preparation of a biologically active additive was developed, as well as organoleptic indications.

The mass part of water and oil together was assigned at the same time.

It is shown that for the determination of peroxide and acid number oil was studied with a biologically active additive based on safflower.

By the method of spectroscopy, it was determined instead of nitrogen and crude protein in the biologically active additive. It is shown that the fatty acid warehouse of the biologically active additive was determined by gas chromatography.

Using various chromatographic methods, an analysis of the amino acid composition of the protein of a biologically active additive from safflower was carried out.

A study was carried out to confirm that a biologically active additive, that it can be a high food value, to average a high amount of fat protein and a whole series of micro- and macronutrients, as essential elements of healthy eating.

Investigation of the amino acid score by showing the total proportion of non-amino acids in the protein of biologically active additives, as well as allowing the use of a limiting amino acid.

Key words: *biologically active additive containing safflower, acid number, peroxide number, amino acid score, nutrient warehouse, essential amino acids.*

УДК 641.05

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/37>

Фролова Н.Е.

Національний університет харчових технологій

Польова О.А.

Національний університет харчових технологій

Цикало Д.Ю.

Національний університет харчових технологій

Віноградов В.М.

Національний університет харчових технологій

Демчук П.В.

Національний університет харчових технологій

Біленький П.С.

Національний університет харчових технологій

ПРО МОЖЛИВОСТІ РОЗШИРЕННЯ АЮРВЕДИЧНОЇ ПРОДУКЦІЇ З ПРИРОДНИМИ РОСЛИННИМИ ДЖЕРЕЛАМИ

Базуючись на аюрведичних принципах харчування, магістрами професійно-освітньої програми «Технологія дієтичних та аюрведичних харчових продуктів» Національного університету харчових технологій, розроблено рецептури аюрведичних страв з природними рослинними джерелами – хумусу з інноваційними рішеннями щодо використання гарбуза сорту Мускатний, топленого масла Гхі та підбраною композицією прянощів: коріандр, фенхель, куркума, м'ята. Аюрведичний хумус за органолептичними характеристиками має блідо-помаранчевий колір, можливі помаранчеві вкраплення гарбуза; консистенція – густа, однорідна, допускається присутність волокон гарбуза; запах – пряний, аромат приємний; притаманний запеченому гарбузу, смак – збалансований в міру солоний. В страві, присутні за аюрведичними рекомендаціями всі шість смаків, зокрема солодкість гарбуза, кислий присмак лимона, гострота часнику, терпкість кунжутної пасти та нуту, гіркість та пряність від композиції прянощів та гарбузового насіння.

Розроблена рецептура овочевого пікулі з огірками актуальна для людей конституції Вата Доші. Запропоновані прянощі – куркума, лавровий лист, гірчиця та мускатний горіх створюють зігріваючий ефект та баланс цієї Доші. Колір страви – світло-коричневий; консистенція – рідка; овочі – м'які, соковиті; страва має приємний аромат прянощів, пряний, злегка гострий; Відчутні всі шість смаків (найбільш виражені – солоний, гострий та терпкий).

Розроблено оригінальний пряний соус на основі ананасового пюре з додаванням порошку куркуми, пластівців чилі та соку лайму. Переважаючими смаками страви є кислий і солодкий, що підсилює баланс Пітта Доші. Горіхова паста з фісташок з додаванням меду та кардамону, рожевої гімалайської солі у якості додаткового джерела мікроелементів.

У дослідженнях використано органолептичний, фізичний, фізико-хімічні та розрахункові методи. Обґрунтовано технологічні параметри, вміст та співвідношення інгредієнтів.

Проведені дослідження та запропоновані рецептури аюрведичних страв популяризують шлях до здорового, повноцінного життя за аюрведичними рекомендаціями. Поширюють аюрведичне вчення в Україні, дозволяють розширити асортимент страв аюрведичної кулінарії у меню ресторанних підприємств, аюрведичних центрів, привернуть увагу до Аюрведи, стародавньої науки про здоровий розум, наміри, життя людини. Розкривають актуальність персоналізованого харчування для індивідуальної конституції людини.

Ключові слова: Аюрведа, персоналізоване, рослинні джерела, конституція людини, Вата Доша, Пітта Доша, аюрведичні страви.

Постановка проблеми. За вченням Аюрведи, людина, яка правильно харчується не потребує ліків, а людині, що харчується неправильно, жодні ліки не допоможуть

Усуваючи першопричини, тіло зцілює себе. Ця модель самозцілення має першорядне значення для розуміння переваг Аюрведи, системи знань, які визнають наявність індивідуальних типів метаболізму [1].

В аюрведичному вченні важливе значення належить концепції п'яти елементів (Землі, Води, Вогню, Повітря і Ефіру). У людському тілі вони проявляють себе як три базові принципи або енергії (тридоша): Вата (поєднання Повітря і Ефіру), Піта (Вогонь та Вода) і Капха (поєднання Води і Землі). Саме вроджене співвідношення цих елементів визначає не тільки вигляд і фізіологію людини, але і її характер, схильності, розумові здібності, а також хвороби, до яких людина схильна

Аномальний (неприродний) дисбаланс Дош викликається довгим впливом на організм негативних чинників (внутрішніх і зовнішніх) [2].

Харчування є основною необхідністю існування людини. За положеннями Аюрведи позитивне харчування базується на трьох фундаментальних принципах [3]:

1. Забезпечення наявності в споживаних продуктах всіх шести смаків, зокрема солодкий, кислий, солоний, їдкий, гіркий, терпкий.

2. Подібне збільшує подібне, а протилежності зменшують один одного.

3. Здатність людини до самозцілення.

В розвинутих країнах, де є достаток продовольства, знижений дефіцит вітамінів, в тому числі за рахунок дієтичних добавок, збалансоване за сучасними нормами фізіологічних потреб харчування існує проблема здоров'я, повноцінного довголіття, щасливого існування. Це викликає потребу в пошуку та використанню альтернативних підходів до здорового існування, повноцінного харчування, врівноваженого оцінювання власних потреб та вчинків.

Тому актуальним питанням сьогодні є пропозиції аюрведичних підходів у відповідності до переважаючої конституції людини, розуміння важливості розроблення аюрведичних страв індивідуального раціону.

Цим завданням відповідає розвиток в Україні принципів та положень Аюрведи із залученням розробок аюрведичних страв та продуктів, створених магістрами освітньої програми «Технологія дієтичних та аюрведичних харчових продуктів» Національного університету харчових технологій.

Метою написання статті є представлення наукового обґрунтування та практичних розробок аювердичної продукції з рослинними джерелами відповідно індивідуальної конституції людини для максимального збалансування природних життєвих станів.

В ході наукових пошуків рецептур аюрведичних страв з природними рослинними джерелами та їх практичного завершення використовувалися знання як традиційної науки про харчування так і відомості з аюрведичних джерел та приписів. Це дозволило знайти необхідні додаткові компоненти для інноваційних рецептур, встановити їхню корисність для людей різних індивідуальних вимог.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наприкінці минулого століття, ВООЗ визнала Аюрведу як одну із найбільш перспективних систем для розвитку медичної науки [4].

За Аюрведою їжа харчує розум, тіло, відчуття і душу людини. Саме вона є основою життя, самозцілення організму та наповнення наших почуттів. Це є ритуал життя від першого ковтка материнського молока до спільних вечерь із рідними і друзями. Аюрведична кухня і стиль життя – основи Аюрведичної традиції [5].

Аюрведа приділяє першочергове значення індивідуального раціону, відповідно пріоритетної за Пракриті Дошею [2].

Найбільш дієвим методом управління Дошами за допомогою харчування є вплив смаків. Смаки, як і Доши, складаються з першоелементів в певних комбінаціях і, в залежності від домінуючих в них пар елементів, мають свої особливі властивості, володіють прямим впливом на фізіологію тіла і розуму [5].

Аюрведична кулінарія не існує без використання спецій, трав і приправ. Вони балансують Доші, регулюють Агні та чинять позитивну дію на організм людини. Спеціями служать коріння, кора і насіння деяких рослин, які використовуються цілими, в подрібненому виді або у вигляді порошку. Трави - це свіже листя і квіти. В якості приправ використовують такі смакові добавки, як сіль [6].

Велике значення мають нові пошуки та розроблення інноваційної ресторанної продукції, виготовленої за аюрведичними принципами та знаннями.

Споживання хумусу в Україні в останні роки зростає. Наразі регулярно купують хумус вегетаріанці і вегани, саме цей сегмент контингенту споживачів залежить від дефіциту білкових речовин, в тому числі з рослинних джерел [7].

Тому вдосконалення традиційних рецептурних композицій хумусу, особливо чутливих людських конституцій, зокрема Вата Доша є актуальним, економічно та соціально виправданим.

Пікулі – це замариновані з прянощами дрібні овочі [8]. У баночках можуть розміщуватися найрізноманітніші овочі переважно карликових сортів. Крім овочів, по банкам закладають боби, качани кукурудзи, яблука, груші, вишні з кісточками, сливу.

Економічна зацікавленість виробників у випуску соусної продукції пояснюється тим, що розширювати асортимент соусів, регулювати собівартість та ціну не так важко, як в інших галузях. До того ж соусна продукція гнучка до зміни хімічного складу, харчової та біологічної цінності. Соуси є джерелом вуглеводів і жирів, в меншій мірі – білків, мінералів і вітамінів [9].

Спираючись на дослідження підприємств, які безпосередньо виготовляють соусну продукцію, кожний другий споживач зацікавлений у соусі з оригінальним смаком або екзотичними добавками, адже така добавка може урізноманітнити щоденний раціон.

Трави та спеції відіграють центральну роль у традиційній аюрведичній кухні. Ретельний і свідомий вибір спецій робить багатьох страв більш засвоюваним та смачним, а також допомагають стимулювати травлення та регулювати внутрішній баланс. Спеції, приправи та прянощі поєднують одне: усі вони є підсилювачами смаку та апетиту. Посилюють смак страв, відтіняють, розкривають за правильним їх використанням [10].

Виклад основного матеріалу дослідження.

До складу класичної рецептури хумусу входять вісім основних компонентів: нут, паста тхіна, часник, лимонний сік, сіль, оливкова олія, перець чорний, вода питна. До інноваційного аюрведичного хумусу пропонується вводити такі компоненти: гарбуз сорту Мускатний, топлене масло Гхі, коріандр, фенхель, куркума, м'ята.

Інгредієнти додаються до страви, щоб забезпечити аюрведичні рекомендації, зокрема доповнення солодким смаком та оригінальними пікантними нотками.

Гарбуз – запікають без шкірки з додаванням топленого масла, перетворюють на пюре і додають у готовий хумус. Внесення гарбуза з переважаним солодким смаком у страву пропонується здійснювати у декілька етапів. За рекомендаціями аюрведи, щодо правильності використання даного продукту, а саме гарбуза: спочатку проводиться механічна обробка – миття, чищення від шкірки

та насіння; нарізання на кубики середнього розміру для зручності в подальшому подрібненні та теплової обробки – запікання до готовності, при температурі 175°C протягом 20-25 хвилин, з додаванням невеликої кількості вершкового або топленого масла. Наступним етапом є подрібнення у пюре блендером і додавання до готового хумусу.

Було досліджено 5 дослідних зразків хумусу з різними співвідношеннями інгредієнтів (табл. 1).

Таблиця 1
Варіанти відсоткового вмісту інгредієнтів дослідних зразків хумусу

Сировина № 1 № 2	№ 3 № 4 № 5				
	Вміст, %				
Нут	43,3	43,5	43,5	43,5	43,5
Гарбуз	13,0	14,5	15,2	16,7	17,8
Топлене масло (Гхі)	5,0	5,3	5,5	5,7	5,9
Гарбузове насіння	1,2	1,2	-	1,2	1,2
Коріандр	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8
Фенхель	3,6	3,6	3,6	3,6	3,6
Куркума	4,2	4,2	4,2	4,2	4,2
М'ята	1,8	1,8	1,8	1,8	1,8

Прянощі за обраними зразками комбінації змішують механічно, в одній ємності, після ретельного подрібнення. Потім їх додають до попередньо збитого запеченого гарбуза. А після готову суміш додають до готового класичного хумусу. Результати органолептичної оцінки дослідних зразків композицій показано у табл. 2.

Таблиця 2
Сенсорне оцінювання дослідних зразків аюрведичного хумусу

№	Показник	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
1	Зовнішній вигляд	3,7	3,9	4,9	4,8	3,5
2	Колір	3,2	4,5	4,7	4,6	3,0
3	Запах	4,0	4,9	4,5	4,8	3,2
4	Консистенція	4,8	4,8	4,4	4,4	4,5
5	Смак	4,5	4,5	4,8	3,8	4,5
Загальна оцінка		4,04	4,52	4,66	4,48	3,74

За сенсорною оцінкою видно, що кращим варіантом є зразок № 3.

Розроблена рецептурна композиція хумусу з додаванням гарбуза, здійснена за аюрведичними рекомендаціями, має блідо-помаранчевий колір,

можливі помаранчеві вкраплення гарбуза; консистенція – густа, однорідна, допускається присутність волокон гарбуза; запах – пряний, приємний; притаманий аромат запеченого гарбуза, бобових та прянощів, смак – збалансований в міру солоний, присутні всі шість смаків – солодкість гарбуза, кислий присмак лимона, гострота часнику, терпкість кунжутної пасти та нуту, гіркість та пряність від композиції прянощів та гарбузового насіння.

Розробка рецептури овочевого пікулі за аюрведичними рекомендаціями з додатковими смаками актуальна, особливо для людей конституції Вата Доша, із пріоритетною зігріваючою дією, підтримкою імунітету та покращення функції багатьох органів та систем. Саме у майстерному підборі спецій і трав, які виявляють приховані смакові відтінки навіть звичайних продуктів аюрведичні приписи демонструють можливість створення цілеспрямованих смакових характеристик, важливих для балансу Дош.

Науковим обґрунтуванням та практичними дослідженнями з'ясовано додаткову композицію рослинних джерел до овочевого пікулі, яка складається з прянощів – куркума, лавровий лист, гірчиця та мускатний горіх.

Досліджено 4 дослідні зразки з різним відсотковим співвідношенням введення прянощів (табл. 3).

Таблиця 3

Варіанти дослідних зразків композиції прянощів в технології овочевого пікулі

Прянощі	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
	Вміст, %			
Куркума	2,7	1,7	0	0,5
Лавровий лист	0	2,0	1,0	1,5
Гірчиця	4,0	0	2,0	0
Мускатний горіх	0,1	0	0,2	0,3

В табл. 4. наведено бальове оцінювання за сенсорним аналізом дослідних композицій прянощів.

За бальною оцінкою видно, що кращим варіантом є композиція прянощів за дослідним зразком № 3.

Досліджували різні варіанти дослідних зразків пікулі щодо відсоткового вмісту основних рецептурних інгредієнтів (табл. 5).

Порівнюючи загальну оцінку в балах сенсорного аналізу визнано, що найкращим варіантом рецептури аюрведичної страви «Пікулі з огірком» є зразок №4 з оцінкою 52,5. Колір страви – світло-коричневий відтінок; консистенція – рідка; овочі – м'які, соковиті. Страва має приємний аромат прянощів, пряний, злегка гострий; від-

Таблиця 4

Бальове оцінювання за сенсорним аналізом дослідних зразків композицій прянощів

№	Показник	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4
1	Зовнішній вигляд	2,7	4,2	4	3,3
2	Колір	3,2	4	3,3	4,3
3	Запах	4,1	5	3	4,2
4	Консистенція	4,1	4,1	4,1	3,9
5	Смак	4	4,2	4,1	3,2
Загальна оцінка		3,62	3,50	4,3	3,78

Таблиця 5

Варіанти рецептур зразків «Пікулі із огірками»

Сировина	№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
	Вміст, % маси				
Огірки	73,0	68,0	74,0	70,0	72,0
Цибуля ріпчаста	5,1	12,1	3,0	9,0	9,9
Обрана композиція прянощів	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
Часник	5	4,4	-	1,5	2

чутні всі 6 смаків (найбільш виражені – солоний, гострий та терпкий).

За аюрведичними рекомендаціями з рослинними джерелами розроблено оригінальний пряний соус на основі ананасового пюре з додаванням порошку куркуми, пластівців чилі та соку лайму. Переважачим смаком страви є кислий та солодкий, меншою мірою гострий та гіркий, терпкий. Отже соус включає майже всі 6 смаків. Така страва покращуватиме травний вогонь та матиме зігріваючу вір'ю.

В табл. 6 наведено рецептуру соусу «Ананасний».

Таблиця 6

Рецептура соусу «Ананасний»

№	Назва сировини	Витрати сировини на 1 кг продукту	
		Брутто	Нетто
1	Ананас	850	700
2	Куркума	30	30
3	Чилі	40	40
4	Лайм	60	50
5	Селера	30	30
6	Петрушка	30	30
7	Пастернак	40	40
8	Цукор	80	80
Вихід		1000	

В табл. 7 наведено характеристику готової страви.

Таблиця 7

Характеристика аюрведичного соусу «Ананасний»

Показник	Характеристика
Зовнішній вигляд	Приємний, апетитний
Колір	Жовтий
Смак	Солодко-кислуватий, пряний, з присмаком чилі
Запах	Приємний, притаманний інгредієнтам рецептури
Консистенція	Рідкувата

Забезпеченню населення збалансованим харчуванням, у відповідності до переважаючої конституції та розширення асортименту аюрведичних страв спрямовано розроблення за аюрведичними рекомендаціями рецептуру горіхової пасти з фісташок з додаванням меду та кардамону, рожевої гімалайської солі у якості додаткового джерела мікроелементів.

Завдяки такого поєднання було досягнуто збалансованого впливу на конституцію людей в яких домінує Вага-доша, при цьому утримуючи в балансі інші Доші. Вплив на Пітта дає змогу збільшити Агни організму (табл. 8).

Таблиця 8

Аюрведичні характеристики дослідної страви «Горіхова паста з фісташками»

Інгредієнти рецептури	Смак (раса)	Вір'я	Віпак	Дія	Вплив на доші
Фісташки	Солодкий,	охолодж.	солодкий	М'яка дія на травлення	V↓; P↑; K↑
Мед	солод.	зігрів.	солодкий	сприяє травленню	V↓; P↑; K↓
Кардамон	гострий	Зігрів.	солодкий	легкий, масляний, сприяє травленню	V↓; P↓; K↓
Сіль рожева	солоний	охолодж.	солодкий	Стимулює агні	V↓; P↑; K↑
Загальний вплив					V↓; P↓↑; K↑↓

Таблиця 9

Характеристика аюрведичної пасти

Показник	Характеристика
Зовнішній вигляд	Приємний, апетитний
Колір	зелений
Смак	Солодкий, пряний, з відчутним смаком спецій та ніжним горіховим присмаком
Запах	Приємний, притаманний інгредієнтам рецептури
Консистенція	Густа однорідна

В табл. 9 зібрано якісні характеристики аюрведичної пасти.

Висновки. Аюрведична наука, її положення та рекомендації дедалі стають світовим брендом, який

підкоряє все більшу кількість прихильників, як серед виробників, так і серед споживачів. Розширення асортименту аюрведичних страв є важливим інструментом комерційного позиціонування аюрведичної продукції.

Список літератури:

1. Чарака-самхіта. Глави 7–10 першого розділу / Переклад із санскриту та коментарі Д. В. Бурби // Східний Світ № 3, К: Інститут сходознавства ім. А. Ю. Кримського НАНУ, 2017. С. 84–99.
2. Янакананда. Аюрведа – питание и сознание: рецепты и советы для здоровья тела, духа и души : пер. с нем. / Янакананда. – Москва-Санкт-Петербург : Диля, 2010. 176 с.
3. Агніваса, А. Введение в Аюрведу /пер. с англ. М.: Профит-Стайл, 2011. 160 с.
4. Traditional and ayurvedic foods of Indian origin /Sarkar P., Lohith K.D.H., Dhumal C., Panigrahi S.S., Choudhary R. (2015) Journal of Ethnic Foods, 2 (3) , pp. 97-109.
5. Козіонова, А. В. Ведична кулінарія для сучасних господинь / А. В. Козіонова. 12-е изд. Москва: Філ. кн., 2015. 272 с.
6. Н. Фролова, Байбак С.В., Коваленко О.П., Кучерявий І.А. Розробка технології чайних напоїв відповідно до приписів аюрведичної кулінарії/ Вчені записки Таврійського національного університету ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2021, № 1, Т. 32(71), Ч. 2.
7. Технология продукции общественного питания: Учебник / Мглинец А. И., Акимова Н. А., Дзюба Г. Н. и др.; Под ред. А. И. Мглинца. СПб.: Троицкий мост, 2010. 736 с.; ил.
8. Янакананда. Аюрведа – питание и сознание: рецепты и советы для здоровья тела, духа и души / пер. с нем. Москва Санкт-Петербург : Диля, 2010. 176 с.

8. Антонова Р.П. Сборник изысканных рецептов XX века для предприятий общественного питания. Москва : ПрофиКС, 2007. 136 с.
9. Сімахіна Г.О., Українець А.І. Інноваційні технології та продукти. Оздоровче харчування. К.: НУХТ, 2010. 294 с.
10. Лад Васант, Фроули Давид. Травы и специи. Пер. с англ., 6-е издание. М.: Саттва. 2006. 320 с.

Frolova N.E., Poleva O.A., Tsykalo D.Yu., Vynogradov V.M., Demchuk P.V., Bilenkyi P.S.

OPPORTUNITIES TO EXPAND AYURVEDIC PRODUCTS WITH NATURAL PLANT SOURCES

Based on the Ayurvedic principles of nutrition, Masters of Vocational Education programme "Technology of Dietary and Ayurvedic Food Products" of the National University of Food Technology have developed recipes of Ayurvedic dishes with natural plant sources - hummus with innovative solutions of using nutmeg pumpkin, ghee and a selected composition of spices: coriander, fennel, turmeric, mint. By organoleptic characteristics Ayurvedic hummus has a pale orange colour; orange pumpkin inclusions are possible; consistency - thick, homogeneous, the presence of pumpkin fibers is allowed; smell - spicy, aroma is pleasant; inherent to baked pumpkin, taste - balanced, moderately salty. In the dish, all six flavours are present according to Ayurvedic recommendations, particularly the sweetness of pumpkin, the sourness of lemon, the sharpness of garlic, the tartness of sesame paste and chickpeas, the bitterness and spiciness of the composition of spices and pumpkin seeds. The recipe developed for vegetable pickle with cucumbers is relevant for people of Vata Dosha constitution. Suggested spices - turmeric, bay leaf, mustard and nutmeg create a warming effect and balance this Dosha. The colour of the dish is light brown; the consistency is liquid; the vegetables are soft, juicy; the dish has a pleasant spicy, spicy, slightly tangy aroma; All 6 flavours are tangible (the most pronounced are salty, spicy and tart). Developed an original spicy sauce based on pineapple puree with Turmeric powder, chilli flakes and lime juice. The predominant taste of the dish is sour and sweet, which enhances the balance of Pitta Dosha. Pistachio nut paste with the addition of honey and cardamom, pink Himalayan salt as an additional source of micronutrients. Organoleptic, physical, physico-chemical and calculation methods were used in the research. The technological parameters, content and ratio of ingredients were justified. The conducted research and proposed recipes of ayurvedic dishes popularize the way to a healthy, full life according to ayurvedic recommendations. They spread Ayurvedic doctrine in Ukraine, expand the range of Ayurvedic cuisine in the menu of restaurant establishments, ayurvedic centers and draw attention to Ayurveda, an ancient science of a healthy mind, intentions and human life. Reveal the relevance of personalized nutrition to an individual's constitution.

Key words: Ayurveda, personalized, plant sources, human constitution, Vata Dosha, Pitta Dosha, Ayurvedic dishes.

Ющенко Н.М.

Національний університет харчових технологій

Фролова Н.Е.

Національний університет харчових технологій

Шульженко В.В.

Національний університет харчових технологій

Запорожець О.В.

Національний університет харчових технологій

Романовський Д.С.

Національний університет харчових технологій

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ АНГЛІЙСЬКИХ МАННИХ ПУДИНГІВ

На основі аналізу та узагальнення результатів наукових досліджень обґрунтовано удосконалення технології англійських пудингів шляхом заміни у складі рецептури молока коров'ячого рослинним аналогом на основі кокосового горіху, що дозволить рекомендувати продукт споживачам з обмеженнями щодо вживання незбираного молока. Запропонована повна заміна цукру у складі рецептури англійського манного пудингу на натуральний підсолоджувач – сухий екстракт листя стевії, що не впливає на зміну рівня глюкози у крові, має «нульові» показники глікемічного індексу та калорійності. Але оскільки рівень солодкості стевіозиду, що є основним компонентом сухого екстракту листя стевії, більш як у 200 разів перевищує сахарозу, для використання у складі англійського пудингу запропоновано суху суміш екстракту листя стевії та еритрітолу (1:39) у кількості 12,5%. Застосування такої комбінаційної суміші забезпечує точне дозування та рівномірність розподілу суміші у продукті. Задля підвищення поживної цінності, збагачення пудингу комплексом біологічно активних речовин та формування оригінальних органолептичних якостей до складу рецептури англійського манного пудингу введено порошок полуниці сублімаційного сушіння у кількості 10% та мускатного горіху у кількості 0,025%.

Дослідження поживної цінності та калорійності нового виду англійського пудингу довели ефективність запропонованих рішень: вміст вуглеводів у продукті знизився у середньому в 1,3 рази, тоді як вміст жиру збільшився у 2,4 рази за рахунок природньої жирної компоненти кокосового горіху, що складається в основному із середньоланцюгових жирних кислот, є легкозасвоюваною, сприяє розщепленню тригліцеридів в організмі людини, не містить холестерину та за рахунок порівняно невисокої температури плавлення надає ніжності та пластичності консистенції пудингу. Таким чином, за невеликого збільшення калорійності 223 ккал/100 г (199 ккал/100 г калорійність пудингу, виробленого за класичною рецептурою) англійський манний пудинг, вироблений за удосконаленою технологією, буде мати вищу поживну цінність та стане вдалим доповненням до меню як закладів ресторанного господарства, так і для приготування у домашніх умовах.

Ключові слова: пудинг, лактальбумін, рослинний аналог молока, кокосове молоко, сухий екстракт листя стевії, еритритол, сублімована полуниця, прянощі.

Вступ. На сучасному етапі ресторанне господарство є однією з найприбутковіших, однак і найбільш ризикованих сфер економічної діяльності. Зміни соціально-економічного середовища як зовнішнього фактору безпосередньо впливають на галузь ресторанного господарства. Слід зазначити, що не існує еталонної моделі ведення ресторан-

ного бізнесу, і хоча історично це одна з найдавніших сфер діяльності, вона потребує інноваційних рішень, адже умовою конкурентоспроможності ресторанної індустрії є швидка орієнтація на споживача, постійне удосконалення та запровадження нових та удосконалення існуючих технологій, постійне оновлення та розширення асортименту за

традиціями як національної кулінарії, так і оригінальних етнічних страв народів світу.

Серед них – манний пудинг, або його іще часто називають англійським, смачна та поживна страва, що може бути вдалим доповненням до будь-якого раціону, але його підвищена калорійність та доволі високий вміст цукру встановлює ряд обмежень щодо його споживання.

Отже, розглянемо основні тенденції удосконалення технологій харчової продукції, впровадження яких дозволить зробити англійський пудинг смачним та корисним продуктом харчування, що відповідає рекомендаціям сучасної дієтології.

Передусім, слідування тренду здорового харчування, що набуває дедалі більшої популярності не тільки серед людей середнього та похилого віку, а й серед молоді. Це важливо, бо, як відомо, здорове, правильне харчування, є одним з найбільш значущих аспектів способу життя людини і факторів його здоров'я. Давня мудрість говорить: «Ми є те, що ми їмо».

Основні позиції – це відмова від надмірностей у їжі, зниження калорійності та корегування раціону харчування відповідно до віку і способу життя. Загальновизнаною проблемою сьогодення також є недостатність у раціоні харчування середньостатистичної людини ряду есенціальних макро- та мікронутрієнтів: повноцінного білка, поліненасичених жирних кислот, вітамінів, біодоступних мінеральних сполук тощо, натомість він часто перенасичений вуглеводами із високим глікемічним індексом. Окрім цього, порушення режиму харчування, зловживання рафінованими продуктами, фаст-фудом та «їжа на ходу», призводить до виникнення ряду метаболічних захворювань, що суттєво погіршують якість життя. Тому удосконалення технологій харчової продукції та розробка нових продуктів підвищеної поживної цінності та зниженої калорійності є актуальним та своєчасним.

На сьогодні збільшується частка населення, що страждає на непереносимість окремих харчових інгредієнтів, зокрема непереносимість лактози, порушення метаболізму цукру, алергійні реакції на білки молока: як казеїн, так і лактальбумін, непереносимість глютену тощо. Це зумовлює розвиток індустрії спеціального харчування, а оскільки уразливі категорії населення повинні дотримуватись обмежень у харчуванні протягом усього життя, доцільно запроваджувати продукцію спеціального харчування як для роздрібно торгівлі, так і для закладів ресторанного господарства.

Перспективним напрямом наукових досліджень є заміна у складі рецептур харчової продукції коров'ячого молока на рослинні аналоги на основі кокосового горіху, сої, вівса, зерна гречки, а також горіхів. Слід відзначити, що кокосове молоко заслужено користується попитом серед споживачів завдяки високій поживній цінності та органолептичним якостям.

Іншим аспектом удосконалення технологій є пошук перспективних інгредієнтів для заміни цукру у складі рецептур харчової продукції. Наука має переконливі дані про те, що утримання вживаних вільних цукрів на рівні менше 10% від загального енергоспоживання істотно знижує ризик розвитку ожиріння і карієсу. При цьому рекомендації цього керівництва ВООЗ не стосуються цукрів, присутніх у свіжих овочах і фруктах, а також в молоці, оскільки факти щодо їх негативних впливів відсутні.

Саме тому удосконалення технології англійських пудингів є актуальною, адже заміна цукру на природні підсолоджувачі, в якості яких можуть бути використані мед бджолиний, сироп агави, кленовий сироп, екстракт стевії тощо.

Крім того, використання продуктів переробки плодово-ягідної сировини дозволить додатково збагатити продукти комплексом біологічно активних речовин та урізноманітнити смако-ароматичні властивості. Перевага продуктів переробки порівняно зі свіжими плодовою та ягідною сировиною полягає у позбавленні залежності від сезонності, стабільними показниками щодо безпечності і якості, визначеними режимами та термінами її зберігання, що дозволить мінімізувати втрати сировини упродовж технологічного циклу.

Таким чином, завданнями подальших наукових досліджень є удосконалення технологій англійських пудингів шляхом заміни у складі рецептур коров'ячого молока рослинним аналогом на основі кокосового горіху, обґрунтування вибору та визначення раціональних кількостей використання підсолоджувача рослинного походження та продуктів переробки плодово-ягідної сировини. Вирішення поставлених завдань дозволить підвищити поживну та біологічну цінність англійських пудингів, знизити глікемічний індекс продукції, урізноманітнити асортимент та розширити коло потенційних споживачів цієї кулінарної страви.

Метою роботи є наукове обґрунтування та удосконалення технології англійських пудингів на основі рослинних аналогів молока зі зниженим глікемічним індексом та підвищеною поживною цінністю.

Аналітичний огляд літературних джерел. Традиційно для виробництва англійських манних пудингів використовують коров'яче молоко. Задля розширення можливостей використання продукту у харчуванні людей із проявами алергійних реакцій на білки незбираного молока, було вирішено до складу рецептури вводити рослинний аналог на основі горіху кокосу – кокосове молоко. Порівняльний аналіз хімічного складу екстракту горіху кокосу та коров'ячого молока наведено у таблиці 1 [1].

Таблиця 1

Порівняльна характеристика складу, поживної та енергетичної цінності кокосового напою та коров'ячого молока

Нутрієнт	Кількість	
	кокосове молоко [2]	коров'яче молоко [3, 4]
Вода	67,6 г	87,7 г
Білок	2,29 г	3,2 г
Загальний ліпід (жир)	23,8 г	3,6 г
Мінеральні речовини	0,72 г	0,80 г
Вуглеводи, за різницею	5,54 г	4,80 г
Клітковина, загальна дієтична	2,2 г	-
Цукор, усього, включаючи NLEA	3,34 г	4,8 г
Кальцій, Ca	16 мг	120 мг
Залізо, Fe	1,64 мг	67 мкг
Магній, Mg	37 мг	12 мг
Фосфор, P	100 мг	95 мг
Калій, K	263 мг	140 мг
Натрій, Na	15 мг	50 мг
Цинк, Zn	0,67 мг	400 мкг
Мідь, Cu	0,266 мг	12 мкг
Селен, Se	6,2 мг	3,7 мкг
Вітамін С, загальна аскорбінова кислота	2,8 мг	до 2 мг
Енергетична цінність (калорійність)	230/969 ккал/кДж	63/264 ккал/кДж

Аналіз хімічного складу показав, що кокосове молоко характеризується вищим вмістом жиру, що надаватиме ніжності пудингу, у ньому відсутній холестерин. Жирнокислотний склад гліцеридів жирової компоненти кокосового молока якісно відрізняється від коров'ячого, окрім того горіх кокосу містить тригліцериди, що допомагають розщеплювати ліпіди та виводити їх з організму [5], що обумовлює його використання у дієтичному харчуванні.

Гліцериди кокосової олії, як і гліцериди молочного жиру, містять переважно насичені жирні кислоти. Співвідношення між мононенасиченими, полі-

ненасиченими та насиченими жирними кислотами (МНЖК:ПНЖК:НЖК) становить як 4,9:1:179 [6].

Аналізуючи жирнокислотний склад кокосової олії, можна зробити висновок, що в ній переважають середньоланцюгові жирні кислоти (каприлова, капрінова, лауринова), що легко засвоюються у травному тракті, завдяки чому покращується робота травної системи та організм більш ефективно поглинає поживні речовини їжі [7].

Крім того, температура плавлення кокосової олії становить 23...25°C, тоді як молочного жиру – близько 28...33°C. Більш низька температура плавлення забезпечуватиме ніжність консистенції манного пудингу з використанням кокосової олії, а більш високий вміст жиру у кокосовій олії порівняно з коров'ячим молоком дозволить зменшити кількість введення жирової компоненти у рецептурі пудингу.

Слід зазначити, білок кокосового горіху поступається за повноцінністю молочному білку, лімітуючою амінокислотою є валін, СКОР якого становить усього 68,0%, тоді як для білка коров'ячого молока ха лімітуючою амінокислотою також є валін, СКОР її становить 97,2% [5].

Крім того, порівняно з коров'ячим молоком, кокосове молоко більш багате на мінеральні сполуки такі як мідь, залізо, цинк, селен тощо.

Також, у зв'язку з популяризацією здорового харчування та відмови від надмірностей у їжі було вирішено цукор замінити на природній підсолоджувач – стевія. Адже, утримання вживаних вільних цукрів на рівні менше 10% від загального енергоспоживання істотно знижує ризик розвитку ожиріння і карієсу.

Екстракт листя стевії [8, 9] використовується як добавка, яка має нульовий глікемічний індекс, тобто не впливає на рівень цукру в крові, тобто як натуральний підсолоджувач:

- володіє бактеріостатичною дією по відношенню до карієсних бактерій;
- сприяє розширенню судин, знижуючи артеріальний тиск;
- за рахунок антиоксидантів знижує ризик появи раку підшлункової залози.

Оскільки джерелом стевії є трав'яниста квітуча рослина, то її слід з обережністю використовувати людям, що мають алергію на схожі рослини, а також людям, що приймають проти-грибкові й антихолестеринові препарати. Це цілком натуральний рослинний підсолоджувач, який використовують під час приготування:

- напоїв (сік, компот, кава, чай, лимонад);
- кремів та соусів;

- виробів із тіста (торти, пироги, хліб, булочки);
- шоколаду та цукерок.

Стевія є частиною правильного харчування, оскільки не засвоюється організмом, а значить, не збільшує вагу. Також вона корисна людям з діабетом другого типу, тому що не впливає на рівень глюкози в крові. А людям з гіпертензією даний екстракт допомагає нормалізувати кровообіг і вирівняти серцевий ритм.

Слід зазначити, що поряд із усіма позитивними властивостями, стевія має практично нульову калорійність, що збільшує її привабливість для використання у технологіях десертної продукції.

З метою збагачення харчової продукції комплексом макро- та мікронутрієнтів, у тому числі тими, що володіють антиоксидантними властивостями та урізноманітнення смако-ароматичних властивостей до складу рецептур вводяться різноманітні наповнювачі – ягоди, фрукти та продукти їх переробки.

Традиційно популярною ягодою, яку вживають як безпосередньо у їжу, так і використовують у складі харчових продуктів і кулінарних страв є полуниця.

Чисельними дослідженнями доведено, полуниця нормалізує обмін речовин в організмі, сприяє профілактиці авітамінозу, пригнічує розвиток вірусних інфекційних захворювань, зокрема грипу, сприяє зниженню рівня цукру в крові, поповнює дефіцит заліза та йоду, нормалізує обмін речовин та артеріальний тиск, знімає стрес і рятує від безсоння, є природним джерелом антиоксидантів, сприяє зниженню рівня холестерину [10].

Солодкувато-кислий смак полуниці обумовлений вмістом цукрів (до 7,5%) – глюкози і фруктози, в меншій кількості сахарози та органічних кислот. Вміст органічних кислот у ягодах полуниці – від 0,75 до 1,57%, переважає яблучна, у незначній кількості є лимонна, хінна, щавлева, янтарна та саліцилова кислоти. Полуниця є джерелом ряду біологічно активних речовин - антоціани, кварцетін, кемферол, флавоноїд фісетін (уповільнює процес старіння мозку і допомагає довше зберігати гарну пам'ять), вітаміни групи В, вітамін С, РР, фолієва кислота, мінеральні елементи, у тому числі дефіцитні ферум та йод [11].

Але плодоносіння полуниці є сезонним, а зберігання свіжих заморожених ягід вимагає додаткових затрат. Тому для виробництва харчової продукції та приготування кулінарних страв пропонується використання продуктів переробки ягід полуниці – варення, підварки, сиропи, а також

сушені ягоди (сухофрукти) або порошки розпилювального чи сублімаційного сушіння.

Перевагою використання сублімованих фруктів та ягід є те, що це на 100% натуральні ягоди і фрукти без додавання цукру, консервантів і барвників, тоді як, до прикладу, у виробництві сухофруктів, їх обробляють діоксидом сірки для запобігання появи в ягодах і фруктах комах і цвілі.

Крім того, сублімаційне сушіння відбувається за температурних режимів, що дозволяють максимально зберегти корисні властивості та органолептичні якості свіжих плодів та ягід [12].

Використання порошку полуниці сублімаційного сушіння дозволить компенсувати фактор сезонності свіжої ягідної сировини; необхідність забезпечення умов та додаткових витрат на зберігання у свіжому чи замороженому вигляді; зменшити втрати сировини при зберіганні та переробці, а також забезпечить стабільні показники якості та безпечності як самого інгредієнта, так і кулінарної страви з його використанням.

Матеріали і методи. При виконанні експериментальних досліджень використовували органолептичний метод визначення показників якості. Під час органолептичної оцінки якості експертами було дотримано послідовність - зовнішній вигляд, колір, запах, консистенція і смак.

При оцінці зовнішнього вигляду було проаналізовано та оцінено характер поверхні, однорідність порційних страв та їх структуру.

Разом з тим, експертами було виставлено бали від 1 до 5 по кожному органолептичному показнику.

Результати та обговорення. Тому, у ході розробки нової рецептури було вирішено:

– в якості основи пудингу обрати кокосове молоко;

– замінити цукор на природний підсолоджувач – суміш сухого екстракту листя стевії та ерітрітолу;

– збагатити біологічну та харчову цінність страви введенням до складу рецептури сублімованої полуниці.

Як базову використано класичну рецептуру англійського манного пудингу.

Склад компонентів, які входять до англійського манного пудингу за класичною рецептурою представлено у таблиці 2.

Для визначення поєднуваності та правильного співвідношення нових інгредієнтів готувались модельні зразки наступним чином: манна крупа відварювалась на кокосовому молоці, після закипання додавалась суха суміш екстракту листя стевії та ерітрітолу (TM GREEN LEAF) [12],

Таблиця 2

Перелік компонентів, які входять до складу англійського манного пудингу за класичною рецептурою [1]

Найменування сировини	Кількість г/порція
Крупа манна	100
Молоко коров'яче	175
Цукор білий кристалічний	50
Яйця	80
Родзинки	25
Панірувальні сухарі	5
Масло вершкове	7
Маса суміші (напівфабрикату)	442
Маса готового пудингу	400

термічне оброблення продовжувалось ще протягом (7±2) хв. Після цього суміш охолоджувалась до температури не вище (30±2)°С поступово додалися яєчні жовтки. Також, на цьому етапі додали сублімовану полуницю у кількості від 5 до 15 г на 100 г продукту. Потім в отриману масу поступово вводились збиті білки, отримана маса викладалась у форму для запікання, попередньо змащену маслом і посипану панірувальними сухарями. Випікання пудингу здійснювалось за температури 180–200°С протягом 45...50 хвилин.

Рациональна кількість доданих інгредієнтів визначалась на підставі органолептичного оцінювання модельних зразків. Результати органолептичної оцінки наведені на рис. 1–3.

На першому етапі визначалась рациональна кількість введення кокосового молока із розрахунку на 100 г манної крупи. Кількість кокосового молока становила: зразок 1 – 175 г; зразок 2 – 185 г; зразок 3 – 195 г і зразок 4 – 205 г. Кількості інших компонентів відповідали класичній рецептурі англійського манного пудингу (табл. 2). У якості контролю було взято також зразок з використанням коров'ячого молока, виготовлений за рецептурою таблиці 2.

Аналіз профілограми органолептичних властивостей англійського пудингу за змінних кількостей кокосового молока (рис. 1) показав, що кількість кокосового молока на 100 г манної крупи повинно бути збільшено на 20 грамів, що пояснюється вищим вмістом сухих речовин порівняно з коров'ячим молоком та відповідно нестачею води для набухання манної крупи.

Подальше збільшення кількості кокосового молока є недоцільним, оскільки призводить до

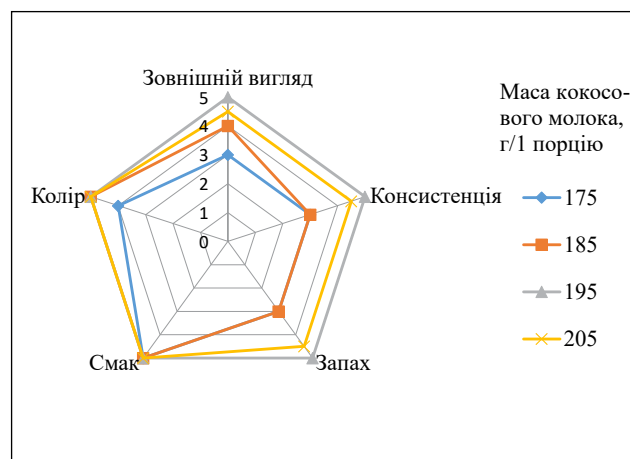


Рис. 1. Профілограма органолептичних властивостей англійського манного пудингу за змінної кількості кокосового молока

отримання більш м'якої консистенції пудингу та відокремлення рідкої фази під час зберігання.

На наступному етапі визначалась рациональна кількість підсолоджувача із розрахунку на 100 г манної крупи. Для цього готувались модельні зразки, кількість підсолоджувача змінювалась: зразок 1 – 50 г; зразок 2 – 60 г; зразок 3 – 70 г і зразок 4 – 80 г; кількість кокосового молока залишалась незмінною і становила 195 г. Кількості інших компонентів відповідали класичній рецептурі англійського манного пудингу (табл. 2). У якості контролю було взято зразок, приготований за використанням та співвідношення компонентів рецептури 1 таблиці 3.

Таблиця 3

Проміжні рецептури модельних зразків англійського манного пудингу

Назва сировини	Маса, г/1 порцію			
	Рецептура, №			
	1	2	3	4
Крупа манна	100	100	100	100
Молоко кокосове	195	195	195	195
Цукор білий кристалічний	50	-	-	-
Підсолоджувач (сухий екстракт листя стевії+ерітритол)	-	50	50	50
Яйця	80	80	80	80
Родзинки	25	25	-	-
Порошок полуниці сублімаційного сушіння	-	-	40	40
Горіх мускатний	-	-	-	0,10
Панірувальні сухарі	5	5	5	5
Масло вершкове	7	7	7	7
Вихід	400	400	400	400

На рис. 2 наведена профілограма органолептичних властивостей англійського манного пудингу за змінних кількостей підсолоджувача.

Встановлено, найвищу органолептичну оцінку отримав зразок із 50 г доданого підсолоджувача на порцію манного пудингу. Манний пудинг, виготовлений за додавання 50 г суміші сухого екстракту листя стевії та еритрітолу мав приємний виражений солодкий смак, з легким специфічним присмаком, притаманним екстракту листя стевії.

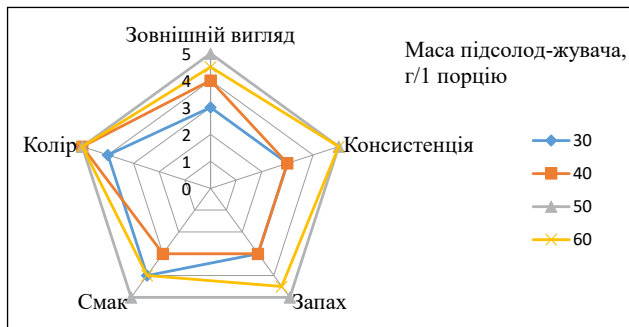


Рис. 2. Профілограма органолептичних властивостей англійського манного пудингу

Наступним етапом передбачалось визначення раціональної кількості порошку полуниці у складі рецептури англійського манного пудингу. Для цього готувались модельні зразки за рецептурою 2 таблиці 3, але замість родзинок додавався порошок полуниці: зразок 1 – 20 г; зразок 2 – 30 г; зразок 3 – 40 г і зразок 4 – 50 г. За модельний було обрано зразок за рецептурою 2 таблиці 3.

Профілограма органолептичних властивостей модельних зразків манних пудингів за змінної кількості порошку ягід полуниці наведено на рис. 3.

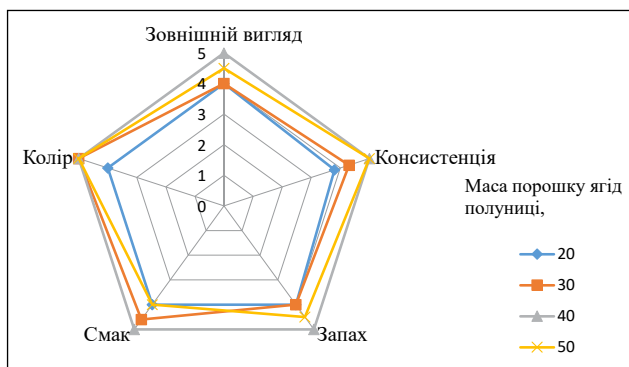


Рис. 3. Профілограма органолептичних властивостей англійського манного пудингу за змінних кількостей порошку ягід полуниці

Визначено, найвищу оцінку отримав зразок з кількістю введення порошку ягід полуниці 40 г на 1 порцію. Зразок манного пудингу мав приємний солодкий смак з приємною кислинкою та

присмаком введеного наповнювача; запах – приємний, властивий продукту, без сторонніх присмаків і запахів. Таким чином, введення порошку ягід полуниці дозволило позбутись специфічного присмаку екстракту листя стевії. Колір зразка – приємний на вигляд рожево-червоний, властивий введеному наповнювачу, рівномірний за усією масою, з включеннями дрібних насінин ягоди.

Задля надання продукту оригінального смаку та аромату до складу вивчена можливість введення до складу рецептури англійського манного пудингу мускатного горіху. Мускатний горіх додавався у сухому меленому вигляді. Для цього готувались модельні зразки за рецептурою 3 таблиці 3, кількість введення подрібненого мускатного горіху становила: зразок 1 – 0,05 г; зразок 2 – 0,10 г; зразок 3 – 0,15 г і зразок 4 – 0,20 г. За модельний було обрано зразок за рецептурою 2 таблиці 3.

Аналіз профілограми органолептичних властивостей модельних зразків англійського манного пудингу (рис. 4) показав, що раціональною кількістю додавання мускатного горіху є 0,1%, що забезпечує м'який смак та пряно-солодкуватий аромат. Подальше підвищення кількості мускатного горіху недоцільне, оскільки його присмак стає вираженим і починає домінувати у продукті, його аромат стає надто вираженим, що не є властивим для даного продукту.

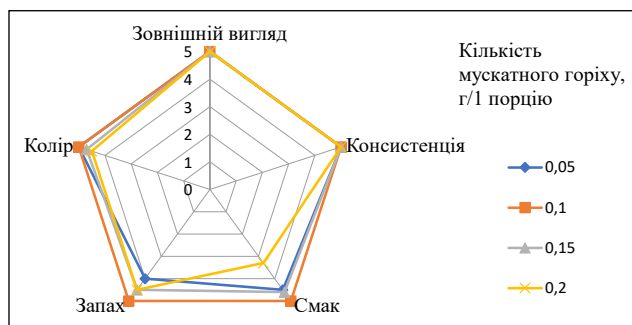


Рис. 4. Профілограма органолептичних властивостей англійського манного пудингу

Таким чином, на основі результатів проведених досліджень, розроблено рецептурний склад удосконаленого англійського пудингу (рецептура 4 таблиці 3), що отримав назву «Пряна насолода».

Метою подальших досліджень став аналіз поживної та енергетичної цінності нового продукту, результати наведені на рис. 5.

Встановлено, за вмістом білка манний пудинг за удосконаленою технологією практично не відрізнявся від контролю, тоді як вміст жиру збільшився близько у 2,4 рази, тоді як вміст вуглеводів знизився у 1,3 рази.

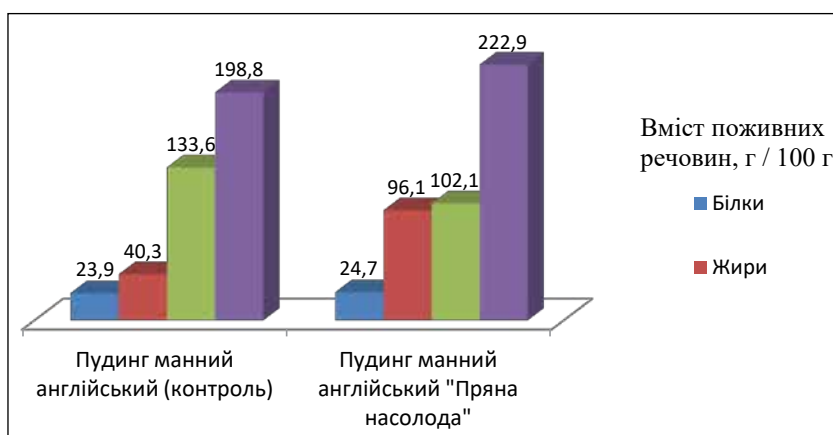


Рис. 5. Характеристика поживної та енергетичної харчової цінності пудингу манного «Пряна насолода»

Але враховуючи властивості гліцеридів кокосу регулювати ліпідний обмін в організмі, збільшення калорійності за рахунок підвищеного вмісту жирів не позначиться негативно на дієтичній спрямованості даної кулінарної страви.

Повна заміна цукру на суміш екстракту листя стевії та еритрітолу дозволить знизити кількість «вуглеводних» калорій та позитивно позначиться на глікемічному індексі продукту.

Сумарна калорійність такого пудингу буде дещо вищою передусім за рахунок вмісту жиру і становитиме близько 223 ккал/100 г, тоді як калорійність пудингу, виробленого за класичною рецептурою становить близько 199 ккал/100 г.

Висновки. На основі аналітичного огляду інформаційних джерел та експериментальних досліджень запропоновано удосконалену технологію англійського манного пудингу, що може бути

запропонована для запровадження до меню закладів ресторанного господарства та дозволить:

- розширити коло потенційних споживачів, які мають обмеження щодо вживання коров'ячого молока за станом здоров'я, виявляють алергійні реакції на білки молока, з особистих вподобань або людей, які є прихильниками дієт, що не рекомендують вживання молока;

- застосування природнього підсолоджувача на основі суміші сухого екстракту листя стевії та еритрітолу з повною заміною цукру дозволить знизити вміст легкозасвоюваних вуглеводів та глікемічний індекс продукту;

- введення до складу продукту порошку полуниці сублімаційного сушіння у кількості 10% та мускатного горіху у кількості 0,025% дозволяє збагатити продукт комплексом біологічно активних речовин та надає йому оригінальних органолептичних властивостей.

Список літератури:

1. Уманець Т.Р., Шадрін О.Г., Клименко В.А., Няньковський С.Л., Яцула М.С. Основні положення настанов по веденню хворих з алергією до коров'ячого молока. Частина V. Лікування алергії до коров'ячого молока. *Современная педиатрия*, 2015, 8 (72): 92-98.
2. Збірник рецептур кулінарної продукції і напоїв функціонального призначення /А. А. Мазаракі, М. І. Пересічний, М. Ф. Кравченко та ін.; за ред. М. І. Пересічного; Київ. нац. торг.-екон. ун-т. – 2-ге вид., перероб. і доп. – К.: КНТЕУ, 2013. – 772 с.
3. Гузев Ю. В., Гончаренко І. В. Хімічний склад і технологічні властивості буйволиного, коров'ячого, овечого молока та їх сумішей при виробництві сиру Бринза. *Вісник Сумського національного аграрного університету*, 2014, 2-2, с. 167-172.
4. Молоко та молочна сировина: хімічний склад, властивості, методи контролю: підручник [Електронний ресурс] /О.В. Кочубей-Литвиненко, Н. М. Ющенко, У.Г. Бандура, О.О. Басс. Київ: НУХТ, 2022. – 195 с. ISBN978-966-612-286-8
5. MARINA, A. M.; NURULAZIZAH, S. Use of coconut versus dairy milk products in Malaysian dishes: comparison of nutritional composition and sensory evaluation. *J Food Nutr Res*, 2014, 2.4: 204-8.
6. СКЛАД КОМПОЗИЦІЙ РОСЛИННИХ ОЛІЙ ДЛЯ КОСМЕТИЧНИХ ЗАСОБІВ В.В. Манк, Т.А. Полонська Наукові праці НУХТ 2016. Том 22, № 3 с. 217-223
7. Іванов С.В. Технологія купажованих жирів збалансованого жирнокислотного складу: монографія / С.В. Іванов, Л.В. Пешук, І.Г. Радзієвська. – Київ: НУХТ, 2013. – 210 с.

8. Goyal, S. K., null Samsher, Goyal R. K. Stevia (*Stevia rebaudiana*) a bio-sweetener: a review. *International journal of food sciences and nutrition* 61.1, 2010, с. 1-10.

9. Бойко, М. В., Грабовська О. В. Стевія: перспективи використання у продуктах харчування та напоях. *Готельно-ресторанний та туристичний бізнес: реалії та перспективи* с. 275-276.

10. Ciurzyńska A., Lenart A., Traczyk W. Influence of chemical composition and structure of strawderry gels on the choosen physical properties of freeze-dried final product. *Italian Journal of Food Science*, 2013, 25(2), p. 149-159

11. Demina, E. N., Safronova, O. V., Kuprina, I. K., Kochieva, I. V., & Abaeva, S. K. (2021, September). Research of the mineral composition of freeze-dried plant powders. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 848, No. 1, p. 012040). IOP Publishing. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/848/1/012040/meta>

12. Serna-Cock, Liliana, Diana Patricia Vargas-Muñoz, and Alfredo Ayala Aponte. "Structural, physical, functional and nutraceutical changes of freeze-dried fruit." *African Journal of Biotechnology* 14.6 (2015): 442-450.

Yushchenko N.M., Frolova N.E., Shulzhenko V.V., Zaporozhets O.V., Romanovskyi D.S.

IMPROVING THE TECHNOLOGY OF ENGLISH SEMPAN PUDDINGS

Based on the analysis and generalization of the results of scientific research, the improvement of the technology of English puddings by replacing cow's milk in the composition of the recipe with a vegetable analogue based on coconut is substantiated, which will allow recommending the product to consumers with restrictions on the use of whole milk. It is proposed to completely replace sugar in the English semolina pudding recipe with a natural sweetener - dry extract of stevia leaves, which does not affect the change in blood glucose levels, has "zero" indicators of the glycemic index and caloric content. But since the level of sweetness of stevioside, which is the main component of dry stevia leaf extract, is more than 200 times higher than sucrose, a dry mixture of stevia leaf extract and erythritol (1:39) in the amount of 12.5% is proposed for use in English pudding. The use of such a combination mixture ensures accurate dosing and uniform distribution of the mixture in the product. In order to increase the nutritional value, enrich the pudding with a complex of biologically active substances and create original organoleptic qualities, freeze-dried strawberry powder in the amount of 10% and nutmeg in the amount of 0.025% was added to the recipe of the English semolina pudding.

Studies of the nutritional value and caloric content of a new type of English pudding proved the effectiveness of the proposed solutions: the carbohydrate content of the product decreased by an average of 1.3 times, while the fat content increased by 2.4 times due to the natural fat component of the coconut, consisting mainly of medium-chain fatty acids, is easily digestible, helps to break down triglycerides in the human body, does not contain cholesterol, and due to its relatively low melting point, it gives tenderness and plasticity to the consistency of the pudding. Thus, with a slight increase in the caloric value of 223 kcal/100 g (199 kcal/100 g of the caloric content of the pudding produced according to the classic recipe), the English semolina pudding produced according to the improved technology will have a higher nutritional value and will be a successful addition to the menu of restaurants, as well as for cooking at home.

Key words: pudding, lactalbumin, plant analogue of milk, "coconut milk", dry extract of stevia leaves, erythritol, freeze-dried strawberries, spices.

ТРАНСПОРТ

УДК 629.1.04:621.3.082.62

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/39>

Кириченко О.С.

Київський інститут водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного
Державного університету інфраструктури та технологій

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ МОДУЛІВ З РІЗНИМИ ГЕОМЕТРИЧНИМИ ФОРМАМИ НАПІВПРОВІДНИКІВ ДЛЯ ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ТРАНСПОРТУ

В роботі викладено результати порівняльного аналізу робочих характеристик термоелектричних модулів для електрообладнання транспорту, що містять в своїй конструкції напівпровідники з різними геометричними формами. В роботі приведено деякі приклади з переліку електрообладнання водного транспорту, що містить в своїй конструкції термоелектричні вузли. Термоелектричні модулі, що порівнювались, мали однакові габаритні розміри $55 \times 65 \times 8$ мм. Кожен модуль складався з ланцюга 20-ти послідовного з'єднаних «P-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелектричних елементів. Для п'яти різних конструкцій термоелектричних модулів електрообладнання транспорту було створено відповідні п'ять математичних моделей. Розрахунок математичних моделей проводився чисельним методом. На основі виконаних розрахунків для п'яти різних термоелектричних модулів електрообладнання транспорту отримано та побудовано робочі характеристики для температури, напруженості електричного поля, омічного (джоулевого) тепла, густини струму та густини теплового потоку. Порівняльний аналіз робочих характеристик проводився для п'яти термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників: з напівпровідниками типової поширеної класичної конструкції у формі куба – перша конструкція; з напівпровідниками в формі куба з наскрізним квадратним отвором – друга конструкція; з напівпровідниками в формі двох усічених пірамід – третя конструкція; з напівпровідниками в формі куба з двома виїмками – четверта конструкція; з напівпровідниками у формі дев'яти окремих кубоїдів – п'ята конструкція. За базову при проведенні порівняльного аналізу характеристик було прийнято першу конструкцію термоелектричного модуля, що містила напівпровідники P та N-типу з широко поширеною класичною формою куба. Характеристики інших чотирьох термоелектричних модулів (друга, третя, четверта та п'ята конструкції) порівнювались з характеристиками базового термоелектричного модуля (перша конструкція) та між собою. Перша, друга, третя та четверта кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів містили 81 просторовий об'єкт, в тому числі 20 напівпровідників P-типу і 20 напівпровідників N-типу, а також 41 комутаційну пластину. П'ята кінцево-елементна модель термоелектричного модуля містила 401 просторовий об'єкт, в тому числі 180 напівпровідників P-типу і 180 напівпровідників N-типу, а також 41 комутаційну пластину. Отримані значення робочих параметрів дозволяють встановити діапазони безпечної роботи термоелектричних модулів та підвищити ефективність термоелектричного електрообладнання водного транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

Ключові слова: порівняльний аналіз, термоелектричний модуль, геометрична форма напівпровідників, електрообладнання транспорту, водний транспорт.

Постановка проблеми. На транспорті широко використовується електрообладнання різного технологічного призначення, в конструкції якого передбачено застосування термоелектричних вузлів. Ці термоелектричні вузли електрообладнання транспорту складаються з термоелектричних модулів та допоміжних конструктивних елементів,

що монтуються з ними одночасно. Моделювання термоелектричних модулів з широко поширеними типовими класичними конструкціями можна здійснити за допомогою існуючих математичних моделей на основі аналітичних рівнянь [2, 3], однак проведення аналогічного моделювання для конструктивно нових термоелектрич-

них модулів може бути неможливим і реалізувати його вдається з використанням чисельних методів розрахунку [5, 9, 15]. До електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами відносяться термоелектричні теплові насоси, охолоджувальні пристрої і установки кондиціонування повітря, нагрівальні і опалювально-охолоджувальні пристрої, апарати для отримання прісної води, а також термоелектричні установки в якості суднових джерел електроенергії [13]. Електрообладнання водного транспорту даного типу має вагомі переваги в порівнянні з електрообладнанням аналогічного призначення. До переваг електрообладнання з термоелектричними вузлами слід віднести відносну простоту схемної реалізації, надійність в експлуатації, керуванні та регулюванні при зміні режимів роботи, великий ресурс роботи, можливість швидкого пуску та зупинки, простоту обслуговування. Слід зазначити, що в порівнянні зі звичайним електрообладнанням транспорту електрообладнання з термоелектричними вузлами має меншу ефективність, проте в конкретних випадках зі специфічними умовами роботи електрообладнання водного транспорту наведений перелік переваг в значній мірі може виявитись визначальним.

Вищезазначене вказує на широке використання термоелектричних модулів з типовими класичними конструкціями в електрообладнанні водного транспорту. Проте для електрообладнання подібного типу не в повній мірі висвітлені питання підвищення його ефективності за рахунок застосування нових конструкцій термоелектричних модулів. Тому, актуальними залишаються питання проведення порівняльного аналізу робочих характеристик конструкцій термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників для електрообладнання транспорту.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Термоелектричні модулі широко використовуються на транспорті в пристроях і установках з термоелектричними вузлами, в яких застосовується як прямий, так і зворотний термоелектричні ефекти. Переважна більшість опублікованих робіт стосується питань підвищення ефективності електрообладнання транспорту за рахунок вдосконалення різними способами власне самого термоелектричного матеріалу, в той час як питання конструювання термоелектричних модулів розглянуті в меншій мірі. Нижче проаналізовано деякі публікації останніх років, що заслуговують уваги при дослідженні термоелектричних модулів на транспорті.

Так, в роботі [1] описані методи розрахунку оптимальних параметрів двох моделей термоелектричного перетворювача в режимі генерації електричної енергії, а саме секційного перетворювача з рухом теплоносія вздовж теплопоглинаючих спаїв термоелементів і перетворювача з проникних термоелементів, в якому теплоносієм проходить по каналам, розташованим вздовж висоти віток термоелементів. Розраховані енергетичні та економічні показники таких моделей і проведено їх порівняльний аналіз.

Проблему, пов'язану з експлуатацією транспортного засобу в умовах низьких температур оточуючого повітря розглянуто в [4], обґрунтовується необхідність прийняття спеціальних заходів для підтримки оптимального теплового режиму акумуляторної батареї. Проведені розрахункові дослідження запропонованої системи для компенсації теплових втрат акумуляторної батареї під час утримання транспортного засобу в умовах низьких температур методом термостатування з застосуванням термоелектричних перетворювачів енергії.

В роботі [10] здійснено аналіз характеристик термоелектричних генераторів теплообмінного типу, які використовують теплоту системи охолодження суднових двигунів. Окреслено перспективи застосування подібних термоелектричних генераторів.

Досвід створення транспортних термоелектричних холодильників на базі шаф побутових холодильників описано в [17], також представлено результати порівняльних випробувань базової моделі й нових зразків з різними типами термоелектричних модулів.

В роботі [11] наведено результати комп'ютерного проектування і експериментальних досліджень зі створення нової конструкції термоелектричного термопарного генераторного модуля «Алтек-1061» для підвищення теплопродуктивності термоелектричного автомобільного передпускового нагрівника.

Дослідження залежності чутливості термоперетворювача від взаємного розташування його конструктивних елементів висвітлено в [12]. Також, підтверджено важливість оптимального узгодження опору термопари з опором нагрівника для кожного конкретного застосування термоперетворювача та доцільність оптимізації елементів його конструкції.

Авторами роботи [14] відзначено, що відсоток внеску статей із галузі матеріалознавство у термоелектричну енергетику, як розділу, який відповідає фундаментальній природничій науці, становить (включаючи Chemical Engineering) 50,4 %. Також, зазначено, що незважаючи на відносно

низьку ефективність промислових термоелектричних пристроїв є можливість створити цілу низку різних автономних джерел енергії, які використовуються як у медицині, космічному застосуванні, так і в автомобільній техніці тощо.

Окрім розглянутих робіт є, також, і інші змістовні наукові дослідження, в яких розглядається теорія та практика застосування електрообладнання з термоелектричними вузлами на транспорті.

Метою статті є викладення результатів порівняльного аналізу робочих характеристик термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників, що застосовуються в термоелектричних вузлах електрообладнання транспорту, а також вибір оптимальних конструкцій термоелектричних модулів для підвищення ефективності роботи електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами.

Виклад основного матеріалу дослідження. Проведене дослідження було спрямоване на підвищення ефективності електрообладнання водного транспорту з термоелектричними вузлами за рахунок підвищення використання термоелектричного ефекту Пельтьє в термоелектричних модулях цих вузлів. Порівняльному аналізу характеристик підлягали п'ять конструкцій термоелектричних модулів з різною геометрією

напівпровідників (рис. 1): напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм – перша конструкція; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з наскрізним квадратним отвором 3×3 мм – друга конструкція; напівпровідники з формою двох однакових усічених пірамід висотою 2,5 мм і з основами у вигляді квадратів 5×5 мм та 2,5×2,5 мм – третя конструкція; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з двома виїмками, які огинають його бокові поверхні (наскрізні пази квадратного профілю 1×1 мм) – четверта конструкція; напівпровідники з формою в вигляді дев'яти окремих кубоїдів 1×1×5 мм – п'ята конструкція. Всі розглянуті конструкції термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників складались з ланцюгів, які містили однакову кількість послідовно з'єднаних між собою термоелектричних елементів.

ТермоЕРС термоелектричного елемента можна представити наступним математичним виразом [2]:

$$E = \int_{T_2}^{T_1} (\alpha_1(T) - \alpha_2(T)) dT, \quad (1)$$

де α_1, α_2 – коефіцієнти термоЕРС першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно;

T_1, T_2 – температури гарячої і холодної комутаційних пластин відповідно.

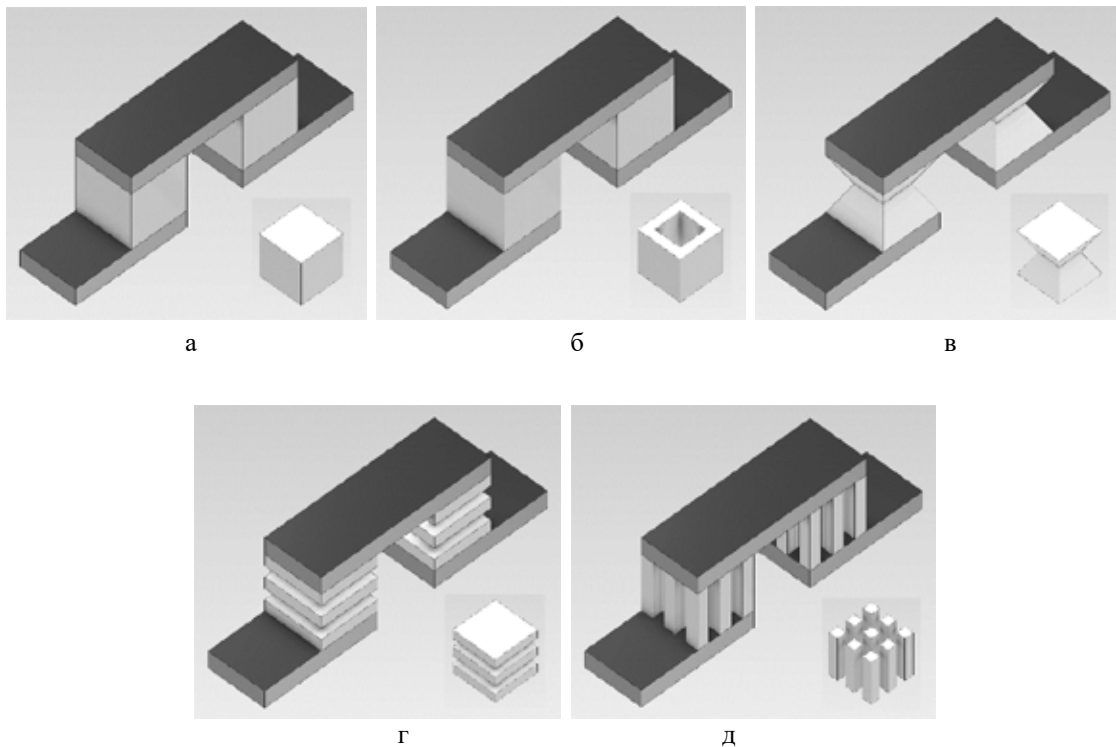


Рис. 1. Конструкції термоелектричних елементів з різними геометричними формами напівпровідників, на основі яких сформовано термоелектричні модулі електрообладнання транспорту: напівпровідники з формою куба (а); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (б); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (в); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (г); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (д)

Ефективність роботи термоелектричного елемента може бути оцінена величиною його ККД η та величиною добротності Z_0 [2].

ККД термоелектричного елемента:

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{\frac{m}{m+1}}{1 + \frac{\kappa_0 r}{\alpha^2} \frac{m+1}{T_1} - \frac{1}{2} \frac{T_1 - T_2}{T_1} \frac{1}{m+1}}, \quad (2)$$

де $\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$ – термоелектричний коефіцієнт;

$$\frac{T_1 - T_2}{T_1} = \eta_c - \text{ККД циклу Карно};$$

$m = \frac{R}{r}$ – відношення опору зовнішнього навантаження R до внутрішнього опору r термоелектричного елемента;

κ_0 – теплопровідність термоелектричного елемента.

Добротність Z_0 термоелемента залежить від термоелектричної добротності матеріалів його частин:

$$\sqrt{Z_0} = \frac{\alpha_1 - \alpha_2}{\frac{\alpha_1}{\sqrt{Z_1}} + \frac{\alpha_2}{\sqrt{Z_2}}}, \quad (3)$$

де $Z_1 = \frac{\alpha_1^2}{\rho_1 \kappa_1}$, $Z_2 = \frac{\alpha_2^2}{\rho_2 \kappa_2}$ – розрахункові коефіцієнти добротності;

ρ_1, ρ_2 і κ_1, κ_2 – питомі опори і коефіцієнти теплопровідності першого та другого матеріалів термоелектричного елемента відповідно.

Для опису термоелемента в режимі термоелектричного нагріву можна скористатися моделлю термопарного елемента [3], вважаючи бокові поверхні віток адіабатично ізольованими, холодні спаї термостатованими при температурі T_0 , а гарячим віддається тепло Q_w об'єкту, що підлягає розігріву, при температурі T_1 . Напряму струму при термоелектричному нагріві протилежний напряму струму при термоелектричному охолодженні; на робочому спаї теплоти Джоуля і Пельтьє додаються. Як і в охолоджувальних елементах, є достатньою для більшості випадків точною можна вважати, що половина тепла Джоуля, яке виділяється в вітці може бути віднесено до холодного спаю, половина – до гарячого. Тепловий потік Q_0 через холодний спай термоелемента може бути представлено виразом:

$$Q_0 = (\alpha_1 - \alpha_2) T_0 I - \frac{1}{2} I^2 l \left(\frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2), \quad (4)$$

де T_0, T_1 – відповідно температури холодних і гарячих спаїв;

I – сила електричного струму;

l – довжина термоелемента;

σ_1, σ_2 – коефіцієнти електропровідності матеріалів віток термоелемента;

s_1, s_2 – площі поперечного перерізу матеріалів віток термоелемента;

χ_1, χ_2 – коефіцієнти теплопровідності матеріалів віток термоелемента.

Тепловий потік Q_w через гарячий спай термоелемента може бути представлено виразом:

$$Q_w = (\alpha_1 - \alpha_2) T_1 I + \frac{1}{2} I^2 l \left(\frac{1}{\sigma_1 s_1} + \frac{1}{\sigma_2 s_2} \right) - \frac{T_1 - T_0}{l} (\chi_1 s_1 + \chi_2 s_2). \quad (5)$$

За базу для проведення порівняльного аналізу характеристик було прийнято першу конструкцію термоелектричного модуля, що містила напівпровідники P та N -типу з широко поширеною класичною формою куба з довжиною сторони 5 мм. Характеристики інших чотирьох нових конструкцій термоелектричних модулів порівнювались з характеристиками базової конструкції та між собою. Дослідження проводилось в декілька етапів, тому геометричні форми напівпровідників цих чотирьох нових термоелектричних модулів обирались з урахуванням попередніх результатів розрахунків [7, 8] та [6, 16].

Всі п'ять розглянутих конструкцій термоелектричних модулів мали однакові загальні габаритні розміри 55×65 мм та висоту 8 мм (без урахування товщин двох пластин ізоляційного корпусу), а також однакові ланцюги з 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелементів. Кожен термоелемент складався з пари напівпровідників P та N -типу, які було з'єднано між собою металевими (мідними) комутаційними пластинами в вигляді однакових прямокутних паралелепіпедів 5×15×1,5 мм. Перша та остання комутаційні металеві пластини являли собою контактні виводи для під'єднання проводів електроживлення. Для п'яти конструкцій термоелектричних модулів створено п'ять відповідних математичних моделей (рис. 2), кожна з яких була розрахована чисельним методом. В якості граничних умов було задано нульовий електричний потенціал зовнішньої крайньої торцевої поверхні останньої в ланцюзі термоелектричних елементів комутаційної пластини, а температура всіх нижніх поверхонь холодних комутаційних пластин вважалась рівною 0 °С. Зовнішні поверхні термоелектричних модулів вважались адіабатично теплоізольованими, тобто моделювання термоелектричних модулів проводилось в більш напруженому режимі їх роботи. Значення термоелектричних коефіцієнтів, коефіцієнтів електро- та теплопровідності для всіх п'яти математичних моделей приймались однаковими.

Перша, друга, третя та четверта кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів

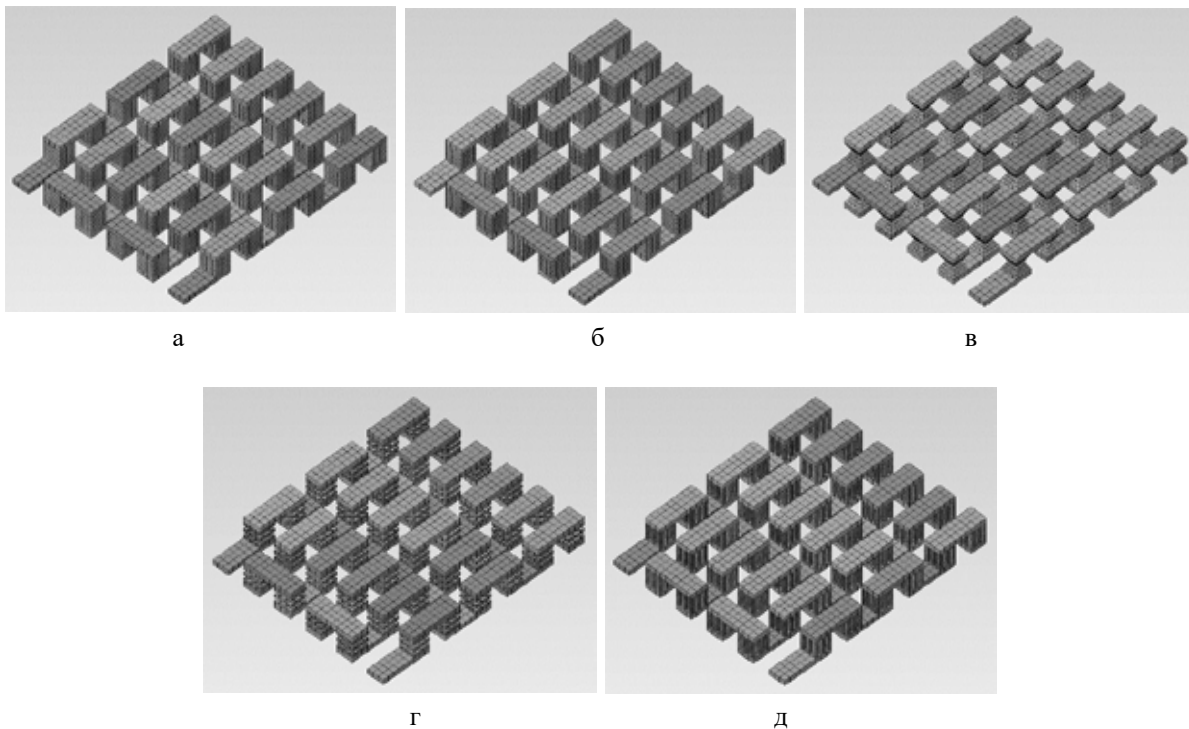


Рис. 2. Розрахункові кінцево-елементні моделі термоелектричних модулів з різними геометричними формами напівпровідників: напівпровідники з формою куба (а); напівпровідники з формою куба з наскрізним квадратним отвором (б); напівпровідники з формою двох усічених пірамід (в); напівпровідники з формою куба з двома виїмками (г); напівпровідники з формою окремих кубоїдів (д)

(рис. 2, а-г) містили 81 просторовий об'єкт, в тому числі 20 напівпровідників P -типу і 20 напівпровідників N -типу, а також 41 комутаційну пластину. П'ята кінцево-елементна модель термоелектричного модуля (рис. 2, д) містила 401 просторовий об'єкт, в тому числі 180 напівпровідників P -типу і 180 напівпровідників N -типу, а також 41 комутаційну пластину. Щодо статистичної кількості вузлів та кінцевих елементів, то в кожній з п'яти розрахункових моделей термоелектричних модулів вони були різними: перша модель (рис. 2, а) налічувала 40572 вузли і 6107 кінцевих елементів, друга модель (рис. 2, б) містила 35932 вузли і 4307 кінцевих елементів, третя модель (рис. 2, в) включала 45852 вузли і 7107 кінцевих елементів, четверта модель (рис. 2, г) охоплювала 59726 вузлів і 25345 кінцевих елементів, п'ята модель (рис. 2, д) забезпечувала 104292 вузли і 12627 кінцевих елементів. Внесення розрахункових налаштувань та сам процес розрахунку всіх п'яти моделей термоелектричних модулів зі значною кількістю вузлів і кінцевих елементів потребували відповідних обчислювальних потужностей.

Результати розрахунків п'яти моделей термоелектричних модулів для зручності проведення порівняльного аналізу їх робочих характеристик показано на графіках у вигляді сімейства кривих

на рис. 3-4. На рис. 3 показано графіки робочих характеристик $t(I)$ для температури t , $E(I)$ для напруженості E електричного поля, $J(I)$ для омичного (джоулевого) нагріву J при силі постійного струму в діапазоні від 0 до 5 А, а на рис. 4 наведено графіки робочих характеристик $j(I)$ для густини струму j та $q(I)$ густини теплового потоку q .

Свідченням підвищення термоелектричного ефекту в термоелектричних модулях є підвищені значення температури на стороні гарячих комутаційних пластин. Аналіз графіка на рис. 3, а показав, що всі запропоновані геометричні форми напівпровідників (криві 2-5) дають помітне підвищення температури на гарячій стороні комутаційних пластин в порівнянні з базовою класичною геометричною формою напівпровідника (крива 1). Розташування кривої 5 на графіку для температури t (рис. 3, а) свідчить про те, що найбільше використання термоелектричного ефекту досягнуто при конструкції термоелектричного модуля з геометрією напівпровідників у формі дев'яти окремих прямокутних паралелепіпедів (кубоїдів) замість одного в формі єдиного куба. Криві 2-4, також, свідчать про збільшення термоелектричного ефекту, проте в меншій мірі. Наведені криві для температур (рис. 3) відображають її верхні

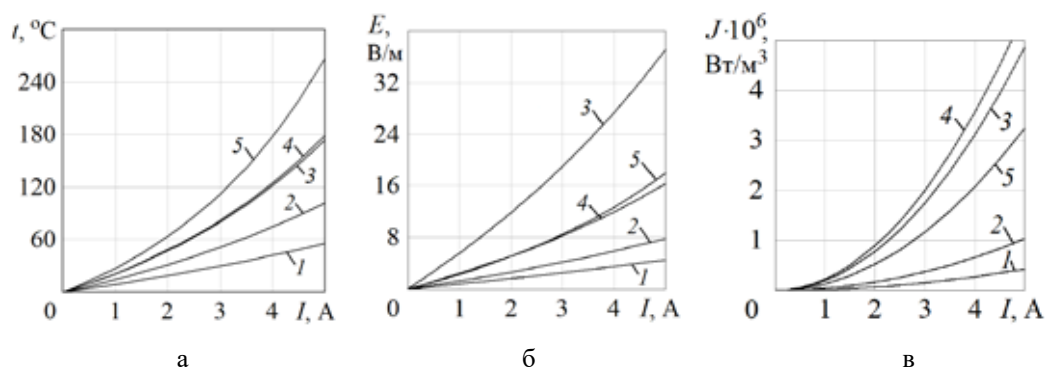


Рис. 3. Графіки залежностей температури $t(I)$ (а), напруженості електричного поля $E(I)$ (б) та омичного (джоулевого) нагріву $J(I)$ від сили постійного струму I , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі куба; 2 – для конструкції напівпровідників у формі куба з наскрізним квадратним отвором; 3 – для конструкції напівпровідників у формі двох усічених пірамід; 4 – для конструкції напівпровідників у формі куба з двома виїмками; 5 – для конструкції напівпровідників у формі окремих кубоїдів

межі для розглянутих термоелектричних модулів, а також дозволяють оцінити значення сил струму, при яких буде перевищено допустимий нагрів $80\text{ }^\circ\text{C}$ на гарячій стороні комутаційних пластин, що може призвести до пошкодження або навіть виходу з ладу термоелектричних модулів. Крім того, за деякими даними для підтримки найбільш високих значень ККД термоелектричного модуля рекомендується, щоб значення сили струму забезпечувало перепад температур між холодними і гарячими комутаційними пластинами, який би не перевищував $15\text{ }^\circ\text{C}$.

На рис. 3, б міститься інформація про напруженість електричного поля по моделям термоелектричних модулів. Всі чотири нові конструкції термоелектричних модулів мають більші значення напруженості електричного поля (криві 2-5) в порівнянні з базовою конструкцією термоелектричного модуля з напівпровідниками в формі куба (крива 1). Найбільші значення омичного (джоулевого) нагріву (рис. 3, в) в конструкціях термоелектричних модулів з напівпровідниками в формі куба з двома виїмками (крива 4) та напівпровідниками в формі двох усічених пірамід (крива 3).

Найбільші значення густини струму (рис. 4, а) характерні для термоелектричного модуля з напівпровідниками в формі усічених пірамід (крива 3), а найбільші значення густини теплового потоку (рис. 4, б) в термоелектричному модулі з напівпровідником у формі усічених пірамід (крива 3) і у формі окремих кубоїдів (крива 5).

Таким чином, на основі проведеного порівняльного аналізу робочих характеристик п'яти термоелектричних модулів з різною геометричною формою напівпровідників отримано кон-

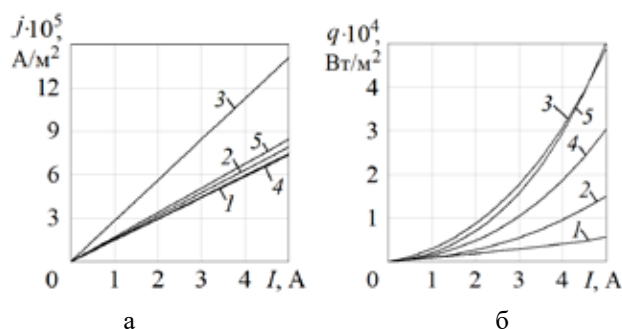


Рис. 4. Графіки залежностей густини електричного струму $j(I)$ (а) та густини теплового потоку $q(I)$ (б) від сили постійного струму I , що проходить через термоелектричний модуль електрообладнання транспорту: 1 – для класичної конструкції напівпровідників у формі куба; 2 – для конструкції напівпровідників у формі куба з наскрізним квадратним отвором; 3 – для конструкції напівпровідників у формі двох усічених пірамід; 4 – для конструкції напівпровідників у формі куба з двома виїмками; 5 – для конструкції напівпровідників у формі окремих кубоїдів

кретні дані, які можуть виявитись корисними при виборі конкретної найбільш оптимальної конструкції термоелектричного модуля для підвищення ефективності електрообладнання транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

Висновки.

В роботі створено п'ять математичних моделей термоелектричних модулів з однаковими загальними габаритними розмірами 55×65 мм та висотою 8 мм, що склались з ланцюга 20-ти послідовного з'єднаних «П-подібною змійкою» та однаково розміщених в просторі термоелементів. Створені моделі відрізнялись між собою геометричними формами напівпровідників: напів-

провідники з формою куба зі стороною 5 мм; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з наскрізним квадратним отвором 3×3 мм; напівпровідники з формою двох однакових усічених пірамід висотою 2,5 мм і з основами у вигляді квадратів 5×5 мм та 2,5×2,5 мм; напівпровідники з формою куба зі стороною 5 мм з двома виїмками, які огинають його бокові поверхні (наскрізні пази квадратного профілю 1×1 мм); напівпровідники з формою в вигляді дев'яти окремих кубоїдів 1×1×5 мм.

На основі п'яти створених математичних моделей термоелектричних модулів виконано чисельний розрахунок та проведено порівняльний аналіз робочих характеристик для температури t , напруженості E електричного поля, омічного (джоуле-

вого) нагріву J , густини струму j та густини теплового потоку q .

Встановлено, що найбільше використання термоелектричного ефекту Пельтьє досягнуто в термоелектричному модулі з напівпровідниками в формі окремих дев'яти кубоїдів. Крім того, термоелектричний ефект збільшується, проте в меншій мірі, в термоелектричних модулях з напівпровідниками в формі двох усічених пірамід та в формі куба з двома виїмками.

Отримані значення робочих параметрів дозволяють встановити діапазони безпечної роботи термоелектричних модулів та підвищити ефективність термоелектричного електрообладнання водного транспорту в конкретних експлуатаційних режимах.

Список літератури:

1. Анатичук Л.І., Вихор Л.М., Коцур М.П., Кузь Р.В., Черкез Р.Г. Порівняльний аналіз термоелектричних перетворювачів енергії з проникними та уцільними термоелементами. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2021. № 2. С. 55-70.
2. Анатичук Л.І. Термоелектрические преобразователи энергии. Термоэлементы. Элементная база термоелектричества. Т. 2. : монографія / ред. Л.Н. Вихор, О.Я. Лусте. Киев-Черновцы : Інститут термоелектричества, 2003. 376 с.
3. Анатичук Л.І. Термоэлементы и термоелектрические устройства: Справочник. К. : Наукова думка, 1979. 768 с.
4. Дмитриченко М.Ф., Гутаревич Ю.Ф., Трифонов Д.М., Сирота О.В. Застосування термоелектричних перетворювачів енергії для зменшення впливу природно-кліматичних факторів на технічну готовність транспортного засобу. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2020. № 3. С. 58-69.
5. Карвацький А.Я. Метод скінченних елементів у задачах механіки суцільних середовищ. Програмна реалізація та візуалізація результатів. К. : НТУУ «КПІ», 2015. 391 с.
6. Кириченко О.С. Модернізований термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для транспортного електрообладнання. *Матеріали III міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2022»*. К. : вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного ДУІТ. 2022. С. 99-101.
7. Кириченко О.С. Порівняльний аналіз термоелектричних елементів з різною геометричною формою напівпровідникового матеріалу. *Матеріали XII міжнародної науково-технічної конференції «Інновації в суднобудуванні та океанотехніці»*. Миколаїв : НУК. 2021. С. 390-392.
8. Кириченко О.С., Білюк І.С., Шарейко Д.Ю., Фоменко А.М., Гаврилов С.О., Бугрім Л.І. Чисельне тримірне моделювання термоелектричного охолоджувача вимірювального електроустаткування автоматичних систем. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. К. : ТНУ ім. В.І. Вернадського, 2018. Том 29 (68). Ч. 1. № 6. С. 58-63.
9. Кулон Жан-Луї, Сабоннадьер Жан-Клод. САПР в електротехніці. М. : Мир, 1988. 208 с.
10. Лобунець Ю.М. ТЕГ теплообмінного типу для суднових силових установок. Частина II. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2014. № 6. С. 69-76.
11. Максимчук М.В. Про оптимізацію термоелектричних генераторних модулів автомобільного передпускового нагрівника. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2017. № 1. С. 58-68.
12. Микитюк П.Д., Микитюк О.Ю. Про деякі варіанти покращення параметрів термоелектричних перетворювачів. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2019. № 3. С. 74-79.
13. Манасян Ю.Г. Судовые термоелектрические устройства. Л. : Судостроение, 1968. 283 с.
14. Никурій Л.І., Замуруєва О.В., Яворський Р.С., Найдич Б.П., Яворський Я.С., Новосад О.В., Федосов С.А. Перспективні матеріали і технології термоелектрики. *Міжвузівський збірник «Наукові нотатки»*. Луцьк : ЛНТУ, 2021. Випуск 71. С. 202-209.

15. Сабоннадьер Жан-Клод, Кулон Жан-Луи. Метод конечных элементов и САПР. М. : Мир, 1989. 192 с.
16. Тараненко С.В., Кириченко О.С., Колесник В.В., Пріступа С.В., Пастух О.В. Термоелектричний елемент з компенсованою комутаційною пластиною для установок і пристроїв суднової енергетики. *Матеріали II міжнародної науково-практичної конференції «Дніпровські читання-2021»*. К. : вид-во Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного ДУІТ. 2021. С. 88-92.
17. Філін С.О., Ясінська Б. Економічні транспортні термоелектричні холодильники із дворівневим регулюванням температури: досвід створення й результати випробувань. *Термоелектрика*. Чернівці : Інститут термоелектрики НАН України та МОН України, 2015. № 3. С. 41-48.

Kyrychenko O.S. COMPARATIVE ANALYSIS OF CHARACTERISTICS OF THERMOELECTRIC MODULES WITH DIFFERENT GEOMETRIC SHAPES OF SEMICONDUCTORS FOR TRANSPORT ELECTRICAL EQUIPMENT

The paper presents the results of the comparative analysis of the operating characteristics of thermoelectric modules for transport electrical equipment, which contain semiconductors with different geometric shapes in their design. Some examples from the list of water transport electrical equipment containing thermoelectric units in their design are given. The compared thermoelectric modules had the same overall dimensions of 55×65×8 mm. Each module consisted of a chain of 20 thermoelectric elements connected in series by a "II-shaped snake" and equally spaced. Five mathematical models for five different designs of thermoelectric modules of transport electrical equipment were created. Mathematical models were calculated using a numerical method. On the basis of the performed calculations, operating characteristics for temperature, electric field strength, ohmic (Joule) heat, current density and heat flux density for five different thermoelectric modules of the transport electrical equipment were obtained. The comparative analysis of the operating characteristics was carried out for five thermoelectric modules with different geometric shapes of semiconductors: semiconductors with the typical common classical cube shape – the first design; cube-shaped semiconductors with a through square hole – the second design; semiconductors with the shape of two truncated pyramids – the third design; semiconductors with the shape of a cube with two notches – the fourth design; semiconductors with the shape of nine separate cuboids – the fifth design. The first design of the thermoelectric module, which contained P and N-type semiconductors with a widespread classic cube shape, was taken as the basis for the comparative analysis of characteristics. The characteristics of the other four thermoelectric modules (second, third, fourth and fifth designs) were compared with the characteristics of the base thermoelectric module (first design) and with each other. The first, second, third, and fourth finite-element models of thermoelectric modules contained 81 spatial objects, including 20 P-type semiconductors and 20 N-type semiconductors, as well as 41 switching plates. The fifth finite-element model of the thermoelectric module contained 401 spatial objects, including 180 P-type semiconductors and 180 N-type semiconductors, as well as 41 switching plates. The obtained values of operating parameters allow to establish ranges of safe operation of thermoelectric modules and increase the efficiency of thermoelectric electrical equipment of water transport in specific operating modes.

Key words: comparative analysis, thermoelectric module, geometric form of semiconductors, transport electric equipment, water transport.

Коваленко Л.О.

Харківський національний автомобільно-дорожній університет

СТАН І ОСНОВНІ ПРИЧИНИ АВАРІЙНОСТІ НА АВТОМОБІЛЬНИХ ДОРОГАХ ХАРКІВСЬКІЙ ОБЛАСТІ

Стаття присвячена проблемі забезпечення безпеки руху, яка стала особливо гострою через ріст інтенсивності руху на дорогах і збільшення в транспортному потоці частки легкових автомобілів, що значно ускладнюють процес руху змішаного транспортного потоку на дорогах. З'ясовано, що існуючу систему аналізу аварійності на автомобільному транспорті не можна вважати досконалою, на її основі роблять помилкові висновки про стан аварійності в державі.

Висока аварійність і смертність при скоєнні дорожньо-транспортних пригод є актуальним питанням для України. Вивчення, розробка і впровадження заходів з підвищення безпеки дорожнього руху дозволяє зменшити показники травматизму внаслідок дорожньо-транспортних пригод. Метою статті є урахування та аналіз об'єктивних даних про причини і тяжкість дорожньо-транспортних пригод в Україні. Це дало змогу запровадити рішення щодо підвищення безпеки дорожнього руху.

В статті розкрито, що розглянутий підхід до організації дорожнього руху має на меті забезпечити безпеку транспортної системи для всіх учасників дорожнього руху. Основою цього підходу є безпечні дороги, безпечні транспортні засоби та безпечні учасники дорожнього руху. З'ясовано, що з метою запобігання дорожньо-транспортним пригодам та скорочення серйозного транспортного травматизму необхідно мати об'єктивні дані про причини і тяжкість ДТП. Вивчення статистичних даних є одним з основних методів виявлення закономірностей в причинах і умовах виникнення дорожньо-транспортних пригод.

Визначено, що вплинути на безпеку та поведінку учасників дорожнього руху можуть наступні заходи. Перш за все слід збільшити матеріальну відповідальність за порушення правил дорожнього руху. Крім того слід передбачити: впровадження системи зв'язку вздовж доріг, що надасть можливість своєчасно оповістити про скоєння дорожньо-транспортної пригоди та вчасно надати медичну допомогу постраждалим; оснащення карет швидкої допомоги реанімаційним обладнанням; підготовку працівників поліції по наданню першої медичної допомоги постраждалим в дорожньо-транспортних пригодах; оснащення автомобілів сучасними засобами пасивної безпеки (паси безпеки для водія та пасажирів, підголовники на спинках сидінь водія та пасажирів, подушки безпеки, конструктивні методи захисту кузова автомобіля від надмірного деформування при скоєнні дорожньо-транспортної пригоди, покращення зони оглядовості тощо); покращення рівня підготовки водіїв та впровадити періодичну їх атестацію.

Ключові слова: дорожньо-транспортна пригода, транспортний потік, безпека дорожнього руху, швидкість руху, організація дорожнього руху.

Постановка проблеми. Проблема забезпечення безпеки руху стала особливо гострою через ріст інтенсивності руху на дорогах і збільшення в транспортному потоці частки легкових автомобілів, що значно ускладнюють процес руху змішаного транспортного потоку на дорогах [1].

Кожне порушення правил дорожнього руху ґрунтується на недоліках таких процесів: первинної підготовки водія, професійного вдосконалення його майстерності упродовж діяльності і виконання функцій, не виконання законодавства і, зокрема, правил дорожнього руху; незадовільний стан дорожніх умов, засобів регулювання та графіків руху; відсутність встановлення відповідності ризику і тяжкості дорожньо-транспортних

пригод вимогам законодавства та мірі покарання за порушення правил дорожнього руху.

Аналіз останніх досліджень. Існуючу систему аналізу аварійності на автомобільному транспорті не можна вважати досконалою. Статистичні дані про аварійність перевантажені абсолютними показниками, які нерідко мають тенденцію до зниження. На їх основі роблять помилкові висновки про стан аварійності в державі, хоча питомі показники стану безпеки дорожнього руху мають негативну тенденцію [2, 3].

Поповнення ринку внутрішніх перевезень новими перевізниками різних форм власності, масовий допуск до керування транспортними засобами недосвідчених водіїв, які не мають

належного досвіду роботи, зумовили зростання потенційної небезпеки збільшення дорожньо-транспортного травматизму на дорогах. Ймовірність потрапити в дорожньо-транспортну пригоду зі смертельним наслідком в Україні у п'ять разів вища, ніж у західноєвропейських країнах [4].

За останні п'ять років кількість дорожньо-транспортних пригод в Україні зросла орієнтовно на сорок відсотків, здебільшого за рахунок збільшення кількості автомобілів в Україні (а значить і збільшилася інтенсивність руху), зростання кількості молодих водіїв без достатнього досвіду водіння автомобіля, особливо в екстремальних умовах (дощ, сніг, ожеледиця), збільшення інтенсивності руху в темну пору доби та низької дисципліни учасників дорожнього руху за умов відсутності серйозної відповідальності за порушення Правил дорожнього руху [5, 6].

Узагальнення інформації про стан безпеки руху в Україні та інших країнах дозволить розробити комплекс технічних заходів щодо безпеки дорожнього руху, що дозволить значно зменшити смертність та травматизм внаслідок дорожньо-транспортних пригод.

Формулювання цілей статті. Висока аварійність і смертність при скоєнні дорожньо-транспортних пригод є актуальним питанням для України. Вивчення, розробка і впровадження заходів з підвищення безпеки дорожнього руху дозволить зменшити показники травматизму внаслідок дорожньо-транспортних пригод. Метою статті є урахування та аналіз об'єктивних даних про причини і тяжкість дорожньо-транспортних пригод в Україні. Це дасть змогу запровадити рішення щодо підвищення безпеки дорожнього руху.

Виклад основного матеріалу. Підхід до організації дорожнього руху має на меті забезпечити безпеку транспортної системи для всіх учасників дорожнього руху. Основою цього підходу є безпечні дороги, безпечні транспортні засоби та безпечні учасники дорожнього руху з метою запобігання дорожньо-транспортним пригодам та скорочення серйозного транспортного травматизму необхідно мати об'єктивні дані про причини і тяжкість ДТП.

З числа найважливіших задач аналізу даних про стан аварійності та значення інших показників, що характеризують діяльність по забезпеченню безпеки дорожнього руху, можна назвати наступні. Прогнозування стану аварійності. Цей напрям є одним з найбільш інтенсивно розвинених шляхів удосконалення аналізу статистичних даних. Розроблено багато різноманітних моделей

для прогнозування стану аварійності. Аналіз причин і умов виникнення конкретних ДТП, який часто називають експертизою дорожньо-транспортних пригод. Обґрунтування заходів щодо покращення умов та безпеки руху, вдосконаленню дорожніх умов, конструкцій транспортних засобів, підготовці водіїв та інше, а також оцінка ефективності заходів і визначення черговості їх проведення [7, 8].

Вивчення статистичних даних є одним з основних методів виявлення закономірностей в причинах і умовах виникнення дорожньо-транспортних пригод [2, 9, 10]. Ефективність використання інформації про аварійність багато в чому залежить від того, наскільки статистичні дані точно відображають реальні процеси в структурі і динаміці аварійності. В більш вузькому значенні йдеться про достовірність тих показників аварійності, які базуються на даних, внесених в картку обліку дорожньо-транспортних пригод. Інформацію, яку використовують при аналізі аварійності, можна підрозділити на три основні групи:

- кількісні показники, значення яких можуть приймати безперервний ряд значень;
- якісні характеристики з кінцевим числом різних значень (стан);
- зведені статистичні показники про стан аварійності, одержані узагальненням даних про одиничні ДТП.

Аналіз факторів, які супроводжують дорожньо-транспортні пригоди показав, що всі недоліки можна розподілити на чотири групи (рис. 1):

- ті, що стали прямою причиною дорожньо-транспортної пригоди, коли водій не порушив правил дорожнього руху, але не зміг своєчасно помітити недоліки в утриманні дорожньо-вуличної мережі і запобігти ДТП;
- ті, що сприяли виникненню ДТП, коли дорожньо-транспортна пригода стала можливою не тільки через порушення правил дорожнього руху (ПДР) учасниками дорожнього руху, але і через незадовільні дорожні умови;
- ті, що вплинули на виникнення ДТП, коли основною причиною дорожньо-транспортної пригоди з'явилось порушення правил дорожнього руху водієм, але належні дорожні умови дозволили б понизити тяжкість наслідків або запобігти йому;
- ті, що не вплинули на виникнення ДТП, тобто не мають причинного зв'язку з механізмом виникнення дорожньо-транспортної пригоди.

Аналіз основних причин дорожньо-транспортних пригод (табл. 1, рис. 2) показує, що за умов незадовільного стану доріг в Харківській області

відбулось 13 % дорожньо-транспортних пригод. До цього показника не увійшли недоліки доріг, які сприяли або впливали на виникнення ДТП (рис. 1). Переважна більшість дорожньо-транспортних пригод відбувається в результаті порушення правил дорожнього руху водіями та пішоходами.

відповідальність по відношенню до інших учасників дорожнього руху.

Необхідно також приділити увагу зростанню культури взаємовідносин між учасниками дорожнього руху, залучивши до цієї проблеми засоби масової інформації, і ввести обов'язкове та ефективне вивчення правил дорожнього руху для пішоходів та велосипедистів, методів першої медичної допомоги при дорожньо-транспортних пригодах.

Зменшення тяжкості наслідків від дорожньо-транспортних пригод обумовлено покращенням за останні роки захисту сучасних автомобілів від бокових та фронтальних ударів при дорожньо-транспортних пригодах та захисту водіїв і пасажирів ременями чи подушками безпеки, а також завдяки наявності засобів зв'язку в учасників дорожнього руху, що забезпечує своєчасне повідомлення про дорожньо-транспортну пригоду і, відповідно, своєчасне надання медичної допомоги у більшості випадків порівняно з минулими роками.

Висновки. Вплинути на безпеку та поведінку учасників дорожнього руху можуть наступні заходи. Перш за все слід збільшити матеріальну відповідальність за порушення правил дорожнього руху. Крім того слід передбачити: впровадження

Таблиця 1
Розподіл ДТП з вини учасників руху

Дорожньо-транспортні пригоди з вини учасників руху	Кількість ДТП, %
Дорожньо-транспортні пригоди з вини пішоходів	11 %
ДТП за умов незадовільного стану доріг	13 %
Дорожньо-транспортні пригоди з вини нетверезих водіїв всіх видів транспорту	12 %
Пригоди у зв'язку з порушенням ПДР водіями усіх видів транспортних засобів	64 %

Покращити стан безпеки дорожнього руху можна шляхом впливу на поведінку учасників дорожнього руху. Досягти бажаного результату можливо за умови взаємоповаги всіх користувачів дороги: водіїв, пішоходів, велосипедистів та водіїв іншого транспорту. Кожен повинен нести



Рис. 1. Дорожні умови, що супроводжують ДТП

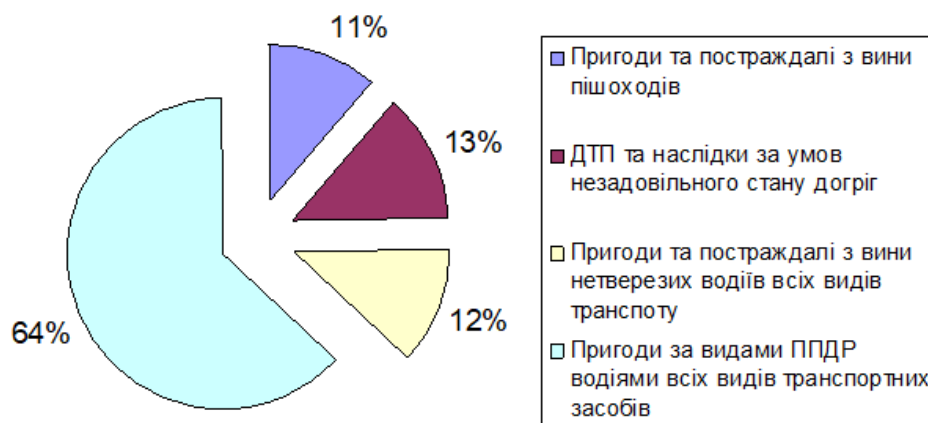


Рис. 2. Основні причини ДТП з вини учасників руху

системи зв'язку вздовж доріг, що надасть можливість своєчасно оповістити про скоєння дорожньо-транспортної пригоди та вчасно надати медичну допомогу постраждалим; оснащення карет швидкої допомоги реанімаційним обладнанням; підготовку працівників поліції по наданню першої медичної допомоги постраждалим в дорожньо-транспортних пригодах; оснащення автомобілів сучасними

засобами пасивної безпеки (паси безпеки для водія та пасажирів, підголівники на спинках сидінь водія та пасажирів, подушки безпеки, конструктивні методи захисту кузова автомобіля від надмірного деформування при скоєнні дорожньо-транспортної пригоди, покращення зони оглядовості тощо); покращення рівня підготовки водіїв та, можливо, впровадити періодичну їх атестацію.

Список літератури:

1. Gartne N., Messer G., Rathi A. Traffic flow theory: A state of the art report Editors. *Transportation Research Board*. 2001. P.207-215.
2. Статистика ДТП в Україні та основні причини аварій на дорогах: веб-сайт. URL: <https://forinsurer.com/news/21/01/19/39063> (дата звернення 01.11.2022).
3. Anbarci N., Escaleras M., Register C. Traffic fatalities: Income inequality create an externality. *Canadian Journal of Economics*. 2009. Vol. 42, No. 1. P. 244-266.
4. Гончаренко Ф.П. Теоретичні основи та практичні методи підвищення безпеки руху при експлуатації автомобільних доріг: монографія. Київ, 2000. 352 с.
5. Eugene R., Luttrell G., Russell E., Rys M. Modeling traffic flows and conflicts at roundabouts. *Mack-Blackwell rural Transportation Center University of Arkansas*. Kansas State University City of Manhattan. February 2000. P. 36-51.
6. Prasolenko O., Lobashov O., Galkin A. The Human Factor in Road Traffic Citi. *International Journal of Automation, Control and Intelligent Systems*. 2015. Vol.1, No. 3. P. 77-84.
7. Концепція державної цільової програми підвищення безпеки руху на період до 2020 року. Київ: Кабмін України, 2015.
8. Рябець Я.В., Єресов В.І. Удосконалення методики оцінки потенційної небезпеки дорожнього руху. *Безпека дорожнього руху України: Науково-технічний вісник*. Київ, 2005. № 12 (20). С. 54-59.
9. Дорожньо-транспортні травми: веб-сайт. URL: <https://www.who.int/ru/news-room/fact-sheets/detail/road-traffic-injuries>. (дата звернення 05.11.2022).
10. Єрмак О.М., Сумець А.І. Дослідження факторів, що впливають на небезпеку руху на перехрестях. // *Науково технічний збірник*. № 101. Харків: ХНАМГ 2011. С. 284-292.

Kovalenko L.A. STATE AND MAIN CAUSES OF ACCIDENTS ON THE ROADS OF THE KHARKOV REGION

The article is devoted to the problem of ensuring traffic safety, which has become especially acute due to the increase in traffic intensity on the roads. An increase in the number of passenger cars in the traffic flow, which significantly complicates the process of moving a mixed traffic flow on the roads. It has been established that the existing system for analyzing accidents in road transport cannot be considered perfect; on its basis, erroneous conclusions are made about the state of accidents in the state.

High accident rate and mortality in road accidents is a topical issue for Ukraine. The study, development and implementation of measures to improve road safety can reduce injury rates as a result of road traffic accidents. The purpose of the article is to record and analyze objective data on the causes and severity of road accidents in Ukraine. This made it possible to introduce a solution to improve road safety.

The article reveals that the considered approach to the organization of traffic is aimed at ensuring the safety of the transport system for all road users. The foundation of this approach is safe roads, safe vehicles and safe road users. It was found that in order to prevent road traffic accidents and reduce serious traffic injuries, it is necessary to have objective data on the causes and severity of road accidents. The study of statistical data is one of the main methods for identifying patterns in the causes and conditions of accidents.

It has been determined that the following measures may affect the safety and behavior of road users. First of all, it is necessary to increase liability for traffic violations. In addition, it is necessary to provide for: the introduction of a communication system along the roads, which will allow timely notification of a traffic accident and timely provision of medical assistance to the victims; equipping ambulances with resuscitation equipment; training police officers to provide first aid to victims of road accidents; equipping cars with modern means of passive safety (safety passes for the driver and passengers, head restraints on the backs of driver and passenger seats, airbags, constructive methods of protecting the car body from excessive deformation during a traffic accident, improving visibility, etc.); improve the level of training of drivers and introduce their periodic certification.

Key words: traffic accident, traffic flow, traffic safety, traffic speed, traffic organization.

Лебідь Є.М.

Національний транспортний університет

Лужанська Н.О.

Національний транспортний університет

Лебідь І.Г.

Національний транспортний університет

ОБГРУНТУВАННЯ ВИБОРУ ЛОГІСТИЧНОГО ЛАНЦЮГА ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ПРИ МІЖНАРОДНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

У статті зазначено, що потреби, які виникають у суб'єктів зовнішньоекономічної діяльності при доставці товарів під час війни сприяли розробці логістичними посередниками альтернативних шляхів транспортування вантажів, що раніше обслуговувалися морськими портами України. З'ясовано, що експортери та імпортери товарів, які співпрацюють з контрагентами, територіальне розташування яких не дозволяє здійснювати доставку виключно автомобільним транспортом, стали потребувати послуг консалтингових та транспортно-експедиторських підприємств у розробці логістичних ланцюгів, здатних забезпечити оптимальні умови постачання товарів у змішаному сполученні.

Встановлено, що розробка проєктів логістичних ланцюгів передбачає урахування інтересів замовника та задоволення вимог, щодо технічного, технологічного та організаційного забезпечення усіх етапів постачання товару. Досліджено, що діяльність підприємств та організацій, що залучаються до доставки, пов'язана з ризиками, які матимуть вплив на кінцевий результат задоволеності замовника від отриманої послуги. Тому Акцентовано увагу на тому, що задача консалтингових та експедиторських підприємств полягає у попередньому дослідженні специфіки діяльності компанії окремої сфери діяльності, а вже потім прийнятті рішення про співпрацю з такого типу організацією, чи пошуками альтернативних рішень. Відповідно, зазначено, що наступним кроком є вибір серед функціонуючих на ринку підприємств, здатних надати необхідну послугу з мінімальними ризиками та забезпечити високий рівень сервісу за обґрунтовану вартість.

Визначено, що перед початком планування проєкту логістичного ланцюга замовники формують критерії ефективності, основними з яких є: вартість, тривалість, якість та надійність. Обґрунтовано, що залучення до доставки перевізників різних видів транспорту потребує урахування специфіки виконання основних та допоміжних процесів, а також ризиків, пов'язаних з їх діяльністю. У статті проаналізовано чотири типи логістичних ланцюгів, що можуть бути застосовані при імпорті товару в Україну у змішаному сполученні. Здійснено оцінку критеріїв ефективності за кожним з досліджуваних маршрутів, обґрунтовано ризики, що можуть виникати при виконанні зовнішньоторговельних операцій та умови прийняття управлінських рішень для забезпечення інтересів замовника та надання йому альтернатив для вибору.

Ключові слова: консалтинг, логістичний посередник, логістичний ланцюг, зовнішньоторговельна операція, ризики, доставка товару, маршрут, критерії ефективності.

Постановка проблеми. Питання ефективної організації доставки товарів вважається одним з найактуальніших для всіх суб'єктів ринку транспортних послуг. Самостійно вантажовласникам досить складно врахувати всі деталі виконання основних та допоміжних процесів. Тому, з метою розробки проєктів логістичних ланцюгів, які забезпечують потреби замовників у доставці товарів з мінімальними витратами, все частіше почали залучати підприємства, що надають послуги з логістичного консалтингу.

Основною перевагою діяльності таких організацій є можливість розробки декількох альтернативних логістичних ланцюгів, ланками яких будуть різні підприємства, що за своїми функціональними можливостями та матеріально-технічним забезпеченням здатні забезпечити одиничну послугу або спектр послуг. Експерти з логістичного консалтингу у прийнятті рішень та діючи виключно в інтересах замовника, досліджують існуючу ситуацію на ринку транспортно-логістичних послуг, розробляють оптимальні марш-

рути перевезення, вивчають перелік необхідних організацій, здатних забезпечити доставку, вивчають їх репутацію та погоджують умови співпраці та вартість обслуговування. Ефективність роботи кожної з ланок логістичного ланцюга має прямий вплив на показники діяльності замовника та ризики, які можуть виникати в процесі доставки. Тому, враховуючи політичні, економічні, соціальні та технологічні чинники наявність альтернативних рішень при організації доставки товарів у міжнародному сполученні повинна задовольняти вимоги замовника щодо вартості, тривалості, якості та надійності функціонування логістичного ланцюга.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вигідне геополітичне розташування України сприяло розбудові об'єктів інфраструктури в транспортних вузлах та по всій території держави в зонах попиту на транспортно-логістичні послуги [1]. Оскільки, переважна більшість усіх об'єктів знаходиться у приватній власності, тому це формує між ними конкуренцію, що ґрунтується на якості та вартості обслуговування [2]. Питання впливу застосування різних видів транспорту до виконання перевезень вантажів завжди було актуальним для суб'єктів ринку транспортних послуг [3], відповідно, більша увага з боку держави і комерційних підприємств зосереджувалася на удосконаленні діяльності об'єктів інфраструктури у портах, аеропортах, залізничних вузлах, вантажних митних комплексах та пунктах пропуску [4]. Проте, з початком війни в Україні порти та аеропорти, а також комерційні об'єкти транспортно-логістичної інфраструктури припинили свою роботу, тому перед суб'єктами зовнішньоекономічної діяльності постала потреба в пошуках нових шляхів доставки товарів від контрагентів

[5]. Формування логістичних ланцюгів, до структури яких, входять перевізники різних видів транспорту, митні органи та посередницькі підприємства, що надають супутні транспортно-логістичні і митно-брокерські послуги є ключовою потребою вітчизняного ринку [6-8]. Вибір підприємств та організацій, що є ланками логістичного ланцюга здійснюється за ключовими чинниками, які повинні відповідати запиту замовника [9]. Більшість існуючих досліджень присвячено функціонуванню логістичних ланцюгів, що передбачають виконання доставки автомобільним транспортом [10], проте, ринкові зміни потребують розширення можливостей пов'язаних з розробкою альтернативних шляхів доставки та забезпечення відповідного рівня якості і надійності процесу [11].

Формулювання цілей статті. При організації перевезення вантажів у змішаному сполученні виникає необхідність вибору оптимального способу доставки. Відповідно до характеру перевезення, а також матеріальних ресурсів, які необхідно залучити до його виконання, можуть брати участь логістичні підприємства різного профілю. До даного процесу можуть залучатися державні та приватні підприємства, що надають логістичні послуги або здійснюють функцію державного регулювання та контролю за переміщенням зовнішньоторговельних вантажів (табл. 1).

Відповідно, задачею транспортно-експедиторського або консалтингового підприємства є формування логістичного ланцюга, що буде відповідати вимогам замовника та сприяти виконанню доставки з найвищими показниками ефективності на всіх етапах. Кожен із замовників, при виборі логістичного ланцюга керується такими основними критеріями, як: вартість, тривалість, якість та надійність. При цьому діяльність організацій,

Таблиця 1

Підприємства та установи, що залучаються до процесу доставки товарів у змішаному сполученні

Види підприємств	Основні функції
Судноплавна лінія	Організація перевезення вантажів морем, видача різних типів контейнерів для розміщення вантажу
Портовий експедитор	Надання комплексу послуг з обробки контейнера в порту
Перевізник	Транспортування вантажу різними видами транспорту
Складський комплекс	Зберігання, розформування, консолідація вантажу. Перевантаження на різні види транспорту
Митні органи	Захист економічних інтересів держави
Митно-брокерські підприємства	Оформлення експортних/ імпорتنних/ транзитних декларацій та інших митних документів
Експедиторські підприємства	Взаємодія з окремими ланками логістичного ланцюга в межах зони їх відповідальності
Страхові підприємства	Страховання вантажів та транспортних засобів

що є ланками логістичного ланцюга пов'язана з ризиками, які можуть виникати при виконанні зовнішньоторговельної операції. Тому, важливим аспектом у розробці проектів доставки товарів є формування логістичного ланцюга з урахуванням критерію бажаності замовника та оцінки ризиків, пов'язаних з діяльністю кожного окремого підприємства, залученого до цього процесу.

За умови відсутності доступу до перевезення комерційних вантажів через порти України, логістичними посередниками розробляються маршрути, що прокладаються через порти іноземних держав. Запропоновано розглянути процес доставки з Китаю до України через порти Гданськ, Рига, Констанца за умови формування чотирьох типів логістичних ланцюгів, до структури яких будуть входити різні підприємства та організації.

Виклад основного матеріалу. У роботі приймаємо до уваги, що ланками логістичного ланцюга при виконанні міжнародних перевезень є вантажовідправники (ВВ), вантажоодержувачі (ВО), експедитори (Е), перевізники (залізничне сполучення – ЗП, автомобільні перевезення – АП, судноплавні лінії – СП), митно-брокерські підприємства (МБ), складські комплекси (С), пункти пропуску (ПП), митні агенції країн-призначення (МА), логістичні центри країн-призначення/вд-правлення (ЛЦ).

Розглянемо найбільш розповсюджені логістичні ланцюги, які застосовуються суб'єктами ринку транспортних послуг при доставці вантажу з порту.

Логістичний ланцюг першого типу є найскладнішим за кількістю ланок. У ньому залучена найбільша кількість підприємств. Після прибуття вантажу в порт призначення, експедитор оформлює необхідну документацію для вивозу контейнера з порту на склад для перевантаження. Після перевантаження в автотранспортний засіб, брокер оформлює транзитний документ і вантаж прямує до кордону країни призначення. Після проходження пункту пропуску, транспортний засіб прямує на термінал для розмитнення вантажу і надалі, після виконання митних формальностей доставляється вантажоодержувач (рис. 1).

Логістичний ланцюг другого типу передбачає виконання транспортно-експедиторського обслуговування в рамках одного підприємства. На його частину припадає виконання комплексу послуг з організації обробки контейнера, перевантаження та митні формальності в порту призначення (рис. 2).

Логістичний ланцюг третього типу передбачає виконання перевезення за допомогою залізничного сполучення. У цьому випадку, в якості організатора перевезення може виступати як окремих експедитор, так і деякі судноплавні лінії, що надають відповідну послугу. У такому випадку розглянемо другий варіант доставки вантажу до контейнерного терміналу (КТ) у країні призначення (рис. 3).

Логістичний ланцюг четвертого типу передбачає вивіз контейнера безпосередньо до вантажоодержувач. У цьому випадку зникає потреба в складських підприємствах (рис. 4).



Рис. 1. Перший тип логістичного ланцюга



Рис. 2. Другий тип логістичного ланцюга



Рис. 3. Третій тип логістичного ланцюга



Рис. 4. Четвертий тип логістичного ланцюга

Розглянемо основні переваги та недоліки при організації перевезення за обраними чотирма логістичними ланцюгами (табл. 2).

Результати оцінки прийняття рішень про вибір типу логістичного ланцюга при перевезенні за маршрутом м. Гданськ – м. Київ розподіляється наступним чином: 12% респондентів обирають перший тип логістичного ланцюга; найбільша кількість опитаних обирають другий тип ЛЛ – 48%; 23% – третій тип ЛЛ; найменша кількість (17%) припадає на четвертий тип логістичного ланцюга (рис. 5).

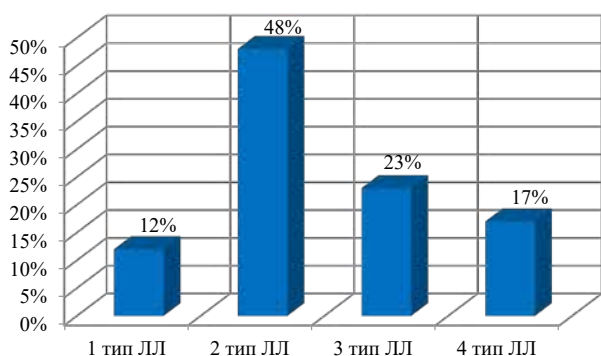


Рис. 5. Оцінка прийняття рішення про вибір типу логістичного ланцюга за маршрутом м. Гданськ (Польща) – м. Київ (Україна)

Результати щодо вибору типу логістичного ланцюга при перевезенні за маршрутом м. Рига – м. Київ наступні: 18% надають перевагу першому типу ЛЛ; найпоширенішим є другий тип ЛЛ, на його частку припадає 48%; 23% респондентів обирають третій тип логістичного ланцюга; та 17% припадає на четвертий тип ЛЛ (рис. 6).

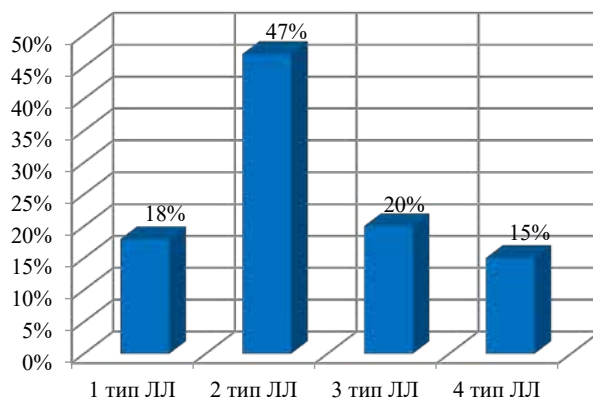


Рис. 6. Оцінка прийняття рішення про вибір типу логістичного ланцюга за маршрутом м. Рига (Латвія) – м. Київ (Україна)

Результати щодо вибору логістичного ланцюга при перевезенні за маршрутом м. Констанца – м. Київ розподілилися наступним чином: 7% надають перевагу першому типу ЛЛ; 31% надає перевагу другому типу; 21% респондентів обирають третій тип логістичного ланцюга; і найбільше, 47% припадає на четвертий тип ЛЛ (рис. 7).

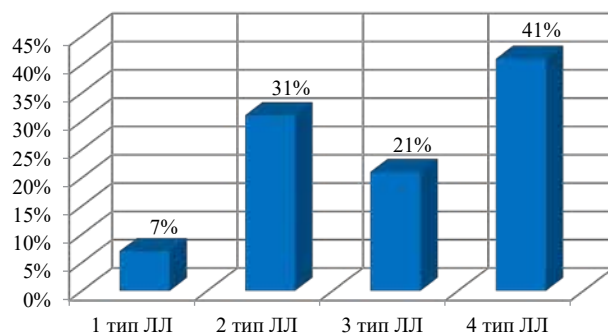


Рис. 7. Оцінка прийняття рішення про вибір типу логістичного ланцюга за маршрутом м. Констанца (Румунія) – м. Київ (Україна)

Таблиця 2

Основні переваги та недоліки досліджуваних логістичних ланцюгів

Тип ЛЛ	Переваги	Недоліки
Перший тип	– чітке розмежування функціональних обов'язків між усіма організаціями;	– витрати часу на рух інформаційного потоку; – затримки внаслідок відмінності підходів до оформлення документів та відсутності уніфікованих стандартів;
Другий тип	– більша погодженість дій внаслідок залучення меншої кількості ланок; – підвищення ефективності та швидкості організації процесу відправки вантажу з порту;	– витрати часу на оформлення документів за стандартами різних підприємств;
Третій тип	– менша вартість перевезення вантажу;	– можливі затримки часу при виконанні перевезення вантажу у залізничному сполученні, що може призвести до необхідності сплати додаткових коштів за простої контейнерного обладнання;
Четвертий тип	– залучення у доставку невеликої кількості ланок; – відсутність потреби у використанні складських підприємств, що збільшує безпеку цілісності вантажу.	– додаткові витрати на депозит контейнерного обладнання для вивозу з країни або оформлення страхування.

За критеріями вартості, тривалості, якості та надійності логістичного ланцюга при перевезенні різними маршрутами вибір експертів розподілився для різних типів ЛЛ наступним чином (рис. 8–10).

Опитування показали (рис. 8), що, обираючи перший тип логістичного ланцюга, найважливішим критерієм для експертів є вартість (71%), менш важливими є тривалість (18%), якість (8%) та надійність (3%). Другий тип ЛЛ схожий за перший. Найважливішим критерієм є вартість (41%), менш важливими є тривалість (29%), якість (18%) та надійність (12%). Найбільша група респондентів, що обрала третій тип логістичного ланцюга, також найважливішим критерієм обирає вартість (44%). Але при цьому майже третина опитаних обирає також надійність – 27%. На третьому місці по важливості обрано якість – 20%, найменш важливим є критерій тривалості – 9%.

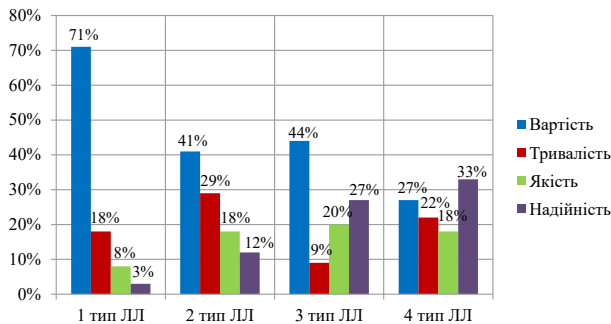


Рис. 8. Розподіл критеріїв ефективності при виборі маршруту перевезення м. Гданськ (Польща) – м. Київ (Україна)

Щодо останнього типу ЛЛ, більшість респондентів надає перевагу критерію надійності 33%, на другому місці вартість доставки (27%). Тривалість та якість доставки мають майже однакові значення – 22% та 18% відповідно.

Розглянемо результати опитування щодо розподілу критеріїв ефективності при перевезенні другим маршрутом (рис. 9). Вони показали, що, обираючи перший тип логістичного ланцюга, найважливішим критерієм для експертів є вартість (67%), менш важливими є тривалість (25%), якість (7%) та надійність (1%). Другий тип ЛЛ має такі показники: вартість – 46%, тривалість – 24%, якість – 20% та надійність – 10%. При третьому ЛЛ на першому місці по важливості обрано вартість – 47%, найменш важливим є критерій тривалості – 5%. Для експертів, що обрала четвертий тип логістичного ланцюга, найважливішим критерієм є його надійність – 36%, на другому місці по важливості

є якість – 24%. Менш важливими виявилися тривалість та якість – 19% та 24% відповідно.

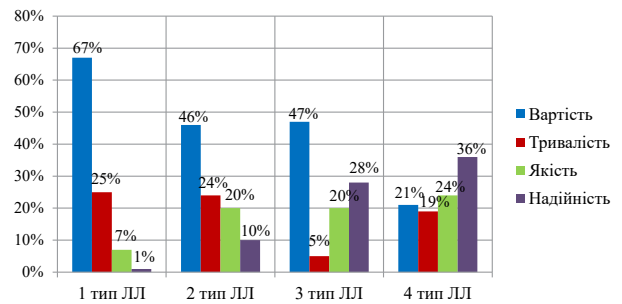


Рис. 9. Розподіл критеріїв ефективності при виборі маршруту перевезення м. Рига (Латвія) – м. Київ (Україна)

Розглянемо останні результати опитування за маршрутом м. Констанца – м. Київ. Опитування показали (рис. 10), що, обираючи перший тип ЛЛ, найважливішим критерієм для експертів є вартість (73%), менш важливими є тривалість (19%), якість (7%) та надійність (1%). Найбільша група респондентів, що обрала другий тип логістичного ланцюга, також найважливішим критерієм обирає вартість (36%). На другому місці тривалість доставки (29%). На третьому місці по важливості обрано якість – 20%, найменш важливим є критерій надійності – 15%. Респонденти, що обрала третій тип ЛЛ, також надають перевагу критерію вартості – 49%, на другому місці надійність – 24%. Для експертів, що обрала четвертий тип логістичного ланцюга, найважливішим критерієм є його надійність – 34%, на другому місці, по важливості, є якість обслуговування – 25%. Менш важливими виявилися тривалість та вартість – 19% та 22% відповідно.

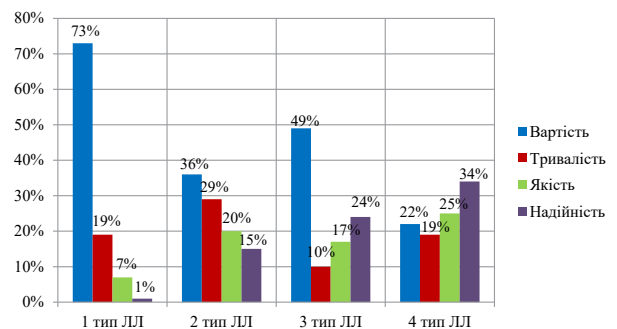


Рис. 10. Розподіл критеріїв ефективності при виборі маршруту перевезення м. Констанца (Румунія) – м. Київ (Україна)

Проведемо оцінку ризику, що виникає в діяльності суб'єктів ринку транспортних послуг, залучених як ланки логістичного ланцюга на маршруті м. Гданськ – м. Київ (табл. 3).

Таблиця 3

**Оцінка ризиків діяльності ланок логістичного ланцюга за маршрутом
м. Гданськ (Польща) – м. Київ (Україна)**

Назва	1 тип ЛЛ	2 тип ЛЛ	3 тип ЛЛ	4 тип ЛЛ
Морський перевізник	0,2	0,2	0,3	0,4
Експедитор	0,6	0,5	0,3	0,3
Автомобільний перевізник	0,4	0,4		0,4
Склад	0,6	0,5		
Митниця країни відправлення	0,4	0,3	0,3	0,4
Залізничний транспорт			0,8	
Митниця країни призначення	0,5	0,5	0,5	0,5
Сума	2,7	2,4	2,2	2

Таблиця 4

**Оцінка ризиків діяльності ланок логістичного ланцюга
за маршрутом м. Рига (Латвія) – м. Київ (Україна)**

Назва	1 тип ЛЛ	2 тип ЛЛ	3 тип ЛЛ	4 тип ЛЛ
Морський перевізник	0,2	0,2	0,3	0,4
Експедитор	0,7	0,6	0,5	0,4
Автомобільний перевізник	0,5	0,5		0,5
Склад	0,6	0,4		
Митниця країни відправлення	0,6	0,5	0,5	0,6
Залізничний транспорт			0,8	
Митниця країни призначення	0,5	0,5	0,5	0,5
Сума	3,1	2,7	2,6	2,4

Таблиця 5

**Оцінка ризиків діяльності ланок логістичного ланцюга
за маршрутом м. Констанца (Румунія) – м. Київ (Україна)**

Назва	1 тип ЛЛ	2 тип ЛЛ	3 тип ЛЛ	4 тип ЛЛ
Морський перевізник	0,2	0,2	0,3	0,4
Експедитор	0,8	0,7	0,6	0,5
Автомобільний перевізник	0,6	0,6		0,6
Склад	0,7	0,5		
Митниця країни відправлення	0,7	0,6	0,6	0,7
Залізничний транспорт			0,8	
Митниця країни призначення	0,5	0,5	0,5	0,5
Сума	3,5	3,1	2,8	2,7

Таким чином, найменш ризикованим є доставка вантажу за четвертим типом логістичного ланцюга (показник 1,8), при якому контейнер доставляється безпосередньо до вантажоодержувача. На другому місці – третій тип (2,2), доставка залізницею. Третє та четверте місце зайняли відповідно другий (2,4) та перший (2,7) типи ЛЛ (табл. 4).

Як видно з таблиці, ризики при доставці з Латвії схожі за показниками при використанні маршруту доставки з вантажу з Гданську. Найменший показник ризику належить четвертому типу ЛЛ та становить 2,4. Друге місце посідає третій тип ЛЛ

з показником 2,6. Третє та четверте місце розділили другий та перший типи ЛЛ з показниками відповідно 2,7 та 3,1 один (табл. 5).

Таким чином, за пріоритетністю, ризики діяльності ланок ланцюгів при доставці за третім маршрутом схожі за попередні. Найменш ризикованим є четвертий тип ЛЛ з показником 2,7. Третій ЛЛ становить 2,8. Другий і перший ЛЛ відповідно становлять 3,1 та 3,5 одиниць.

Висновки. На основі опитування замовників сформовано оцінку прийняття рішень щодо вибору типу логістичного ланцюга. Розглянуто чотири альтернативних логістичних ланцюги доставки

товару у змішаному сполученні. Розподіл критеріїв ефективності при виборі маршруту показав, що для всіх трьох маршрутів, вибір першого, другого та третього логістичних ланцюгів базується на вартості доставки. Обираючи четвертий тип логістичного ланцюга, найважливішим критерієм для експертів є надійність, що досягається за рахунок

мінімізації участі великої кількості підприємств, задіяних при доставці.

Проведено оцінку ризиків, що можуть виникати у діяльності суб'єктів ринку транспортних послуг, залучених як ланки логістичного ланцюга. Результати для всіх маршрутів показали, що найменш ризикованими є вибір четвертого типу логістичного ланцюга.

Список літератури:

1. Інфраструктурне забезпечення розвитку транспортної системи регіону : монографія / Заблудська І. В. та ін. Сєвєродонецьк : СНУ ім. В. Даля, 2016. 193 с.
2. Кузьменко А.В. Аналіз оцінки рівня наявних об'єктів транспортно-логістичної інфраструктури підприємства // Економіка і суспільство. 2017. Вип. 9. С. 484–490.
3. Очеретенко С.В., Дмитрієва К.С. Дослідження питання удосконалення системи доставки вантажів у міжнародному сполученні на автотранспортних підприємствах // Комунальне господарство міст. Серія: технічні науки та архітектура. 2018. Вип. 140. С. 76–80.
4. Методологія формування транспортно-митної інфраструктури в Україні: монографія / Пасічник А. М. та ін. Дніпропетровськ : УМСФ, 2016. 168 с.
5. Воркут Т.А., Білоног О.Є. Методичні основи формування стратегічного портфеля проєктів систем перевезень в організаціях термінальної доставки вантажів автомобільним транспортом // Управління проєктами, системний аналіз і логістика. Технічна серія. 2012. Вип. 9. С. 15–24. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Upsal_2012_9_5.
6. Luzhanska N. Impact of the Cargo Customs Complex Efficiency on the Supply Chain Reliability // Journal of Sustainable Development of Transport and Logistics. 2020. № 1 (5). P. 96–102. DOI: <http://dx.doi.org/10.14254/jstdtl.2020.5-1.9>
7. Luzhanska N. Simulation and optimization of freight customs complexes based on queueing systems // Transport systems and transportation technologies. 2020. № 19. С. 37–42. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2020/208693>
8. Pasichnyk A., Mallnow V., Kutyrev V. Customs restricted facilities within the logistics transport and customs complex // Customs Scientific Journal CUSTOMS. 2017. Vol. 7. № 2. P. 31–53.
9. Pasichnyk A., Vitruh I., Kutyrev V. Factors that influence the formation of the transport-logistics networks // Systemy i srodki transportu samochodowego. Politechnika Rzeszowska. 2013. P. 517–526.
10. Mazurenko A., Kudriashov A., Lebid I., Luzhanska N., Kravchenya I., Pitsyk M. Development of a simulation model of a cargo customs complex operation as a link of a logistic supply chain // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Control processes. 2021. Vol. 5, No. 3 (113). 19–29. doi: 10.15587/1729-4061.2021.242915
11. Dai B., Nu Y., Xie X., Li J. Interactions of Traceability and Reliability Optimization in a Competitive Supply Chain with Product Recall // European Journal of Operational Research. 2021. № 290 (1). P. 116–131. Doi: 10.1016/J.Ejor.2020.08.003

Lebid Ie.M., Luzhanska N.O., Lebid I.H. RATIONALE FOR THE CHOICE OF A LOGISTIC CHAIN TO ENSURE THE EFFICIENCY OF BUSINESS PROCESSES IN INTERNATIONAL TRANSPORTATION

The article states that the needs arising in entities of foreign economic activity in the delivery of goods in wartime necessitated the development by logistics intermediaries of alternative routes of transporting goods that used to be served by the seaports of Ukraine. It was found that exporters and importers of goods cooperating with contractors whose location makes it impossible for them to rely solely on truck shipment spark the demand for services of consulting and freight forwarding companies developing logistics chains capable of providing optimal conditions for the supply of goods in mixed traffic.

It was found that the development of logistics chain projects involves taking into account the interests of the customer and meeting the requirements for technical, technological and organizational support for all stages of product delivery. It has been studied that the activities of enterprises and organizations involved in delivery are associated with risks that will have an impact on the resulting customer satisfaction with the service received. Emphasis is placed on the fact that the task of consulting and freight forwarding companies is to conduct preliminary research on the hallmark of industry-specific enterprises' activities, before deciding on cooperation with this type of organizations or searching for alternative solutions. Accordingly, it is indicated that the next step is a choice among enterprises operating in the market of the ones capable of providing the necessary service at minimum risk and with the best price/quality ratio.

It was determined that before planning a logistics chain project, the customers sets out efficiency criteria, the main of which are cost, time, quality and reliability. It is justified that involvement in the delivery of carriers

of various types of transport requires taking into account the specifics of the main and secondary processes, as well as risks associated with their activities. The article analyzes four types of logistics chains that can be used when importing goods to Ukraine in mixed traffic. The authors evaluate efficiency criteria for each of the researched routes and explain risks that may arise in foreign trade operations and the conditions for making management decisions to promote the interests of the customer and to provide them with alternative solutions.

Key words: consulting, logistics intermediary, logistics chain, foreign trade operation, risks, delivery of goods, route, efficiency criterion.

Ловська А.О.

Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ВПЛИВУ НА МІЦНІСТЬ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ КРИТОГО ВАГОНА

В матеріалах статті проведено визначення температурного впливу на міцність несучої конструкції універсального критого вагона моделі 11-217. При цьому дослідження проведені шляхом комп'ютерного моделювання з використанням методу скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation.

При створенні просторової моделі несучої конструкції критого вагона враховано елементи, які жорстко взаємодіють між собою, тобто в моделі не враховано самоущільнені двері.

Континуальна модель несучої конструкції критого вагона утворена тетраедрами. При проведенні розрахунків до уваги прийнято дві схеми термічного навантаження несучої конструкції критого вагона: температурний вплив на внутрішню поверхню, що має місце при перевезенні високотемпературних вантажів; зовнішній температурний вплив на бокові стіни критого вагона, що може мати місце при розморожуванні вантажів.

Результати проведених розрахунків показали, що міцність несучої конструкції критого вагона при першій досліджуваній схемі навантаження забезпечується при дії температури у 118°C. При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовані у вертикальних стійках і дорівнюють 344,8 МПа. У якості допустимих напружень враховано межу плинності матеріалу, яка для сталі 09Г2С дорівнює 345 МПа

При другій схемі навантаження несучої конструкції критого вагона максимальні еквівалентні напруження дотримуються в межах допустимих при зовнішньому температурному впливі у 136,2°C. Чисельні значення максимальних еквівалентних напружень при цьому складають 344,9 МПа та виникають у гофрах.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання залізничного транспорту шляхом можливості залучення критих вагонів до перевезень більш широкої номенклатури вантажів, а також створенню напрацювань щодо проектування мультифункціональних конструкцій вагонів.

Ключові слова: транспортна механіка, критий вагон, несуча конструкція, термічний аналіз, напружений стан.

Постановка проблеми. Підвищення ефективності використання та конкурентоспроможності залізничного транспорту викликає необхідність забезпечення його багатofункціональності та можливості використання під перевезення широкої номенклатури вантажів, в тому числі і високотемпературних.

Одним з найбільш використовуваних вагонів, який застосовується для перевезень високотемпературних вантажів, а саме окатишів та гарячого агломерату з температурою не вище 700°C є вагон-хопер. Важливо сказати, що в експлуатації може мати місце необхідність перевезень залізницею вантажів і з меншою температурою. У зв'язку з тим, що поповнення вагонного парку Укрзалізниці в дійсний час є досить незначним, а кількість вагонів-хоперів в експлуатації є обмеженою, доцільним є розгляд можливості транспортування таких вантажів в інших вагонах, наприклад критих. У зв'язку з цим для забезпечення сталого розвитку економіки країни та транспортної галузі виникає необхідність проведення досліджень в зазначеному напрямку.

Аналіз останніх досліджень та публікацій.

З метою поліпшення ефективності використання універсальних вагонів в роботі [1] запропоновано здійснення їх модернізації. Проведено обґрунтування заходів щодо модернізації вагонів. При цьому використано методи комп'ютерного моделювання та проведено натурний експеримент. Однак запропонована модернізація не сприяє можливості перевезень вантажів з підвищеною температурою.

Визначення можливих шляхів покращення техніко-економічних показників залізничних вагонів висвітлюється у публікації [2]. Реалізація поставленої задачі досягається за рахунок підвищення осьового навантаження вагона. Наведено обґрунтування даного рішення. В якості прототипу обрано вантажний вагон BCNHL.

В роботі [3] досліджено перспективи застосування інноваційних матеріалів для зменшення тари вагонів. Обґрунтовано використання в якості матеріалу несучих конструкцій вагонів магнієвих сплавів. Наведені результати розрахунків доціль-

ності застосування даного матеріалу в металокопцюваннях кузовів. Важливо сказати, що при цьому не приділено уваги визначенню температурного впливу на несучі конструкції вагонів.

В роботі [4] наведено результати обґрунтування покращення техніко-економічних показників вантажних вагонів шляхом впровадження високоміцних сталей в їх несучі конструкції. Проведено експериментальне уточнення умов міцності зварних з'єднань вагонів із високоміцних матеріалів. Розроблені способи підвищення витривалості зварних з'єднань. Однак в роботі не проводилось визначення температурного впливу на міцність несучих конструкцій вагонів з запропонованого матеріалу.

В роботі [5] авторами проводиться визначення навантаженості несучої конструкції вагона-хопера для перевезень окатишів та гарячого агломерату з обшивкою із композитного матеріалу. Результати розрахунків вагона довели доцільність даного впровадження. Однак дане рішення реалізоване стосовно вагона-хопера. Крім того, авторами не досліджувалось зовнішнього впливу температури на міцність несучої конструкції вагона.

Заходи щодо адаптації несучої конструкції напіввагона до перевезень високотемпературних вантажів обґрунтовано у роботі [6]. Авторами запропоновано встановлення у кузов напіввагона контейнерів з композитною обшивкою в яких можна розміщувати високотемпературний вантаж. Результати розрахунків на міцність, а також динамічну навантаженість підтвердили доцільність такого рішення.

В роботі [7] авторами запропоновано конструкцію багатофункціонального вагону для перевезень широкої номенклатури вантажів, в тому числі високотемпературних. Наведено результати розрахунків несучої конструкції вагона на міцність при основних експлуатаційних схемах навантаження. Разом з цим в даних роботах не досліджувалося зовнішнього впливу температурного навантаження на кузова вагонів, що має місце, наприклад, при розморожуванні вантажів у тепляках.

Проведений аналіз літературних джерел дозволяє зробити висновок, що доцільним є дослідження температурного впливу на несучу конструкцію критого вагона.

Мета та основні завдання статті. Метою статті є дослідження температурної навантаженості критого вагона при експлуатаційних режимах. Це дозволить підвищити ефективність використання критих вагонів та функціонування

транспортної галузі в цілому. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

- визначити вплив температури перевозимого вантажу на міцність несучої конструкції критого вагона;
- дослідити міцність несучої конструкції критого вагона при розморожуванні вантажу, розміщеному у ньому.

Викладення основного матеріалу статті. Для визначення впливу температури перевозимого вантажу на міцність несучої конструкції критого вагона у якості прототипу обрано критий вагон моделі 11-217 (рис. 1 [8]).



Рис. 1. Критий вагон моделі 11-217

Основну технічну характеристику вагона наведено в таблиці 1.

Таблиця 1

Основна технічна характеристика критого вагона моделі 11-217

Назва параметру	Значення
Вантажопідйомність, т	68
Тара, т	24,7
Швидкість конструкційна, км/год.	120
Габарит	1 – ВМ (0 – Т)
Осьове статичне навантаження, кН/вісь	231,8
База вагона, мм	10000
Довжина за осями зчеплення автозчепів, мм	14730
Довжина за кінцевими балками рами, мм	13870
Максимальна висота від рівня верха головки рейки, мм	4668
Кількість осей, шт.	4
Модель двохвісного візка	18-100
Наявність стоянкового гальма	є
Можливість встановлення буферів	немає

Для визначення допустимої температури перевозимого вантажу у вагоні проведено його термічний розрахунок. При цьому використано метод

скінчених елементів, який реалізовано в програмному комплексі SolidWorks Simulation. При створенні просторової моделі несучої конструкції критого вагона враховано елементи, які жорстко взаємодіють між собою, тобто в моделі не враховано самоущільнені двері.

Континуальна модель несучої конструкції критого вагона утворена тетраедрами. Модель налічує 230752 вузла та 656194 елементи. При цьому максимальний розмір елемента складає 100 мм, а мінімальний – 20 мм.

При складанні розрахункової схеми несучої конструкції критого вагона температурне навантаження P_T прикладалося до його внутрішніх поверхонь (рис. 2). Також розрахункова схема враховує вертикальне статичне навантаження P_B , зумовлене вагою вантажу розміщеного у кузові з використанням його повної вантажопідйомності. До упорів автотягача прикладалося повздовжнє навантаження P_L у 1,0 МН для імітації руху вагона у складі поїзда (рис. 3). У якості матеріалу конструкції використано сталь марки 09Г2С з лінійними ізотропними властивостями. Закріплення моделі здійснювалося в зонах її обпирання на ходові частини.

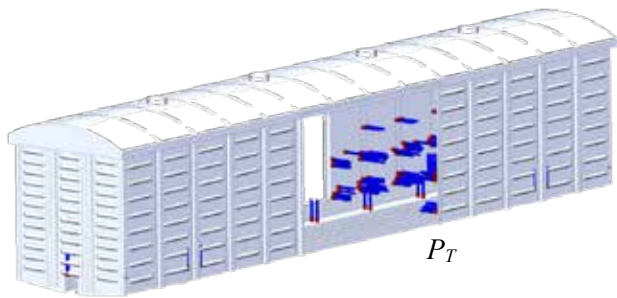


Рис. 2. Схема прикладення температурного навантаження до несучої конструкції критого вагона

Результати розрахунків показали, що міцність несучої конструкції критого вагона забезпечується при дії температури у 118°C (рис. 4). При цьому максимальні еквівалентні напруження зафіксовані у вертикальних стійках і дорівнюють 344,8 МПа (рис. 4). У якості допустимих напружень враховано межу плинності матеріалу, яка для сталі 09Г2С дорівнює 345 МПа [9].

Також в рамках дослідження проведено визначення можливості розігріву вантажу, розміщеного у критому вагоні в конвективному гаражі. При складанні розрахункової схеми враховано, що на несучу конструкцію критого вагона діє вертикальне статичне навантаження. Температурне навантаження при цьому прикладалося до зовнішніх поверхонь бокових стін (рис. 7).

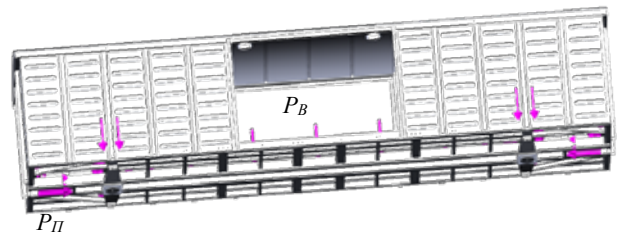


Рис. 3. Схема дії сил на несучу конструкцію критого вагона

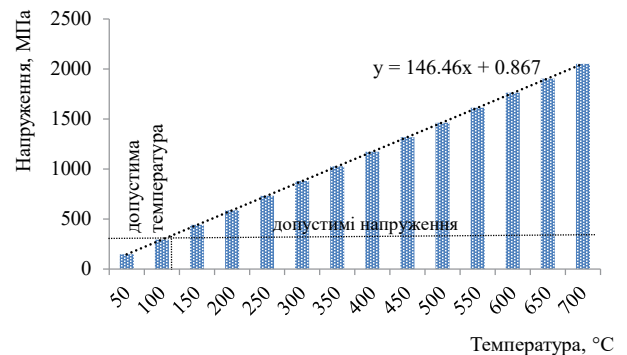


Рис. 4. Залежність напружень в несучій конструкції критого вагона від температурного впливу

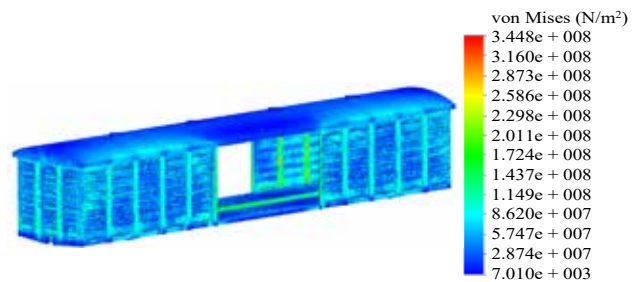


Рис. 5. Напружений стан несучої конструкції критого вагона

При цьому найбільш навантаженими складовими несучої конструкції вагона є бокові стіни (рис. 6).

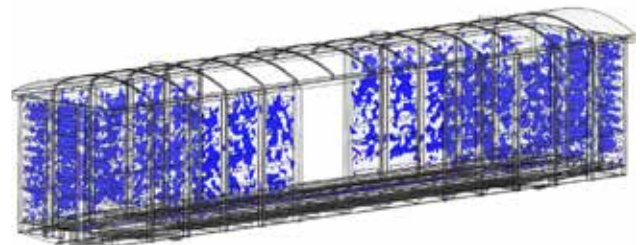


Рис. 6. Найбільш навантажені зони несучої конструкції критого вагона

Результати розрахунків встановили, що максимальні еквівалентні напруження в несучій конструкції критого вагона дотримуються в межах допустимих при зовнішньому температурному

впливі у $136,2^{\circ}\text{C}$ (рис. 8). При цьому максимальні еквівалентні напруження складають $344,9$ МПа та виникають у гофрах (рис. 9).

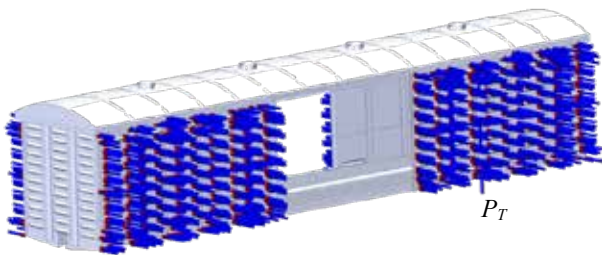


Рис. 7. Схема прикладення температурного навантаження до несучої конструкції критого вагона

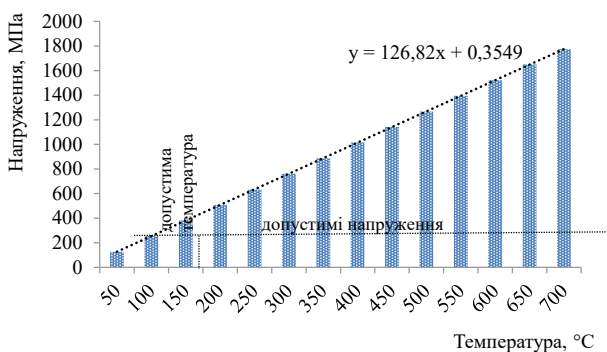


Рис. 8. Залежність напружень в несучій конструкції критого вагона від температурного впливу

Найбільш навантаженими складовими несучої конструкції вагона є бокові стіни (рис. 10).

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності використання залізничного транспорту шляхом можливості залучення критих вагонів до перевезень більш широкої номенклатури вантажів, а також створенню напрацювань щодо проектування мультифункціональних конструкцій вагонів.

Висновки

1. Визначено вплив температури перевозимого вантажу на міцність несучої конструкції критого

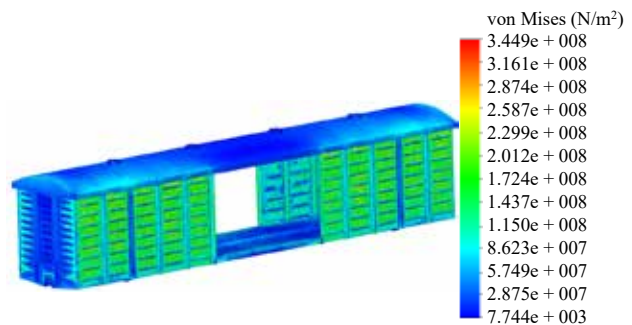


Рис. 9. Напружений стан несучої конструкції критого вагона

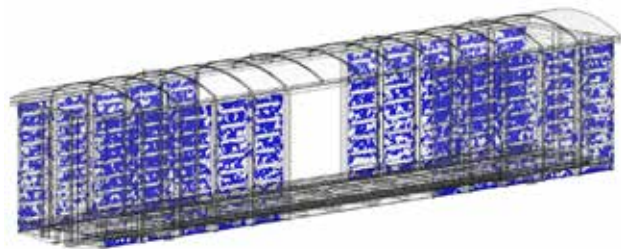


Рис. 10. Найбільш навантажені зони несучої конструкції критого вагона

вагона. Встановлено, що міцність несучої конструкції критого вагона забезпечується при дії температури у 118°C . Максимальні еквівалентні напруження зафіксовані у вертикальних стійках і дорівнюють $344,8$ МПа.

2. Досліджено міцність несучої конструкції критого вагона при розморожуванні вантажу, розміщеному у ньому. Максимальні еквівалентні напруження дотримуються в межах допустимих при зовнішньому температурному впливі у $136,2^{\circ}\text{C}$. При цьому чисельні значення максимальних еквівалентних напружень складають $344,9$ МПа та виникають у гофрах.

Список літератури:

1. Рейдемейстер А. Г., Калашник В. А., Шикун А. А. Модернизация как способ улучшения использования универсальных вагонов // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2016. № 2 (62). doi 10.15802/stp2016/67334
2. Chandra Prakash Shukla, Bharti P. K. Study and Analysis of Doors of BCNHL Wagons // International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT). 2015. Vol. 4, Issue 04. P. 1195–1200. doi: https://doi.org/10.17577/ijertv4is041031
3. Woo Geun Lee, Jung-Seok Kim, Seung-Ju Sun, Jae-Yong Lim. The next generation material for lightweight railway car body structures: Magnesium alloys // Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2016. Vol. 232. Issue 1. P. 25–42.
4. Бороненко Ю. П., Філіпова І. О. Выбор конструктивных решений элементов вагонов с малой массой тары // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. 2017. № 3 (69). P. 121–129. doi 10.15802/stp2017/104546

5. Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Vadym Dzhenchako, Olexandr Zhylinkov, Anna Fomina, Andrii Lytvynenko. Determining the features of temperature influence on the loadbearing structure of a hopper car with a composite cladding when transporting pellets to metallurgical enterprises // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. Vol. 1/7 (115). P. 32–41. doi: 10.15587/1729-4061.2022.251300
6. Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Maryna Khara, Iryna Nikolaienko, Andrii Lytvynenko, Sergiy Sova. Adapting the loadbearing structure of a gondola car for transporting hightemperature cargoes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. № 2/7 (116). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2022.253770
7. Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Andrii Lytvynenko, Sergiy Sova. Determining the features of loading the bearing structure of a multifunctional car under operating modes // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2022. № 3/7 (117). P. 6–13. doi: 10.15587/1729-4061.2022.258201
8. 4-х осный крытый вагон с уширенными дверями 11-217 // <http://transport.in.ua/informatsiya/inform-zhd-perevozki/vagony-harakteristiki/vagon-mod-11-217/>
9. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.

Lovska A.O. RESEARCH OF THE TEMPERATURE EFFECT ON THE STRENGTH OF THE BEARING STRUCTURE OF A COVERED RAILROAD CAR

The article deals with the determination of the temperature effect on the strength of the bearing structure of a universal boxcar model 11-217. The study was carried out by computer modeling using the finite element method, which is implemented in the SolidWorks Simulation software package.

When creating a spatial model of the bearing structure of a covered railroad car, elements that rigidly interact with each other were taken into account, i.e., the model does not take into account self-sealing doors.

The continuum model of the bearing structure of a boxcar is formed by a tetrahedron. The calculations took into account two schemes of thermal loading of the bearing structure of a covered freight car: the temperature effect on the inner surface, which occurs during the transportation of high-temperature cargo; the external temperature effect on the side walls of a covered freight car, which can occur during defrosting of cargo.

The results of the calculations showed that the strength of the bearing structure of a covered railroad car under the first studied loading scheme is ensured at a temperature of 118°C. The maximum equivalent stresses were recorded in the vertical racks and equaled 344.8 MPa. The yield strength of the material was taken into account as permissible stresses, which for 09G2S steel is 345 MPa.

In the second loading scheme for the bearing structure of a covered railroad car, the maximum equivalent stresses are within the permissible limits for external temperature exposure of 136.2°C. The numerical values of the maximum equivalent stresses are 344.9 MPa and occur in the corrugations.

The research will contribute to improving the efficiency of rail transport by enabling the use of covered railcars for the transportation of a wider range of goods, as well as creating developments in the design of multifunctional railcar structures.

Key words: transport mechanics, covered railroad car, bearing structure, thermal analysis, stress state.

Півторак Г.В.

Національний університет «Львівська політехніка»

Булишин Н.А.

Національний університет «Львівська політехніка»

ОЦІНКА МОЖЛИВОСТЕЙ РОЗВИТКУ КРАУДШИПІНГУ У ЛЬВОВІ

Розвиток цифрових технологій впливає на різні сфери життя суспільства. Це стосується також і купівельної поведінки споживачів: тренд до зростання частки онлайн-покупок спостерігається вже не перший рік, а пандемія Covid-19 інтенсифікувала цей процес. Зростання частоти онлайн-покупок спричиняє збільшення попиту на доставку «останньої милі» – до кінцевого споживача. Зростаючі вимоги клієнтів щодо швидкості доставки інтенсифікують рух вантажопотоків міською територією, а це негативно впливає на якість міського середовища. Відповідно, виникла потреба в пошуку та розробці різноманітних варіантів оптимізації процесу доставки «останньої милі», зокрема, розвиток краудшипінгу – доставки товарів особами, які вже прямують в певному напрямку і готові взяти з собою пакунок, щоб доставити його кінцевому споживачу.

В цій роботі проведено дослідження популярності онлайн-покупок і різних способів отримання онлайн-замовлень та проведено базову оцінку потенційних можливостей краудшипінгу з використанням мережі громадського транспорту у м. Львові. На основі обробки даних анкетувань мешканців міста визначено вплив соціо-економічних характеристик на купівельну поведінку. Продовольчі товари онлайн зазвичай купляють 6,1% опитаних, а непродовольчі – 19%; з них 25% покупців продовольчих товарів та 30% покупців непродовольчих товарів замовляє доставку додому. Враховуючи структуру населення міста, це 4780 регулярних доставок (раз на тиждень або частіше). Результати опитувань свідчать про готовність респондентів до краудшипінгу: 23% відповіли, що однозначно розглядали б можливість краудшипінгової доставки, а 48% – що скоріше б розглядали, ніж не розглядали. 61% готові самі виконувати таку доставку. Оскільки багато великих офлайн-ритейлерів у відповідь на зміну запитів населення відкрили інтернет-сторінки, де можна замовити товари з доставкою додому, то використання такими магазинами краудшипінгу із залученням власних офлайн-покупців може бути доцільною з позиції як економії коштів, так і прискорення доставки. Значна цільність маршрутної мережі Львова дозволяє залучати користувачів громадського транспорту до такої ініціативи.

Ключові слова: *купівельна поведінка, доставка останньої милі, міська логістика, краудшипінг.*

Постановка проблеми. Загальна тенденція щодо зростання частки інтернет-покупок в Україні спостерігається вже не перший рік. Наприклад, якщо у 2018 році регулярні онлайн-покупки здійснювали 25% покупців (згідно досліджень, проведених Асоціацією ритейлерів України), то у 2020 – вже 33%, а у 2022 – 39% [1]. Це загальносвітовий тренд і очевидною причиною є збільшення цифровізації суспільства. Особливо значна різниця щодо продовольчих товарів – у 2018 р. частка онлайн-покупок в цій категорії становила всього 1%, а у 2022 році – вже 13%.

Як відзначається в праці [2, ст. 483], перевагами онлайн-покупок для покупців є, зокрема, економія часу, ширший асортимент вибору товару та ціни, більша конфіденційність особистих покупок. Пандемія Covid-19 додала до цих переваг також зменшення ризиків для здоров'я [3–6]. Проте зростання кількості як онлайн-покупців,

так і онлайн-магазинів висуває перед останніми додаткові виклики щодо якості обслуговування, зокрема, вимоги щодо високої швидкості та низької вартості доставки [2].

Зростання обсягів онлайн-покупок спричинило збільшення попиту на доставку товарів. Зміни в структурі ланцюга постачань особливо стосуються останньої ланки: доставки до кінцевого споживача, яка може відбуватися різними способами: офіс служби доставки, поштамат/термінал служби доставки, кур'єр магазину, кур'єр служб доставки, самовивіз, краудшипінг.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Зростання частоти доставок «останньої милі» негативно впливає як на завантаженість вуличної мережі міста, так і на забрудненість навколишнього середовища, може спричинити перешкоди в русі транспортного потоку, затори тощо. Тому останнім часом розробляються різні концепції оптимізації цього процесу.

В роботі [7] автори оцінюють транспортування вантажів автономними роботами: вантажівка завантажується на вантажному терміналі групою вантажів для клієнтів, що знаходяться в одному районі; також на борту вантажівки є автономні роботи, кожен з яких прив'язаний до певного гурту вантажів; коли вантажівка прибуває в район обслуговування, автономні роботи беруть свій вантаж, доставляють його до клієнта і повертаються назад до вантажівки.

Доставка за принципом Microhubs with crowdshipping (M+C) є достатньо ефективною у містах з великою щільністю населення. Така доставка дозволяє зменшити необхідну кількість вантажних автомобілів (і, відповідно, експлуатаційні витрати) [8].

Краудшипінг (crowdshipping) як концепція доставки товарів особами, які вже прямують в певному напрямку і готові взяти з собою пакунок, щоб доставити його кінцевому споживачу, почала набувати поширення порівняно недавно, проте має значні перспективи, зважаючи на потребу в покращенні екологічної стійкості доставки «останньої милі» [9, 10].

Краудшиперами можуть бути покупці в магазині [11], люди, які здійснюють щоденні подорожі в певному напрямку (певним маршрутом) [12], користувачі громадського транспорту (зокрема, в поєднанні з камерами для зберігання посилок в терміналах ГТ) [10, 13] чи власники приватних автомобілів, які переміщуються містом по своїх потребах і мають вільний простір в автомобілі [14], співробітники великих дистрибуторських чи торгових центрів, які можуть доставляти вантажі онлайн-клієнтам після роботи [15]. Переваги краудшипінгу як способу «доставки останньої милі» вивчалися в працях [2, 16].

Важливим елементом ефективності краудшипінгу є існування онлайн-платформ, які б акумулювали запити на доставку та готовність до виконання з врахуванням обмежень по часу [17].

В Україні такий тип доставки наразі є малозастосовуваним та маловивченим. Одне з небагатьох українських досліджень пов'язане з оцінкою латентного попиту на послугу краудшипінгу при доставці продуктів харчування [18]. Проведене автором дослідження з використанням факторного аналізу даних опитувань, проведених в м. Харків взимку 2020–2021 рр., свідчить про значний потенціал такого типу доставки.

Формулювання цілей статті. Основна ціль дослідження – визначити популярність онлайн-покупок та різних способів отримання онлайн-

замовлень у Львові та оцінити потенційні можливості краудшипінгу з використанням мережі громадського транспорту.

Виклад основного матеріалу. *Матеріали дослідження.* Збір даних для дослідження проводився з допомогою онлайн-опитування. Опитувальник складався з трьох частин – запитань щодо демографічного профілю респондента (вік, вид зайнятості, наявність власного автомобіля), запитань щодо поведінки при здійсненні покупок, сформованих як шкали Лайкерта [19] з кількістю градацій чотири або п'ять, та запитань щодо ставлення опитаних до краудшипінгу як способу доставки товарів. Опитування проводилося протягом листопада-грудня 2022 року, отримана вибірка становить 134 респонденти віком від 17 до 60 років (мешканці м. Львова).

Аналіз вибірки респондентів.

Узагальнені дані вибірки опитаних подано в таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристика вибірки опитаних

Показник	Кількість респондентів	Частина вибірки, %
Вік:		
• 17 – 23 роки	86	64,2
• 23 – 30 років	24	17,9
• 30 – 40 років	19	14,2
• 40 – 60 років	5	3,7
Основний вид діяльності:		
• учень/студент	64	47,8
• працюючий	68	50,7
• тимчасово непрацюючий	5	3,7
Наявність власного автомобіля в сім'ї		
• так	92	68,7
• ні	42	31,3

Основна частина вибірки – це студенти або працююче населення віком до 30 років, що потрібно врахувати при подальшому аналізі результатів.

Результати опитувань.

Загальний аналіз купівельної поведінки опитаних дозволяє сказати наступне:

– Загалом продовольчі товари купують частіше: 72% людей здійснює такі покупки кілька разів на тиждень, ще 20% – раз на тиждень, решта – рідше.

– Щодо непродовольчих товарів розподіл такий: 38% опитаних купують такі товари кілька разів на місяць, 31% – раз на тиждень, 20% – раз на місяць або рідше і 11% – кілька разів на тиждень.

– Згідно проведених досліджень, працюючі загалом частіше виконують покупки, аніж учні/студенти: наприклад, продовольчі товари кілька разів на тиждень купляє 80% працюючих і 62% студентів. Детальніша розбивка подана на рис. 1.

– Продовольчі товари опитані в основному купляють недалеко від дому: це розташовані в межах пішої доступності магазини, супермаркети чи ринки (таких покупок 74%). Майже половина (48%) іноді їздить за такими покупками у великі торгові центри чи на загальноміські ринки. Інтернет-купівля продовольчих товарів загалом не є популярною серед опитаних: 25% ніколи не користувалися такою можливістю, а 45% робили це рідко. Детальніший розподіл подано на рис. 2. Розподілу за видом діяльності не подано, оскільки різниця є несуттєвою.

– Непродовольчі товари зазвичай недалеко від дому купляє 35% опитаних (вдвічі менше, ніж продовольчі товари). Ще 22% зазвичай їздить за такими покупками у великі торгові центри чи на загальноміські ринки, а 18,5% зазвичай користуються інтернет-купівлею (для порівняння – для продовольчих товарів це значення становить 6%). Ніколи не користувалися можливістю купівлі непродовольчих товарів в Інтернет 9%, а 44% робили це рідко. Детальніший розподіл подано на рис. 3.

– Наявність автомобіля збільшує ймовірність покупок з поїздкою в торговий центр чи на ринок: відповіді «зазвичай» та «часто» обрали 39% опитаних, які не мають автомобіля, та 47% опитаних, які мають власне авто.

Серед львів'ян частіше при онлайн-купівлі замовляють доставку до поштового відділення чи поштомату, аніж кур'єрську доставку додому: сума відповідей «зазвичай», «часто» та «іноді» для доставки додому непродовольчих товарів становить 40,77% (42,4% для працюючих і 37,9% для учнів/студентів), а для доставки до відділення – 60,77% (53% і 66,7% відповідно). Для продовольчих товарів ці значення становлять 28,5% та 43,1%. Можна відзначити, що різниця між кількістю доставок додому та до відділення служби доставки є меншою для продовольчих товарів – 14,6% порівняно з 20% для непродовольчих товарів. Обмеження щодо терміну чи умов зберігання певних продовольчих товарів можуть частково пояснювати цю різницю. Також частина онлайн-магазинів продовольчих товарів пропонує безкоштовну доставку додому при замовленні від певної суми. Не виявлено різниці між видами доставки при інтернет-покупках залежно від наявності власного автомобіля: доставку у відділення всі замовляють на 19% частіше, ніж доставку додому.

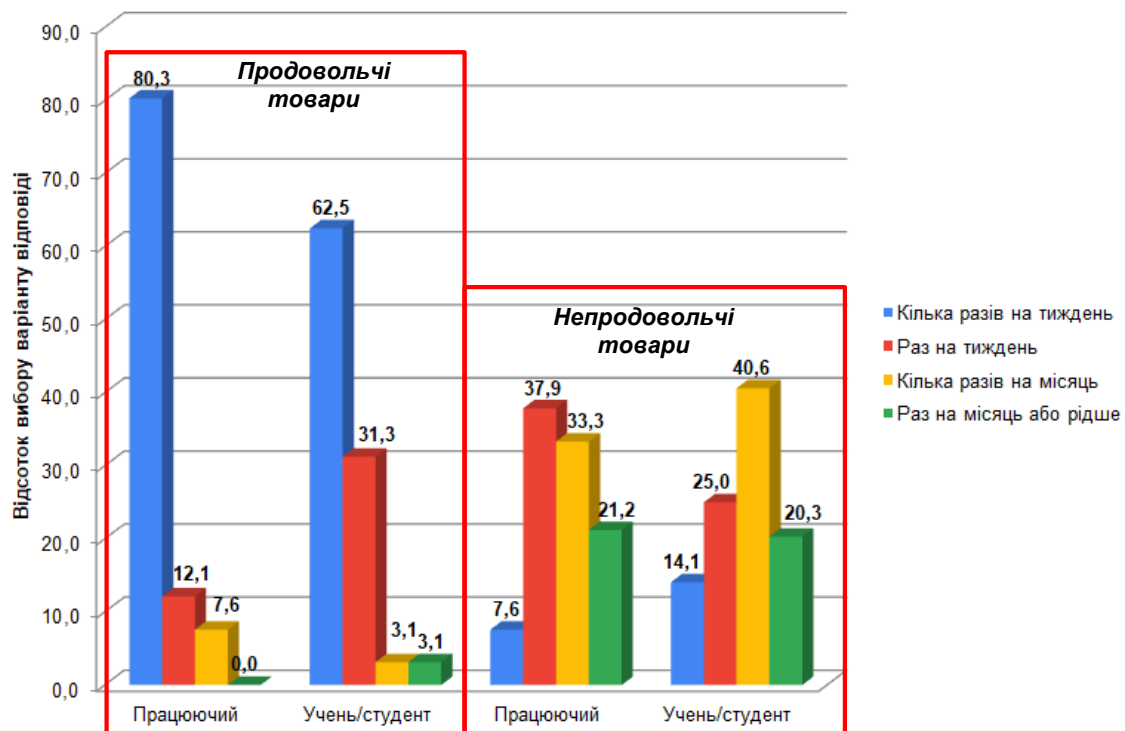


Рис. 1. Розподіл частоти здійснення покупок

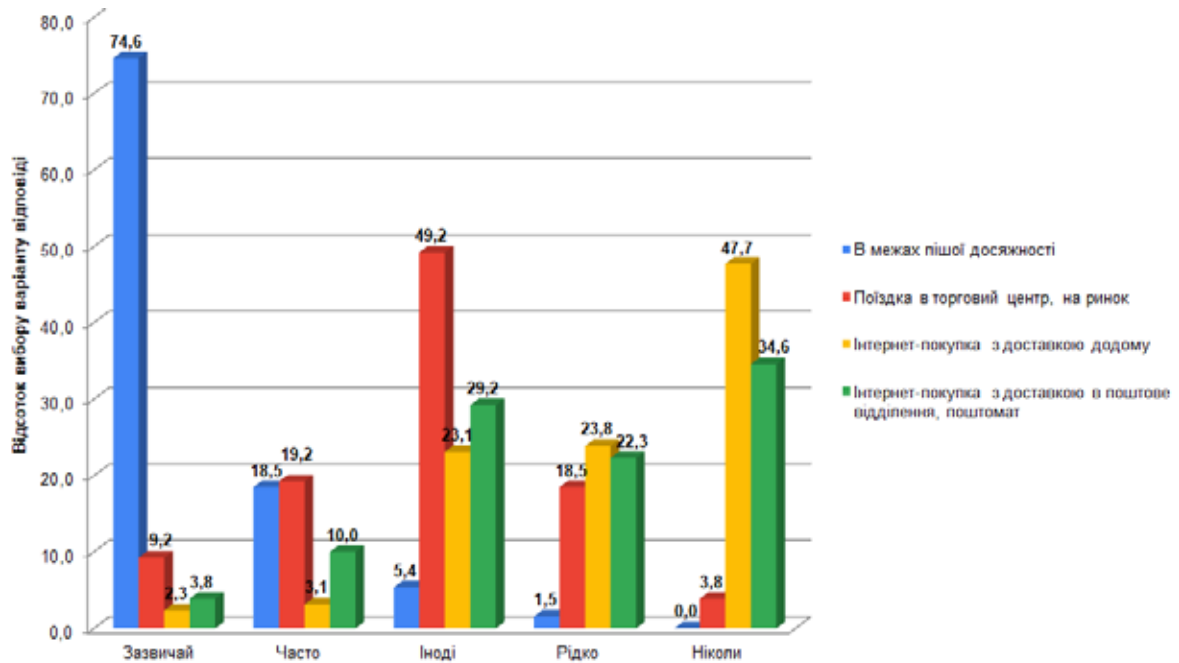


Рис. 2. Частота вибору певного місця покупок продовольчих товарів

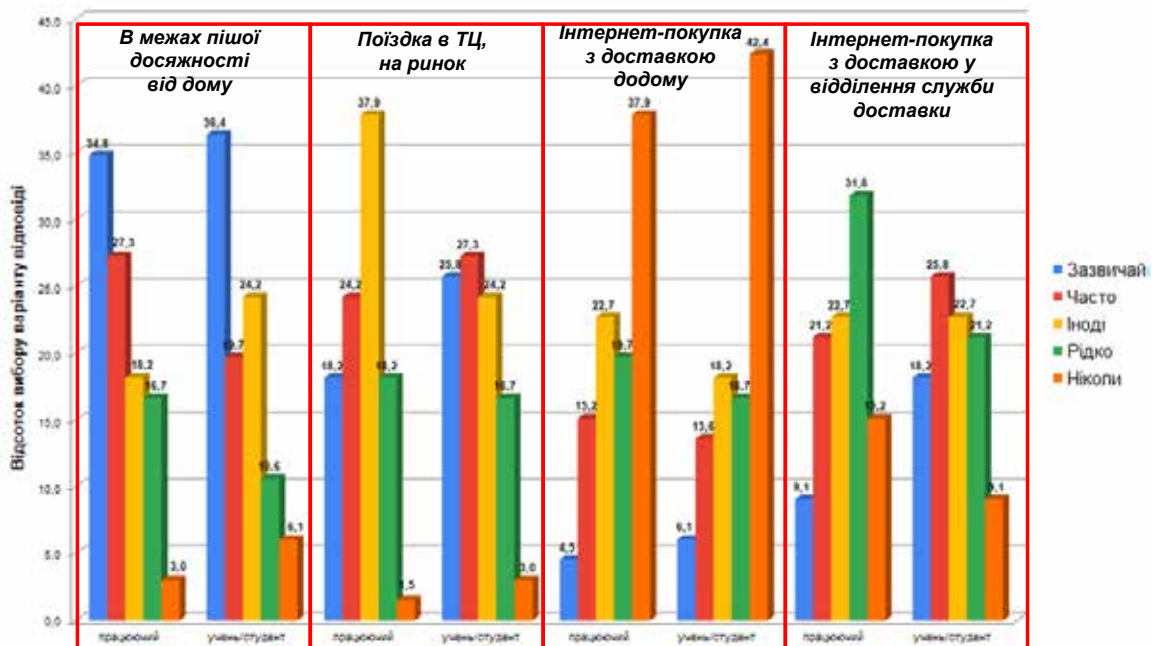


Рис. 3. Частота вибору певного місця покупок непродовольчих товарів

Оцінка перспектив розвитку краудшипінгу у Львові

Загальна базова оцінка запитів на доставку товарів по Львову може бути проведена на основі таких міркувань: продовольчі товари онлайн завжди купляють 6,1% опитаних, а непродовольчі – 19%; з них 25% покупців продовольчих товарів та 30% покупців непродовольчих товарів

замовляє доставку додому. Враховуючи структуру населення міста (згідно даних Державного управління статистики у Львівській області, у 2022 році в місті нараховувалося близько 125 тис постійного населення віком 17–30 років), це 4780 регулярних доставок (раз на тиждень або частіше).

Більшість великих офлайн-рітейлерів Львова у відповідь на зміну запитів населення відкрили інтер-

Характеристика міських маршрутів ГПТ, які мають кінцеву зупинку біля розглядуваного ТЦ

Маршрут ГПТ	Довжина, км	Максимальний інтервал, хв	Тривалість рейсу, хв	Частка охоплення міської території, %
3А	10	15	40	6,7
10	11,7	15	47	7,8
25	18,3	15	73	12,3
40	22,7	12	85	15,2
131	20,9	20	78	14

нет-сторінки, де можна замовити товари з доставкою додому. Для доставки такі магазини використовують власних (чи найнятих) кур'єрів, також для деяких груп товарів можлива доставка Новою поштою до відділення. Можливість використання такими магазинами краудшипінгу із залученням власних офлайн-покупців може бути доцільною з позиції як економії коштів, так і прискорення доставки.

Для прикладу проведено аналіз такої можливості для одного з популярних торгових центрів. Обраний ТЦ розташований на околиці міста, практично за межею житлової забудови, тому покупці зазвичай прибувають туди власним чи громадським транспортом. Біля ТЦ є кінцева зупинка для п'яти міських автобусних маршрутів (табл. 2). Орієнтовна частка охоплення маршрутом міської території розраховувалася з врахуванням зони пішої досяжності 500 м в обидва боки від шляху руху маршруту.

Загальна частка охоплення міської території (без урахування сумісних ділянок шляхів руху маршрутів) становить 13,5%. Максимальна тривалість доставки (без урахування часу на формування магазином замовлення та очікування кур'єра-краудшипера) коливається від 55 до 98 хв.

Результати опитувань свідчать про готовність респондентів вікової категорії 17–30 років до краудшипінгу: 23% відповіли, що однозначно розглядали б можливість краудшипінгової доставки, а 48% – що скоріше б розглядали, ніж не розглядали. 61% готові самі виконувати таку доставку (з них 10% – безкоштовно, 35% – за певні бонуси чи знижки в торговій мережі і 16% – за оплату).

Така ініціатива має свої обмеження та вимоги для можливості її впровадження: необхідність розробки окремого додатку або розширення існуючих додатків (зокрема, тих, які вже мають торгові мережі) для можливості пошуку кур'єра та відстеження доставки; обмеження щодо ваги та об'єму доставки (зі зростанням ваги ймовірність знаходження кур'єра-краудшипера зменшується експоненційно).

Висновки. Зростання обсягів онлайн-покупок, пов'язане з цифровізацією суспільства та інтенсифіковане пандемією Covid-19, спричинило збільшення попиту на доставку товарів. Зміни в структурі ланцюга постачань особливо стосуються останньої ланки: доставки до кінцевого споживача. Проте зростання частоти доставок «останньої милі» негативно впливає як на завантаженість вуличної мережі міста, так і на забрудненість навколишнього середовища. Тому останнім часом розробляються різні концепції оптимізації цього процесу. Однією з яких є краудшипінг.

Для отримання інформації щодо купівельної поведінки мешканців Львова проведено анкетування респондентів віком від 17 до 60 років. Серед опитаних 82,1% – це студенти або працююче населення віком до 30 років, що враховано в подальшому аналізі.

Продовольчі товари онлайн зазвичай купляють 6,1% опитаних, а непродовольчі – 19%. Ще 13,1% та 37,8% відповідно роблять онлайн-покупки часто. Популярнішою при онлайн-купівлі є доставка до поштового відділення чи поштомату, аніж кур'єрська доставка додому: для непродовольчих товарів значення становлять 40,8% та 60,8%, а для продовольчих товарів – 28,5% та 43,1%.

Результати опитувань свідчать про готовність респондентів вікової категорії 17–30 років до краудшипінгу: 23% відповіли, що однозначно розглядали б можливість краудшипінгової доставки, а 48% – що скоріше б розглядали, ніж не розглядали. 61% готові самі виконувати таку доставку. Оскільки багато великих офлайн-ритейлерів у відповідь на зміну запитів населення відкрили інтернет-сторінки, де можна замовити товари з доставкою додому, то використання такими магазинами краудшипінгу із залученням власних офлайн-покупців може бути доцільною з позиції як економії коштів, так і прискорення доставки. Значна щільність маршрутної мережі Львова дозволяє залучати користувачів громадського транспорту до такої ініціативи.

Список літератури:

1. Асоціація ритейлерів України. Основні тренди ритейлу 2022. Онлайн доступ: <https://rau.ua/novyni/vijna-zminila-ritejlu-nielseniq/>
2. Giusy Macrina, Luigi Di Puglia Pugliese, Francesca Guerriero. Crowdshipping: a new efficient and eco-friendly delivery strategy. *Procedia Manufacturing*. 2020. Vol. 42. P. 483-487. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.048>
3. Aloi, A., Alonso, B., Benavente, J., Cordera, R., Echániz, E., González, F., ... & Sañudo, R. Effects of the COVID-19 lockdown on urban mobility: empirical evidence from the city of Santander (Spain). *Sustainability*. 2020. 12(9). 3870.
4. Borkowski, P., Jażdżewska-Gutta, M., & Szmelter-Jarosz, A. Lockdowned: Everyday mobility changes in response to COVID-19. *Journal of Transport Geography*. 2021. 90. 102906.
5. Chang H. H., Meyerhoefer C. D. COVID-19 and the Demand for Online Food Shopping Services: Empirical Evidence from Taiwan. *American Journal of Agricultural Economics*. 2021. Volume 103. Issue2. Pages 448-465.
6. Julia Koch, Britta Frommeyer, Gerhard Schewe. Online Shopping Motives during the COVID-19 Pandemic – Lessons from the Crisis. *Sustainability*. 2020, 12(24). 10247. <https://doi.org/10.3390/su122410247>.
7. Nils Boysen, Stefan Schwerdfeger, Felix Weidinger. Scheduling last-mile deliveries with truck-based autonomous robots. *European Journal of Operational Research*. 2018. Volume 271. Issue 3. Pages 1085-1099. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.05.058>.
8. Sudheer Ballare, Jane Lin. Investigating the use of microhubs and crowdshipping for last mile delivery. *Transportation Research Procedia*. 2020. Volume 46. Pages 277-284. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.191>.
9. McKinnon, A. C. Crowdshipping. A communal approach to reducing urban traffic levels? *Logistics White Paper*. 2016. Vol.1. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.20271.53925>.
10. Gatta, V., Marcucci, E., Nigro, M., Serafini, S. Sustainable urban freight transport adopting public transport-based crowdshipping for B2C deliveries. *European Transport Research Review*. 2019. 11.13. 14 p.
11. Katarzyna Gdowska, Ana Viana, João Pedro Pedrosa. Stochastic last-mile delivery with crowdshipping. *Transportation Research Procedia*. 2018. Volume 30. Pages 90-100. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2018.09.011>.
12. Hadi Ghaderi, Pei-Wei Tsai, Lele Zhang, Alireza Moayedikia. An integrated crowdshipping framework for green last mile delivery. *Sustainable Cities and Society*. 2022. Volume 78. 103552. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103552>.
13. Eiichi Taniguchi, Russell G. Thompson, Ali G. Qureshi. Modelling city logistics using recent innovative technologies. *Transportation Research Procedia*. 2020. Vol. 46. P. 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.03.157>.
14. Xiaoping Liang, Hualong Yang, Qiong Wu. Online crowdsourced delivery for urban parcels using private cars under time-dependent travel times. *Computers & Industrial Engineering*. 2022. Volume 174. 108807. <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108807>.
15. Nils Boysen, Simon Emde, Stefan Schwerdfeger. Crowdshipping by employees of distribution centers: Optimization approaches for matching supply and demand. *European Journal of Operational Research*. 2022. Volume 296. Issue 2. Pages 539-556. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.04.002>.
16. Catherine Cleophas, Caitlin Cottrill, Jan Fabian Ehmke, Kevin Tierney. Collaborative urban transportation: Recent advances in theory and practice. *European Journal of Operational Research*. Volume 273, Issue 3. 2019. Pages 801-816. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2018.04.037>
17. Shohre Zehabian, Christian Larsen, Sanne Wøhlk. Estimation of the arrival time of deliveries by occasional drivers in a crowd-shipping setting. *European Journal of Operational Research*. 2022. Volume 303. Issue 2. Pages 616-632. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2022.02.050>.
18. Россолов, О. В. Дослідження латентного попиту на послугу краудшипінгу з використанням факторного аналізу. *Комунальне господарство міст*. 2021. Т.3. В. 163. С. 194-198.
19. Ranjit Kumar. *Research Methodology: A Step-by-Step Guide for Beginners*. The Fifth Edition. SAGE, 2018. 528 p.

Pivtorak H.V., Bulyshyn N.A. ASSESSMENT OF OPPORTUNITIES FOR CROWDSHIPPING DEVELOPMENT IN LVIV

The development of digital technologies affects various spheres of society and applies to the purchasing behaviour of consumers. The trend towards an increase in the share of online purchases has been observed for more than a year, and the Covid-19 pandemic has intensified this process. The increase in the frequency of online shopping causes an increase in the demand for delivery of the "last mile" – to the final consumer. The growing demands of customers regarding the speed of delivery increase the movement of freight flows through the city. This factor negatively affects the quality of the urban environment. Accordingly, there was a need to find and develop various options for optimizing the "last mile" delivery process. The development of

crowdshipping (the delivery of goods by people who are already headed in a specific direction and are willing to accept the package with them to deliver it to the end consumer) is one way.

In this work, a study of the popularity of online shopping and various ways of receiving online orders was conducted, and a basic assessment of the potential opportunities for crowdshipping using the public transport network in Lviv was conducted. Based on the processing of survey data of city residents, the influence of socio-economic characteristics on purchasing behaviour was determined. Food products are usually bought online by 6.1% of respondents, and non-food products by 19%; 25% of food buyers and 30% of non-food buyers order home delivery. Considering the city's population structure, this is 4,780 regular deliveries (once a week or more often). The survey results indicate the respondents' readiness for crowdshipping: 23% answered that they would definitely consider the possibility of crowdshipping delivery, and 48% said that they would more likely consider it than not consider it. 61% are ready to carry out such delivery themselves. In response to changing public demand, many large offline retailers have opened websites where you can order goods with home delivery. The use of crowdshipping by such stores with the involvement of their offline buyers can be expedient from the standpoint of saving money and speeding up delivery. The significant density of Lviv's route network makes it possible to attract public transport users to such an initiative.

Key words: *purchasing behavior, last-mile delivery, urban logistics, crowdshipping.*

Семичасівський С.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Присяжнюк В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Осадчук М.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Якіменко М.Л.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

ЩОДО НЕОБХІДНОСТІ ОБҐРУНТУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ТА ТИПІВ ПЕРВИННИХ ЗАСОБІВ ПОЖЕЖОГАСІННЯ ДЛЯ ОСНАЩЕННЯ КОЛІСНИХ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ

У цій публікації наведено актуальність проведення дослідження щодо визначення можливості застосування різних типів вогнегасників для гасіння пожеж на колісних транспортних засобах та розроблення проекту норм оснащення цих засобів вогнегасниками. Наведено визначення терміну «колісний транспортний засіб». Зазначено, що одним із важливих елементів безпеки зазначених транспортних засобів є їх пожежна безпека. З кожним роком в Україні зростає потреба у автомобільних вантажних та пасажирських перевезеннях у зв'язку з розширенням торговельно-економічних зв'язків як в межах країни, так і за кордоном. Також збільшуються потреби населення в легкових автомобілях вітчизняного чи закордонного виробництва, причому левова частка останніх імпортується у вживаному стані. Це зумовлює, безперечно, збільшення загальної чисельності автомобільного парку, що збільшує кількість пожеж як в абсолютному, так і у відносному значеннях. Сучасний транспортний засіб – це сукупність технічних пристроїв, які є останнім досягненням інженерної думки та виробництва. Разом з тим, в автотранспортних засобах конструктивно поєднано системи і елементи, які у випадку аварійних режимів роботи чи несправностей можуть не лише призвести до дорожньо-транспортної пригоди, але й викликати пожежу. Вказано, що пожежі, які відбуваються на колісних транспортних засобах, відносяться до надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що супроводжуються виходом їх з ладу і досить часто призводять до загибелі або травмування людей та значних матеріальних втрат. Вогнегасники в протипожежному захисті об'єктів, в тому числі колісних транспортних засобів відіграють значну роль, тому що на початковій стадії осередки пожежі можуть бути погашені або локалізовані за їх допомогою. Приділено увагу тому, що однією з основних складових підвищення рівня протипожежного захисту транспортних засобів є наявність науково обґрунтованих норм оснащення їх вогнегасниками. Такі норми повинні враховувати особливості транспортних засобів і сучасний технічний рівень вогнегасників. Представлено рисунки щодо пожеж, які виникають на колісних транспортних засобах, їх наслідків та гасіння вказаних транспортних засобів вогнегасниками.

Представлено інформацію стосовно результатів раніше проведених аналогічних наукових досліджень та виявлено їх недоліки.

Наведено чинні в Україні Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння. Вказано, що об'єктом досліджень є процес гасіння пожеж колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, предметом досліджень є встановлення взаємозв'язку між типом і масою заряду вогнегасників та ефективністю гасіння пожеж колісних транспортних засобів. Визначено основні питання, що підлягають дослідженню в рамках науково-дослідної роботи «Колісні транспортні засоби – норми оснащення».

Ключові слова: вогнегасники, колісні транспортні засоби, норми оснащення, первинні засоби пожежогасіння, пожежі.

Постановка проблеми. Згідно з [1] колісний транспортний засіб – це транспортний засіб, призначений для руху безрейковими дорогами, за

допомогою якого перевозять людей і (або) вантажі, а також перевозять і приводять у дію під час руху чи на місці встановлене на ньому обладнання

чи механізми для виконання спеціальних робочих функцій, допущений до участі в дорожньому русі.

Автомобільний транспорт є складовою частиною єдиної транспортної системи України і покликаний задовольняти потреби населення та суспільного виробництва у перевезеннях пасажирів і вантажів автомобільними транспортними засобами.

Одним із важливих елементів безпеки зазначених транспортних засобів є їх пожежна безпека. З кожним роком в Україні зростає потреба у автомобільних вантажних та пасажирських перевезеннях у зв'язку з розширенням торговельно-економічних зв'язків як в межах країни, так і за кордоном. Також збільшуються потреби населення в легкових автомобілях вітчизняного чи закордонного виробництва, причому лєвова частка останніх імпортується у живаному стані. Це зумовлює, безперечно, збільшення загальної чисельності автомобільного парку, що збільшує кількість пожеж як в абсолютному, так і у відносному значеннях. Сучасний транспортний засіб – це сукупність технічних пристроїв, які є останнім досягненням інженерної думки та виробництва. Разом з тим, в автотранспортних засобах конструктивно поєднано системи і елементи, які у випадку аварійних режимів роботи чи несправностей можуть не лише призвести до дорожньо-транспортної пригоди (ДТП), але й викликати пожежу.

Пожежі, які відбуваються на колісних транспортних засобах, відносяться до надзвичайних ситуацій техногенного характеру, що супроводжуються виходом їх з ладу і досить часто призводять до загибелі або травмування людей та значних матеріальних втрат. Вказані пожежі виникають під час експлуатації колісних транспортних засобів, їх ремонту, внаслідок дорожньо-транспортних пригод і підпалів, на стоянках, під час проведення випробувань нових зразків і моделей транспортних засобів.

Відомо, що пожежна небезпека автомобілів пов'язана з наявністю великої кількості горючих речовин. Найбільшу небезпеку становлять легкозаймисті та горючі рідини, а це – паливо-мастильні, охолоджувальні і гальмівні рідини, які на початковому етапі пожежі підтримують горіння. У карбюраторних та інжекторних двигунах в якості рідкого пального використовують бензин, який являє собою суміш вуглеводнів і спеціальних присадок, які призначені для покращення експлуатаційних характеристик. Вуглеводи, що знаходяться в бензині, википають при температурі від 35°C до 200°C. Бензини використовуються в двигунах з примусовим запаленням готової газо-

повітряної суміші від іскри. Вони є надзвичайно небезпечними з точки зору пожежної небезпеки.

Пожежі на колісних транспортних засобах з роками зростають, разом з тим збільшуються і людські жертви та матеріальні збитки. Це зумовлено ростом автомобільного парку, а також тенденціями застосування нових штучних матеріалів (полістирол, вініпласт, поліпропілен тощо), які використовуються при виробництві, удосконаленні експлуатаційних синтетичних рідин (оливи, охолоджуючі та гальмівні рідини тощо) з низькою температурою займання, розвитком бортових електромереж, що в сукупності збільшує пожежну навантагу, сприяє швидкому розвитку та поширенню полум'я, знижуючи пожежну безпеку автотранспортних засобів. З огляду на це актуальним є підвищення рівня пожежної безпеки автотранспортних засобів.

Вогнегасники в протипожежному захисті об'єктів, в тому числі колісних транспортних засобів відіграють значну роль, тому що на початковій стадії осередки пожежі можуть бути погашені або локалізовані за їх допомогою.

На колісних транспортних засобах переносні вогнегасники повинні розміщуватися у кабіні біля водія в легкодоступному для нього місці і встановлюватися за допомогою кронштейнів. Конструкція кронштейна повинна надійно утримувати вогнегасник, не закривати своїми елементами маркувальні написи на його корпусі, бути зручною для встановлення і оперативного зняття вогнегасника.

Забороняється зберігання вогнегасника в багажнику легкового автомобіля, кузові вантажного автомобіля та інших місцях, доступ до яких обмежений.

На рисунку 1 показано наслідки пожеж на колісних транспортних засобах та їх наслідки. На рисунку 2 наведено гасіння пожеж на колісних транспортних засобах за допомогою вогнегасників.

Серед транспортних засобів найчастіше горять пасажирські транспортні засоби, а саме легкові автомобілі, автобуси та тролейбуси. Особливу увагу з точки зору пожежної небезпеки слід приділити автобусам. Близько одного відсотка усіх автобусів щороку зазнають пожеж.

Пожежі автобусів можуть спричинити значну кількість смертей через велике число пасажирів, які перевозяться. Історія показує приклади трагічних подій за участю цього виду транспорту, деякі з них наведено у таблиці 1.

Пожежі автобусів залишаються серйозною загрозою для людей серед пожеж транспортних



Рис. 1. Пожежі на колісних транспортних засобах та їх наслідки



Рис. 2. Гасіння пожеж на колісних транспортних засобах за допомогою вогнегасників

засобів. Незважаючи на розвиток електронних систем, які контролюють стан різноманітних вузлів та агрегатів автобусів, це не запобігає виникненню пожеж цього роду.

Аналіз пожеж у автобусах показав, де найчастіше виникають осередки горіння. Близько

60% автобусних пожеж виникає в моторному відсіку і можуть бути відвернуті шляхом ретельного і систематичного технічного обслуговування. Наглядно помітно, що у автобусів пожежі від коліс чи шин беруть свій початок значно частіше у порівнянні з іншими транспортними засобами.

Однією з основних складових підвищення рівня протипожежного захисту транспортних засобів є наявність науково обґрунтованих норм оснащення їх вогнегасниками. Такі норми повинні враховувати особливості транспортних засобів і сучасний технічний рівень вогнегасників.

Існуючі Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, які були прийняті Постановою Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 1997 року № 1128 «Про забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння» певною мірою застаріли та не відповідають потребам сьогодення.

Навіть у редакції Норм оснащення від 3 вересня 2009 року № 93 вказана мінімальна кількість, тип

та позначення тільки порошкових вогнегасників, в той час як останнім часом в Україні і провідних країнах світу з'явилися нові типи вогнегасних речовин, а також колісних транспортних засобів, зокрема і з електричним двигуном.

Тому для вирішення актуального питання щодо можливості застосування різних типів вогнегасників на сучасних колісних транспортних засобах є необхідність постановки науково-дослідної роботи в результаті якої будуть розроблені науково обгрунтовані пропозиції щодо можливості застосування різних типів вогнегасників для гасіння пожеж на колісних транспортних засобах та проект норм оснащення цих засобів вогнегасниками.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми. У звіті [2] наведено результати науково-дослідної роботи з розроблення проекту норм оснащення колісних транспортних засобів переносними вогнегасниками. В ході науково-дослідної роботи [2] здійснено аналіз вимог вітчизняної та зарубіжної нормативної бази, що регламентує норми оснащення транспортних засобів вогнегасниками. Проведено аналітичні дослідження щодо визначення причин та місць виникнення пожеж на транспортних засобах. Прийнято критерії вибору вогнегасника у залежності від особливостей транспортного засобу, який ним захищається. Результатом роботи [2] є розроблення проекту постанови Кабінету Міністрів України «Про затвердження Норм оснащення колісних транспортних засобів переносними вогнегасниками» та проект Норм оснащення колісних транспортних засобів переносними вогнегасниками, в основу якого покладено ідеї щодо забезпечення обгрунтованого вибору вогнегасників та визначення їх мінімальної кількості для оснащення транспортних засобів.

В монографії [3] досліджено пожежі колісних транспортних засобів і процеси виникнення джерел займання внаслідок нагрівання бортових

електромереж іскровими розрядами та струмами короткого замикання. В роботі [3] проведено моделювання нестаціонарних електротеплових процесів бортових електромереж колісних транспортних засобів, проведено експериментальне дослідження з визначення показників пожежної небезпеки ізоляційних матеріалів бортових електромереж колісних транспортних засобів, проведено розробку технічних рішень та рекомендацій для запобігання виникненню пожеж на колісних транспортних засобах.

Треба відмітити, що у роботах [2], [3] не проведено обгрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння, необхідних для оснащення ними колісних транспортних засобів. Крім того, робота [2] містить результати лише аналітичних досліджень і не враховує проведення експериментальних досліджень щодо ефективного гасіння різними типами вогнегасників модельних вогнищ пожеж різних класів.

Мета та завдання дослідження. Для сприяння у вирішенні зазначеної проблеми з метою удосконалення нормативної бази щодо оснащення первинними засобами пожежогасіння колісних транспортних засобів в Інституті державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту за замовленням ДСНС України виконується науково-дослідна робота за темою: «Обгрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів» («Колісні транспортні засоби – норми оснащення»).

Для досягнення поставленої мети в цій публікації необхідно визначити основні питання, що підлягатимуть дослідженню в рамках науково-дослідної роботи «Колісні транспортні засоби – норми оснащення».

Аналіз основних питань, що підлягають дослідженню в рамках науково-дослідної роботи «Колісні транспортні засоби – норми оснащення»

Таблиця 1

Приклади пожежі автобусів, що призвели до людських жертв

Рік	Подія
2006	Автобус зайнявся у центрі міста Панама, загинуло 18 людей
2007	Автобус, що рухався від Дакки до Читтагонгу, потрапив у ДТП і загорівся поблизу міста Камілли, (Бангладеш), загинуло 55 чоловік
2008	В Ірані зіткнувся автобус з 22 студентами. Обидва автомобілі загорілися відразу після аварії. Загинуло 22 осіб
2008	У Ганновері (Німеччина) згорів автобус, що стало причиною 20 смертей.
2009	Автобус, що прямував до міста Чендзу (Китай), неочікувано зайнявся. У вогні загинуло 29 людей
2018	У Актюбінській області на заході Казахстану, на 1 068 кілометрі траси Самара-Шимкент під час руху зайнявся автобус міжміського сполучення. У салоні перебувало 57 осіб, тільки 5 вдалося покинути палаючий транспортний засіб, решта загинули на місці

У таблиці 2 наведено чинні в Україні Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, які були прийняті Постановою Кабінету Міністрів України від 8 жовтня 1997 року № 1128 «Про забезпечення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння. Ці норми, як було сказано вище є застарілими та не відповідають сучасності.

За результатами виконання науково-дослідної роботи «Колісні транспортні засоби – норми оснащення» буде розроблено проєкт оновлених норм оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння, положення якого ґрунтуватимуться на результатах аналітичних та експериментальних досліджень, враховуючи вимоги [4], [5].

Об'єктом досліджень є процес гасіння пожеж колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння.

Предметом досліджень є встановлення взаємозв'язку між типом і масою заряду вогнегасників та ефективністю гасіння пожеж колісних транспортних засобів.

Враховуючи вищенаведене, для досягнення мети науково-дослідної роботи «Колісні транспортні засоби – норми оснащення» дослідженню підлягатимуть такі питання, а саме:

- аналіз стану нормативної бази в Україні та у провідних країнах світу, що регламентує норми оснащення колісних транспортних засобів вогнегасниками;
- аналіз причин та місць виникнення пожеж на колісних транспортних засобах;

Таблиця 2

Чинні в Україні Норми оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння

Назва колісного транспортного засобу	Мінімальна кількість, тип та позначення вогнегасника
Легковий автомобіль загального, спеціалізованого та спеціального призначення	один порошковий (закачного типу ВП-2 (з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-2) із зарядом вогнегасної речовини на менше 2 кг
Вантажний автомобіль загального, спеціалізованого та спеціального призначення з повною масою:	
не більше 3,5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг
від 3,5 т, але не більше 12 т	один порошковий (закачного типу ВП-5 (з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг
понад 12 т	один порошковий (закачного типу ВП-9(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг
Причіп, напівпричіп з повною масою:	
від 0,75 т, але не більше 3,5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг
від 3,5 т, але не більше 10 т	один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг
понад 10 т	один порошковий (закачного типу ВП-9(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг
Автобус (пасажирський автомобіль), що має більше ніж 9 місць для сидіння з місцем водія включно, з повною масою:	
не більше 5 т	один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг
понад 5 т	один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг".

- проведення експериментальних досліджень щодо ефективного гасіння різними типами вогнегасників модельних вогнищ пожеж різних класів;
- встановлення взаємозв'язку між рангом вогнегасників та параметрами пожежної навантаги колісних транспортних засобів;
- розроблення науково обґрунтованих пропозицій щодо застосування різних типів вогнегасників на колісних транспортних засобах та відповідних норм оснащення ними.
- розроблення проекту норм оснащення колісних транспортних засобів первинними засобами пожежогасіння.

В ході виконання науково-дослідної роботи буде також вивчено літературні джерела [6-15].

Висновки

1. Визначено основні питання, які підлягатимуть дослідженню в рамках науково-дослідної роботи стосовно необхідності обґрунтування параметрів та типів первинних засобів пожежогасіння для оснащення колісних транспортних засобів.
2. Впровадження результатів науково-дослідної роботи сприятиме запобіганню загибелі та травмуванню пасажирів, що перевозяться колісними транспортними засобами, а також мінімізації матеріальних збитків від можливих загорянь.

Список літератури:

1. ДСТУ 3649:2010. Колісні транспортні засоби. Вимоги щодо безпечності технічного стану та методи контролювання. Введ. 2011-07-01. К.: Держспоживстандарт України, 2011. 28 с.
2. Провести дослідження та розробити проект норм оснащення дорожніх транспортних засобів переносними вогнегасниками: звіт про НДР УкрНДПБ; кер. Міщенко С.М. Київ, 2007. 113 с.
3. Пожежна небезпека колісних транспортних засобів [Текст]: [монографія] / Гаврилюк А.Ф.; ЛДУ БЖД. Львів: 2018 182 с. :іл., табл.. Бібліогр.: с. 182 (102).
4. ДСТУ 3675-98. Пожежна техніка. Вогнегасники переносні. Загальні технічні вимоги та методи випробувань. Зі зміною № 1. Введ. 1999-01-01. К.: Держспоживстандарт України, 1999. 66 с.
5. ДСТУ EN 3-7:2014. Вогнегасники переносні. Частина 7. Характеристики, вимоги до робочих параметрів і методи випробувань (EN 3-7:2004+A1:2007, IDT). Введ. 2016-01-01. К.: ДП «УкрНДНЦ», 2016. 53 с.
6. Meltzer N., Ayres G. & T Minh, "Motorcoach fire safety analysis", FMCSA report, July 2009.
7. Markus Egelhaaf and F. Alexander Berg "Motor Coach Fires Analysis and Suggestions for Safety Enhancement. DEKRA Automobil GmbH Germany, Paper Number 05-0094.
8. Lehtola K., "Bus fires in Finland during 2000", incident report D1 2000/y, (shortened version translation), Accident Investigation board, Finland 2001.
9. Steve Vidal, Charles Dagsis, Scott Weinstein, Tom Mckie, Barry Kluger, Ron Epstein and John Fabian "Bus Fire Analysis-PTSB Investigations 2002 thru 2006".
10. Ahrens, M. "U.S. Vehicle Fire Trends and Patterns", National Fire Protection Association report, 2008.
11. Seweri derwyn/ Automotive collesion fires.-Pros. Stapp. Ca./Grash Conf., Ann Arber., 1974. Warrendale. Pa. 1974. P. 113–1999.
12. Kim, H.K., Lönnermark, A and Ingason, H., "Effective Firefighting perations in Road Tunnels", SP Report 2010:10, ISBN 978-91-86319-46-5 (2010).
13. National Transportation Safety Board, "Motorcoach fire on Interstate 45 during Hurricane Rita evacuation near Wilmer, Texas, September 23, 2005", NTSB/HAR-07/01, NTSB, Washington, DC, February 21, 2007.
14. FIRE-RESIST Developing Novel Fire-Resistant High Performance Composites, FP7 Grant no 246037, <http://www.fire-resist.eu/FireResist/index.xhtml>.
15. Rosén, F., "Improving the Fire Safety of Buses and Motorcoaches", HSToday.com, <http://www.hstoday.us/blogs/best-practices/blog/improving-the-fire-safety-of-buses-andmotorcoaches/fa9ad8e289ee9c098b3e946e551deb9e.html>.

Semychayevsky S.V., Prisyajnyuk V.V., Osadchuk M.V., Yakimenko M.L.

CONCERNING THE NEED TO JUSTIFY PARAMETERS AND TYPES OF PRIMARY FIRE EXTINGUISHING EQUIPMENT WHEELED VEHICLES

This publication shows the relevance of conducting a study on determining the possibility of using different types of fire extinguishers for extinguishing fires on wheeled vehicles and developing the project of norms for equipping these vehicles with fire extinguishers. The definition of the term "wheeled vehicle" is given. It is noted that one of the important elements of the safety of these vehicles is their fire safety. Every year in Ukraine, the need for automobile cargo and passenger transportation grows due to the expansion of trade and economic ties both within the country and abroad. The population's needs for passenger cars of domestic or foreign production are also increasing, and the lion's share of the latter is imported in used condition. This causes, without a doubt, an increase in the total number of the car fleet, which increases the number of fires both in

absolute and relative terms. A modern vehicle is a set of technical devices that are the latest achievements of engineering thought and production. At the same time, motor vehicles have constructively combined systems and elements that, in the case of emergency modes of operation or malfunctions, can not only lead to a traffic accident, but also cause a fire. It is indicated that fires that occur on wheeled vehicles belong to man-made emergencies, which are accompanied by their failure and quite often lead to the death or injury of people and significant material losses. Fire extinguishers play a significant role in the fire protection of objects, including wheeled vehicles, because at the initial stage, fire sources can be extinguished or localized with their help. Attention is paid to the fact that one of the main components of increasing the level of fire protection of vehicles is the availability of scientifically based standards for equipping them with fire extinguishers. Such norms should take into account the peculiarities of vehicles and the modern technical level of fire extinguishers. Drawings are presented regarding fires that occur on wheeled vehicles, their consequences, and extinguishing the specified vehicles with fire extinguishers.

Information on the results of previously conducted similar scientific studies is presented and their shortcomings are revealed.

The current norms in Ukraine for equipping wheeled vehicles with primary fire extinguishing means are given. It is indicated that the object of research is the process of extinguishing fires of wheeled vehicles with primary means of extinguishing fire, the subject of research is establishing the relationship between the type and mass of the charge of fire extinguishers and the effectiveness of extinguishing fires of wheeled vehicles. The main issues to be investigated as part of the research work "Wheeled vehicles - equipment standards" have been determined.

Key words: *equipment standards, fires, fire extinguishers, primary means of fire extinguishing, wheeled vehicles.*

УДК 656.614.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/45>**Сільванська Г.Н.**

Одеський національний морський університет

Карп Г.В.

Одеський національний морський університет

МЕТОДИКА ОРГАНІЗАЦІЇ РЕГУЛЯРНОГО КРУЇЗНОГО МАРШРУТУ

Ринок круїзного туризму стрімко розвивається. Морський туризм, як його складник, розглядається як явище постіндустріального суспільства, є одним із секторів світової економіки, що й обіцяє величезні потенційні вигоди для регіонів з необхідними туристичними ресурсами.

У 2021 р. світовий круїзний ринок приніс близько 6,65 млрд доларів прибутку. Загальна світова індустрія морських круїзів у 2021 р. оцінюється в 23,8 млрд дол. (що означає збільшення на 81,8% порівняно з 2020 р. та зниження на 52,9% порівняно з 2019 р.). Здійснили круїзи 13,9 млн пасажирів, це збільшення на 96,2% порівняно з 2020 р. та зниження на -49,4% порівняно з 2019 р.

У цій публікації зроблено аналіз сучасного стану морського туристичного ринку на міжнародному рівні і виявлено його центральну проблему – конкурентоспроможність портів. Розглянуто кластерний підхід як інструмент формування споживчого сегменту круїзного бізнесу, що дозволяє виявити основні фактори впливу на ефективний вибір портів. Досліджено поняття «морський кластер» як фундамент проектування морського туристичного маршруту. Однак сектор морського туризму залишається одним з найменш досліджених у світовій економіці, тому вивчення можливостей та досвіду впровадження його структури є перспективним. На жаль, поняття «туристичний кластер» в Україні сьогодні не визначене на законодавчому рівні, немає і загальноприйнятого визначення цього терміна. Тому формалізація цього поняття є актуальною та потребує єдиного підходу. Стаття покликана продемонструвати важливість проектування круїзної лінії, використовуючи метод кластерного аналізу. Результати дослідження використовуються морськими операторами як стратегія визначення цінової політики компанії.

Ключові слова: морський туризм, круїзна лінія, порт *turn-round/call*, морський кластер, кластерний аналіз, конкурентоспроможність, метод Варда.

Постановка проблеми. Загальний світовий обсяг індустрії океанських круїзів оцінюється в 23,8 мільярда доларів США в 2021 році (збільшення на 81,8% порівняно з 2020 роком і зменшення на 52,9% порівняно з 2019 роком) з 13,9 мільйонами пасажирів щорічно (збільшення на 96,2% порівняно з 2020 роком і зменшення на -49,4% порівняно з 2019 роком). У всьому світі круїзи на ринку подорожей і туризму принесуть близько 6,65 мільярда доларів доходу в 2021 році. Carnival Cruise Corporation мала найбільшу частку ринку серед круїзних компаній – 45 відсотків. На другому та третьому місцях – Royal Caribbean Cruises LTD та Norwegian Cruise Line з часткою ринку 25% та 15% відповідно (рис. 1). Круїзи є частиною світової туристичної індустрії та діють у різних регіонах Земної кулі, від Середземного моря до Тихого океану. Останніми роками дохід світової круїзної індустрії зріс до понад 27 мільярдів доларів, хоча обмеження на подорожі, спричинені

пандемією коронавірусу (COVID-19), сильно вдарили по цьому сектору у 2020 р. [1; 2; 4].

Розвиток туризму робить сильний стимулюючий вплив і на розвиток суміжних секторів економіки. Причому мультиплікативний ефект туризму проявляється значно більше початкового впливу туристських витрат на економіку регіону. Разом із тим успішний розвиток індустрії туризму безпосередньо залежить від виробітку регіональної політики у сфері туризму, зважених стратегічних планів і вивірених за термінами ресурсів цільових програм розвитку туризму [3; 4].

Ключові фактори, що сприяють росту світової круїзної індустрії:

- глобалізація;
- формування нової маршрутної мережі морських круїзів;
- будівництво лайнерів великого тоннажу і пасажиромісткості з максимально широким асортиментом послуг на борту;

- будівництво суден менших розмірів, але підвищеної комфортності;
- будівництво спеціальних круїзних суден (експедиційні, вітрильні та інші);
- вдосконалення нових інформаційних технологій і їх можливостей у відкритому морі;
- активізація круїзних ліній;
- нові інноваційні способи комунікацій і нові інформаційні технології;
- широкий вибір активних розважальних програм на борту;

– нові екзотичні туристичні напрями, збільшення частки пасажирів першого року, які здійснюють круїз уперше. Частка круїзних компаній на світовому ринку 2021–2022 рр. (рис. 1) [7; 8; 9].

Загальний вклад подорожей і туризму у світовий валовий внутрішній продукт (ВВП) виріс на 21,7% у 2021 р. порівняно з попереднім роком після різкого падіння в 2020 р. через пандемію коронавірусу (COVID-19) (рис. 2) [4; 6].

Загалом вклад круїзних подорожей і туризму у світовій ВВП у 2021 р. становив 9,81 трильйона доларів США [3], що означає збільшення приблизно на один трильйон доларів США порівняно з 2020 р., але залишаються нижчі показники до пандемії (рис. 3) [7; 8]. У морський туристичній галузі чітко простежується таке явище економіки, як «кластеризація» [12]. Туристичні кластери формуються на базі туристичних активів у регіоні і складаються з підприємств різних секторів, пов'язаних з обслуговуванням туристів, наприклад, туристичних операторів, готелів, секторів громадського харчування, виробників сувенірної продукції, транспортних підприємств та інших. Морський кластер є вирішальним елементом туристичних систем [11; 12; 13].

Його можна охарактеризувати як центр (територію) зі всілякими зручностями, засобами обслуговування і послугами для забезпечення всіляких потреб туристів. Інакше кажучи, туристична дестинація, яка є частиною кластеру, включає у себе найбільш важливі і вирішальні елементи, які необхідні туризму. Регіон, до складу якого вона належить, є одним з найважливіших факторів туристичної системи, позаяк самі туристичні дестинації приваблюють туристів, мотивують їх візит, тобто активізують усю туристичну систему [8; 9; 10]. Вперше поняття «морський кластер» було використано в одній з найпоширеніших моделей системи туризму – моделі відомого вченого Н. Лейпера, яка адаптована нами до сучасних умов [7; 11]. Модель передбачає 5 ключових взаємопов'язаних елементів (рис. 4):

- туристи;
- індустрія туризму (забезпечення туристичних потоків);
- географія туризму (як мінімум один регіон генерації туристів. Це регіон, в якому проживає турист і де починається та закінчується його подорож);
- транзитний регіон (територія, через яку турист повинен проїхати, щоб дістатися до місця призначення);
- як мінімум одна туристична дестинація (територія, яку вибирає турист для поїздки);

Отже, розвиток і підтримка ефективних транспортних зв'язків з туристичними ринками – необхідна умова для ефективності успіху дестинації.

Метою цієї публікації є обґрунтування необхідності створення методологічного підходу до побудови ефективного круїзного маршруту на базі морського кластеру (порту). Досягнення кон-

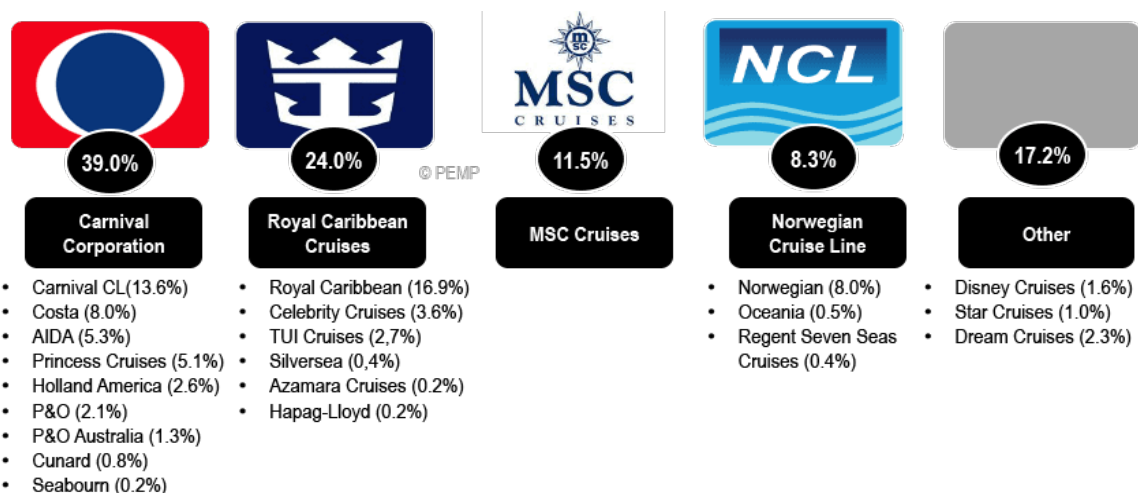


Рис. 1. Частка провідних компаній на ринку 2021 р. [1; 2]

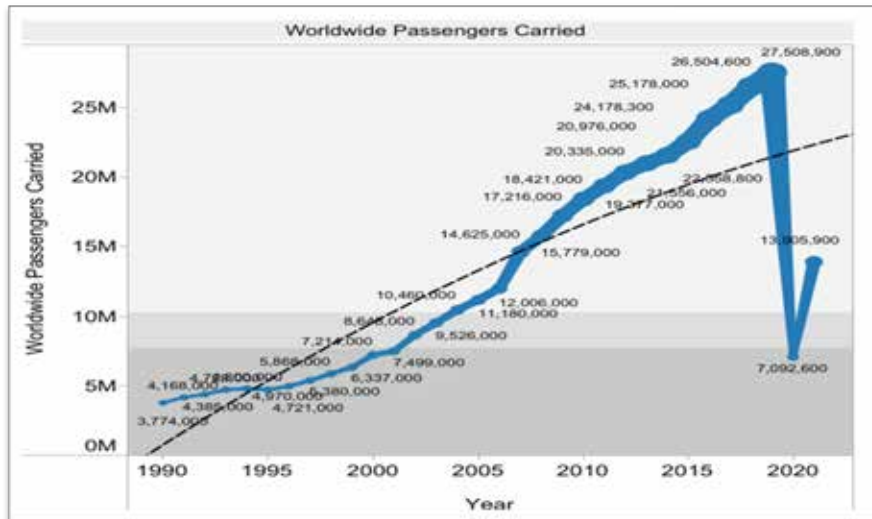


Рис. 2. Кількість перевезених пасажирів [2]

Total contribution of travel and tourism to GDP worldwide 2006-2021 (in billion U.S. dollars)

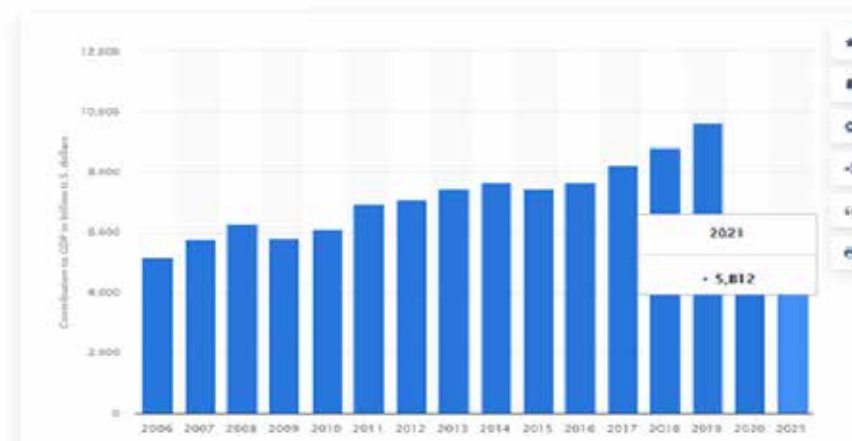


Рис. 3. Загальний внесок туризму у світовий ВВП 2006/2021 рр. [3]



Рис. 4. Ключові взаємопов'язані елементи [10; 11]

курентних переваг в умовах глобалізації економіки є ключовим чинником створення довгострокової стратегії розвитку. Одним із найсучасніших інструментів розв'язання цієї проблеми має бути формування морських кластерів (рис. 5). Наведено взаємопов'язані фактори впливу на рішення

крузної компанії у разі проектування маршруту крузного судна у вибраному регіоні.

Одним з ключових елементів дослідження є проектування оптимального маршруту (ротація портів методом ієрархічної агломерації) – побудова схеми переходів з базового порту до «call»

портів. Визначення факторів, які впливають на вибір круїзних портів [7; 9; 13].



Рис. 5. Фактори впливу на розгортання круїзу [16]

Попит у круїзному бізнесі створюється за рахунок ціноутворення, брендингу та маркетингу. Перед круїзними операторами стоїть завдання розробити конкурентоспроможні круїзні пакети, які містять високоякісне перебування на борту, безліч заходів на березі, що пропонують доступ до різноманітних культур і пам'яток, а також легкий трансфер із судна. Більшість круїзних компаній мають офіс логістики, що відповідає за постачання суден, зокрема за харчування, що є однією з основних зручностей. Відмінності у перевагах спостерігаються залежно від маршруту та складу пасажирів, включаючи такі фактори, як походження та вік.

Формування цілей статті. У цьому дослідженні вивчається і описується, як за допомогою наданої нами методики круїзні порти групуються у кластери [10] та на їх основі проектується економічно ефективний круїзний маршрут.

Щоб охарактеризувати круїзні порти і роль, яку вони грають у регіональних ринках оперування, нами були використані такі фактори:

1. Регіональний ринок оперування. Круїзні порти є частиною регіону оперування. Порт має специфічне звернення і є зазвичай місцем (маршрутом) призначення. Регіон має специфічний шаблон вимог, які висуваються до нього. До нього належить, наприклад, рівень, зростання, сезонність. Карибський басейн і Середземне море є основними круїзними регіонами, але вони можуть бути поділені на підсекції, як правило, включають 7-денні стандартні маршрути (наприклад, Східно-Карибський або Східне Середземномор'я).

2. Розмір. Є фундаментальною властивістю, позаяк він показує рівень активності і важливість круїзного порту в круїзній індустрії. Тільки

декілька круїзних портів (близько 12) мають річне відвідування більше 1 млн візитів (число de-embarkations). Цей параметр пов'язаний з числом заходів круїзних суден, засобами, необхідними для їх розміщення, а також впливом круїзів на місцеву економіку.

3. Сезонність. Важливий відмінний фактор, позаяк багато круїзних портів активні тільки протягом певного періоду року, своєю чергою, тоді як інші – цілий рік. Висока сезонність передбачає, що всі круїзні візити відбуваються протягом декількох місяців.

4. Клас порту. Має на увазі чи є круїзний порт базовим портом (turn port) або портом заходу (call port). Базовий порт – це круїзний порт, де маршрут круїзу починається (і закінчується) і де пасажирів можуть вперше піднятися на круїзне судно. У портах заходу пасажирів можуть тимчасово зійти для берегових екскурсій або будь-яких інших туристичних видів діяльності. Базовий порт вимагає набагато більшої підтримки інфраструктури та послуг, ніж порт заходу. Крім того, круїзні судна повинні бути забезпечені продуктами харчування, паливом та іншими запасами, одержуваними, як правило, в портах заходу. Для заправки паливом круїзна лінія зазвичай вибирає місця зі зручним місцем розташування та привабливими цінами.

5. Доступність. Залежить від того, як основні клієнти досягають базового порту. Вузлові аеропорти, пов'язані з великими міжнародними аеропортами, пропонують підключення широкого спектра ринків. Наприклад, Майамі / Форт-Лодердейл пов'язаний з великою кількістю аеропортів Північної та Латинської Америки, також легко дістатися Рима або Барселони від багатьох європейських міст. З іншого боку, існують альтернативні засоби – поїзди, щоб дістатися круїзних портів у межах від 2 до 4 годин. Подібні порти: Саутгемптон, Галвестон, Новий Орлеан, Балтімор, Генуя та Марсель, де існують залізничні під'їзди до портів.

6. Привабливість. Туристична привабливість порту призначення відіграє важливу роль, оскільки круїзи є предметом туристичного оперування. Поняття «порт має бути побачений» відіграє ключову роль у залученні клієнтів для круїзу. Певне місце візиту (порт) часто є основною причиною вибору круїзу пасажирів. «Порт відвідування» – це порт, який менш відомий, але пропонує послуги, які точно зацікавлять пасажирів.

7. Круїзні термінали. Технічна споруда, доступна для причалювання круїзного судна. Передбачає або побудову спеціальних терміналів,



Рис. 6. Морський кластер [8; 9; 10; 13]

адаптованих виключно під обслуговування круїзних суден, або здійснення посадки та висадки пасажирів за допомогою допоміжного судна.

8. Власність і операції. Деякі круїзні порти перебувають у приватній власності (портової влади), а інші перебувають у державній власності, в основному за рахунок портових властей.

9. Місцева і регіональна інтеграція. Запропоновані критерії визначають рівень інтеграції круїзного порту – це його розташування і регіон.

Для порту призначення круїзу область круїзного порту є єдиним визначальним фактором вибору.

Наведено на рис. 6 модель морського туристичного кластеру, на базі якого

проектується круїзна лінія. Застосування цього методу в аналізі соціологічних даних стає все популярнішим, оскільки, по-перше, класифікація взагалі є фундаментальним науковим принципом, а по-друге, з розвитком і поширенням обчислювальних машин та відповідного програмного забезпечення виконання громіздких і важких у виконанні математичних розрахунків істотно полегшується.

Формулювання цілей статті. Метою дослідження є побудова конкурентоспроможного круїзного маршруту за допомогою кластерного підходу.

Регіон Чорного моря на поточний момент витягує значно менше потенційно можливого на

тлі бізнесу морських подорожей, що переживає стрімке зростання у Середземномор'ї. Абсолютно необхідно вжити значних зусиль для просування регіону як бажаної мети для круїзного туризму подібно до того, як це робиться на Балтиці. При цьому, на жаль, доводиться враховувати вартість проходу через турецькі протоки, яка може стати перешкодою для майбутнього зростання, оскільки ставить порти Чорного моря в невідгідне порівняно із середземноморськими положення. Під час останньої міжнародної конференції Cruise Shipping Miami-2012 в Маямі (США) Чорноморський регіон опинився в числі найбільш обговорюваних з точки зору перспектив круїзного бізнесу. Вперше спільно з усіма круїзними чорноморськими портами ми виступали єдиним брендом – Cruise Black Sea, що має підкреслити відсутність конкуренції між нами в питаннях круїзів. У цьому напрямку порти цього бренду – швидше союзники, адже рекламуючи Одесу, ми рекламуємо одночасно Чорне море як круїзний регіон. Тому й об'єдналися з тими портами, які ведуть активну роботу із залучення круїзних суден у чорноморський регіон – Сочі, Стамбул, Батумі, Бургас, та іншими. Таким чином, створення кластеру є першим кроком у розширенні сфери туризму в регіоні, тому що саме шляхом формування мережевих інноваційних структур на основі кластерного підходу можна досягти динамічного розвитку регіону. Але добре було б для початку

об'єднати зусилля всієї України для створення іміджу країни як привабливого туристичного напрямку [12; 14; 15].

Методологія досліджування. Методологія базується на кластерному аналізі, який використовується як метод аналізу масиву ідентифікаційних характеристик порту, виявляючи головні та об'єднуючі чинники і відмінності [16].

Популярність кластерного підходу в різних сферах національної та регіональної економіки пояснюється все наростаючими процесами глобалізації та інтернаціоналізації [10]. Застосування кластерного підходу в індустрії туризму отримало свій розвиток відносно недавно. Однак ще М. Портер [9] у 1998 році підкреслював важливість розвитку туристичних кластерів, аргументуючи це тим, що задоволеність кінцевого споживача визначається не тільки привабливістю місця призначення, але і якістю послуг, що надаються, і туристичної інфраструктури. Також Д. Джексон і П. Мерфі [10] підкреслюють необхідність застосування кластерного підходу в туристичній індустрії у зв'язку з можливостями, які відкриваються розвитку місцевих ринків, посилення взаємодії між підприємницькими структурами регіону, укрупнення бізнесу [14; 15; 17].

За всіх можливих відмінностей, які можуть з'явитися через різницю проблематики і специфіки параметрів конкретного дослідження, для проведення кластерного аналізу зазвичай необхідні такі етапи:

- 1) відбір вибірки об'єктів для кластеризації;
- 2) вибір ознак (змінних) для кластеризації;
- 3) обчислення міри подібності між об'єктами за вибраними ознаками;
- 4) застосування кластерного аналізу для створення подібних груп об'єктів;
- 5) перевірка достовірності отриманої кластерної моделі. Ця послідовність не залежить від застосовуваних алгоритмів кластеризації.

Для обґрунтування вибору кластеру портів будемо користуватися математичними методами формування кластерних множин, ми використали ієрархічний агломератний метод, що є вихідним моментом побудови кластеру портів, який послідовно об'єднує окремі об'єкти в групи (кластери) – побудови дендрограми. Всі об'єкти є окремими кластерами, на першому кроці найбільш схожі об'єкти об'єднуються в кластер. На наступних кроках об'єднання продовжується до тих пір, поки всі об'єкти не будуть становити один кластер. Під дендрограмою – дерево, тобто граф без циклів, побудований по матриці близькості. Ден-

дрограма дозволяє зобразити взаємні зв'язки між об'єктами із заданої множини.

Проводиться кодування класифікаційних ознак портів Чорноморського регіону, що представлені в табл. 1. Усі учасники кластеру портів у разі входження до нього повинні мати однакові умови та рівні конкурентоспроможності для функціонування на засаді чесної та рівної конкуренції. Для побудови вибрано такі порти: Одеса → Констанца → Варна → Багумі → Одеса (табл. 2). На рис. 10 наведена поетапна методика побудови конкурентоспроможного маршруту.

Метод аналізу. Для проведення статистичного аналізу використовувалася програма SPSS (Statistics Powerful Statistical Software platform) версії 19 [15].

Розробка системи оцінки якісних показників методом ієрархічної агломерації за допомогою програми. Класифікація факторів впливу на вибір круїзного порту наведена у таблиці 1. Класифікація і розбиття об'єктів на однорідні групи є важливою процедурою у соціологічних дослідженнях. Виділити в досліджуваному масиві найбільш схожі між собою об'єкти й об'єднати їх у групи (кластери) дозволяє кластерний аналіз. Застосування цього методу в аналізі соціологічних даних стає все популярнішим, позаяк, по-перше, класифікація взагалі є фундаментальним науковим принципом, а по-друге, з розвитком і поширенням обчислювальних машин та відповідного програмного забезпечення виконання громіздких і важких у виконанні математичних розрахунків істотно полегшується. Суть кластерного методу полягає в тому, що об'єкти групуються в кластери виходячи з обчислених математично відстаней між ними. Спостереження, які мають між собою найменші відстані за певним набором ознак, потрапляють в один кластер.

Результати. Аналіз ретроспективної ситуації на ринку дає можливість змоделювати «стартову» позицію круїзного порту, що оперує на круїзному ринку Чорноморського регіону; проаналізувати фактори впливу на вибір круїзного порту в умовах підвищення їх ділової активності протягом аналізованого періоду часу

У табл. 1 представлені фактори, які впливають на включення портів до круїзного маршруту. Далі проходить кодування та наповнення Баз даних SPSS для подальшої кластеризації. На рис. 9 представлена методика вибору портів для включення до круїзу.

Висновки. У результаті аналізу виявлено, що сучасний круїзний ринок формують шість тенденцій:

Класифікація факторів впливу на вибір круїзного порту

Фактор	Елементи
Місцевий чи регіональний порт	1. Порт призначення; 2. Транспортний круїзний порт (ворота); 3. Збалансований круїзний порт
Власність	1. Приватної власності; 2. Державної власності (портової влади)
Клас порту	1. Базовий порт; 2. Порт заходу
Регіон	1. Західне Середземномор'я; 2. Східне Середземномор'я; 3. Чорноморсько-Азовський басейн; 4. Адріатика.
Розмір	1. Величезний (більше 1 млн пасажирів); 2. Дуже великий (від 500 тис. до 1 млн пасажирів) 3. Великий (від 250 тис. до 500 тис. пасажирів) 4. Середній (від 100 тис. до 250 тис. пасажирів) 5. Маленький (менш ніж 100 тис. пасажирів)
Сезонність	1. Низька (4 пікові місяці менш ніж 40% візитів) 2. Середня (4 пікові місяці від 40% до 60% візитів) 3. Висока (4 пікові місяці від 60% до 80% візитів) 4. Дуже висока (4 пікові місяці більш ніж 80% візитів)
Доступність	1. Вузлові аеропорти; 2. Авто- і ж/д транспорт до порту 3. Аеропорти і авто- і ж/д транспорт до порту
Операції в порту	1. Оформлення посадки / висадки пасажирів 2. Швартовні операції 3. Буксирні операції 4. Послуга персонального трансферу з круїзного порту в готель 5. Паркінги біля круїзного порту 6. Послуги з трансферу та зберігання багажу в круїзному порту 7. Зручності для інвалідів у порту 8. Екскурсії на острови
Операції в порту	9. Водне таксі в літній період 10. Безкоштовні автобуси по порту 11. Корабельні екскурсії 12. Туристичний автобус з міжнародним аудіогідом 13. Торгові зони на території порту 14. Прокат автомобілів 15. Яхтинг 16. Автобусні екскурсії 17. Безкоштовний шатл-бас до центрального входу в порт 18. Трансфер з морського порту в аеропорт 19. Швартовка лайнерів біля пірсу в центрі міста 20. Доставка пасажирів до берегів тендерними катерами 21. Причали для катерів і кораблів місцевих ліній 22. Стоянки таксі і туристичних автобусів 23. Екскурсії на катерах
Круїзний термінал	1. Спеціальний термінал; 2. Спеціальний причал; 3. Обслуговування за допомогою допоміжних суден
Привабливість	1. «Порт повинен бути побачений»; 2. «Порт відвідування»

– розширення та захоплення потоків доходів круїзних ліній за рахунок регулярного оновлення флоту та пропозиції розширених зручностей на борту, а також екскурсій на березі (шорекс). Круїзний лай-

нер став невід'ємною частиною круїзної подорожі, оскільки сам по собі є пунктом призначення;

– висококласний розмір круїзного лайнера. Принцип економії за рахунок масштабу та роз-

Дані, підготовлені до кластеризації

Порти	Місцевий або регіональний порт	Власність	Клас порту	Регіон	Розмір	Сезонність	Операції в порту	Доступність	Круїзний термінал	Привабливість	Пасажирообіг
Одеса	3	2	1	3	4	2	1 2 4 5 7 12 13 14 15 17 19 22 23 24	2	1	1	200000
Констанца	2	2	2	3	1	3	4 1 2 5 6 7 9 12 14 15 17 19 22 23 24	3	1	1	3375000
Варна	3	2	2	3	1	3	4 1 2 5 6 7 9 12 14 15 16 17 18 19 20 22 23 24	3	2	1	3252000
Хайдарпаша	3	2	2	3	3	3	4 1 2 3 5 6 7 9 12 13 15 16 17 18 19 20 22 23 24	2	2	1	440000
Батумі	2	2	2	3	4	3	4 1 2 5 6 7 12 13 14 15 17 18 19 20 22 23 24	3	2	1	122000

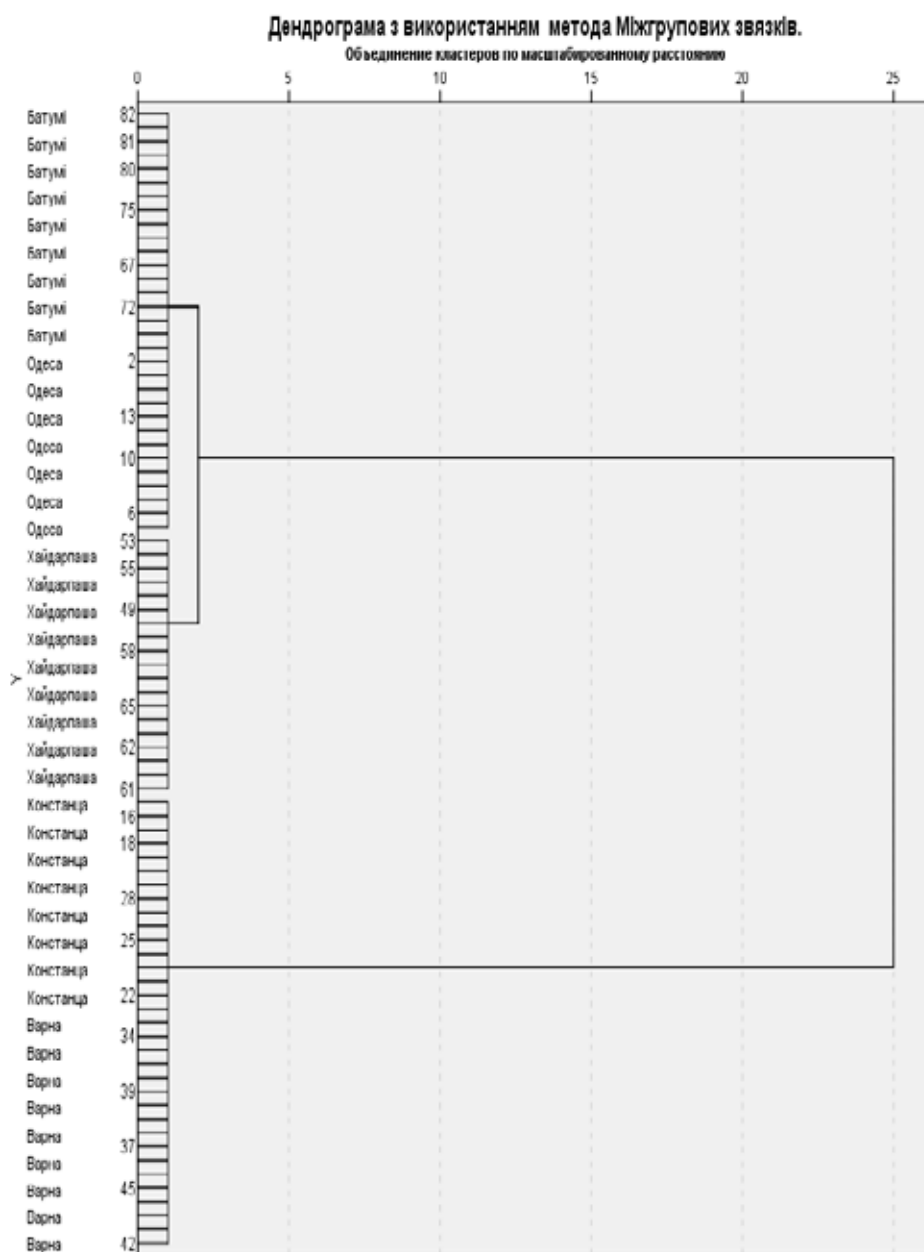


Рис. 7. Дендрограма кластеризації

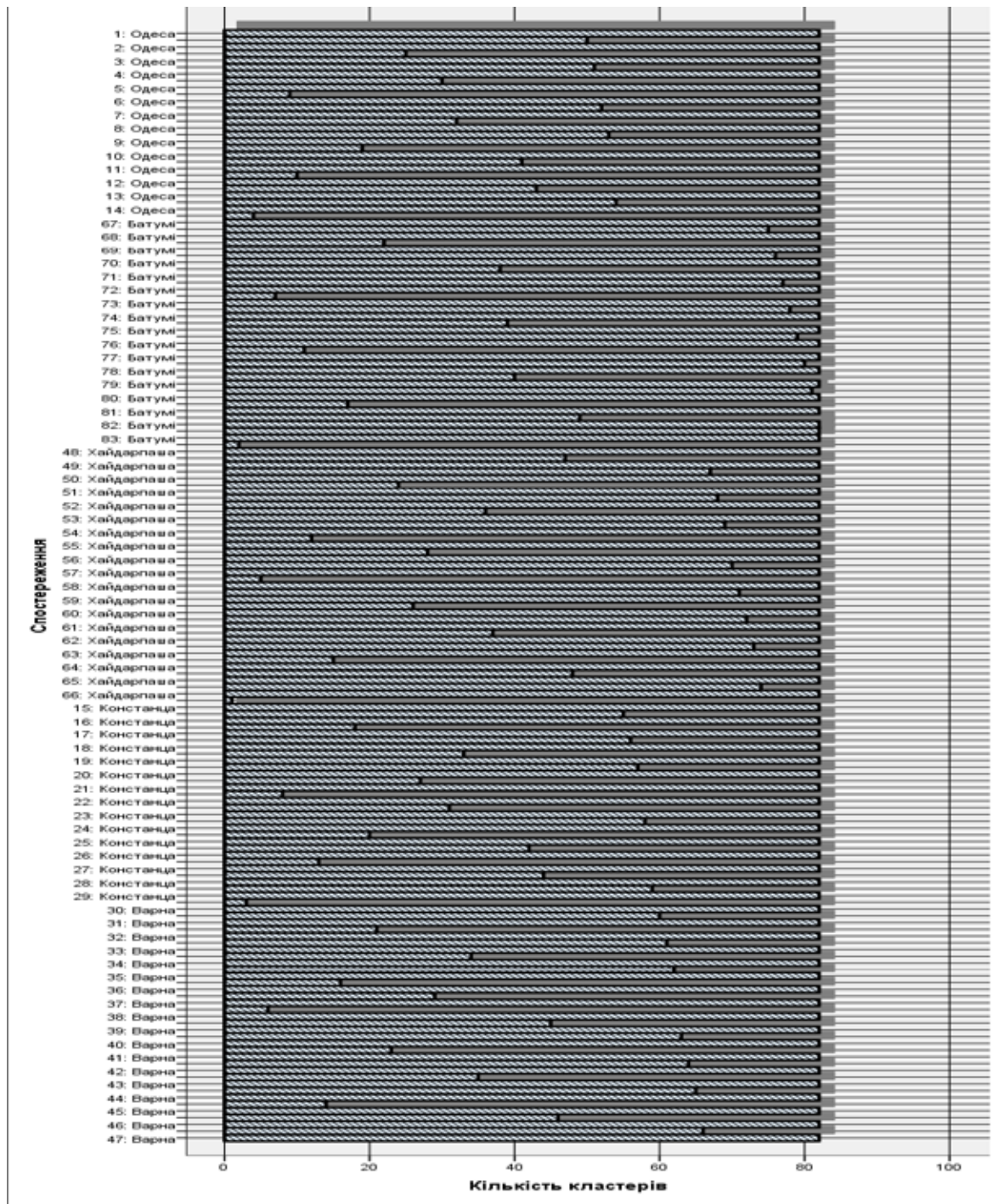


Рис. 8. Кластерні множини

виток ширшої клієнтської бази призвели до розгортання більших круїзних лайнерів. Тоді як у 1990-х роках круїзні лайнери рідко перевищували 2000 пасажирів, до 2010-х років було розгорнуто судна місткістю 6000 пасажирів. Крім того, більші кораблі можуть підтримувати ширший спектр зручностей;

– сегментація ринку з різними типами суден, пов'язаними з різними зручностями, що пропо-

нуються на борту та на березі, з різноманітністю пропонуванних типів круїзів, орієнтованих на різні (соціальні та вікові) групи потенційних круїзерів;

– глобалізація моделей розгортання та складне планування маршрутів за рахунок розгортання круїзних суден на кількох світових ринках. По-перше, круїзні компанії пропонують маршрути, в яких ціле значно більше, ніж сума його частин. Конкретний регіональний та

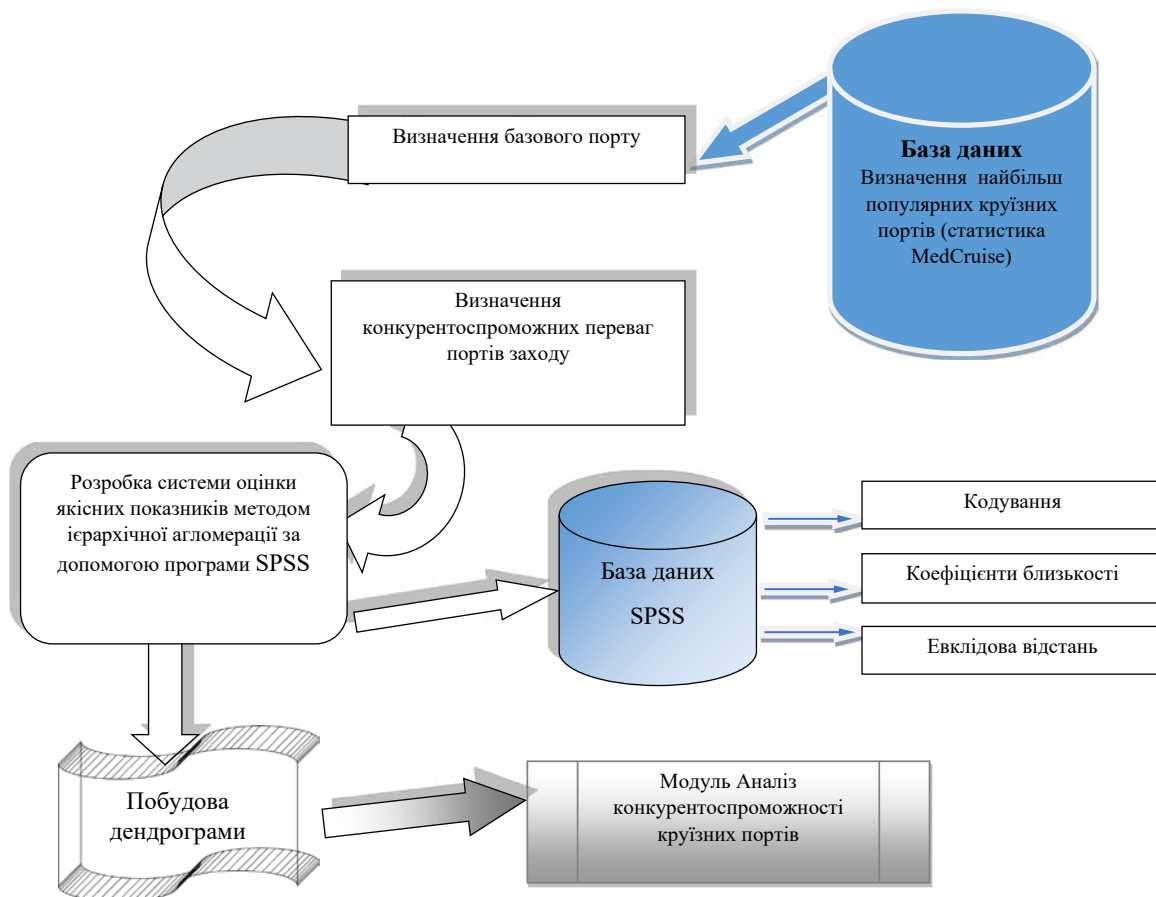


Рис. 9. Методика вибору портів для круїзу

культурний досвід пропонується завдяки поєднанню часу плавання та вибору портів заходу. По-друге, вони адаптуються до сезонних та фундаментальних змін попиту, змінюючи становище своїх суден (сезонно) та змінюючи конфігурацію заходів у порти (фундаментально). Основна стратегія деяких круїзних компаній полягає не в тому, щоб пропонувати фіксовані маршрути залежно від сезону, а в тому, щоб регулярно переміщати свої круїзні судна з одного регіону до іншого у певні періоди календарного року.

- інтернаціоналізація ринків джерел пасажирів, при цьому стратегії розвитку круїзних суден ведуть до розширення джерел їхніх гостей. Це також пов'язане з розширенням груп населення, які залучаються сучасними круїзами;

- концентрація та мультибрендові стратегії. У галузі високий рівень володіння та концентрації ринку, при цьому кожен конгломерат використовує декілька різних брендів, щоб розширити цільові групи пасажирів. Carnival і Royal Caribbean, два провідні круїзні конгломерати, займають 73% ринку.

Ці шість тенденцій наголошують на унікальній основі круїзної індустрії. Стратегія стимулювання пропозиції круїзних операторів спрямована на створення попиту, просто надаючи нові потужності (судна) та знаходячи клієнтів, яких називають гостями, щоб заповнити їх за допомогою стратегій планування маршруту, маркетингу та знижок. Можливість для операторів круїзних суден успішно дотримуватись стратегії стимулювання пропозиції робить круїзну індустрію абсолютно відмінною від інших ринків морських перевезень, таких як контейнерні перевезення. Це суперечить туристичному сектору загалом, який залежить від попиту і чутливий до загального економічного контексту. Отже, на більшості ринків судноплавства судноплавство є похідною торговельною діяльністю, а попит досить нееластичний за ціною.

У цій публікації була запропонована стратегія круїзного розвитку за допомогою побудови методики вибору портів для круїзу. Для чіткого визначення пасажирського туристичного кластеру як основи цінової політики компанії. Зроблена спроба продемонструвати, як можна включати

порти та будувати круїзні лінії, використовуючи дані з алгоритму Варда. Кластерний аналіз використовується для визначення того, які порти конкурентоздатні та економічно ефективні у маркетинговій стратегії компанії. Надана методика вибору портів для круїзу.

Список літератури:

1. Cruise Market Ward, D. The complete guide to cruising & cruise ships. Berlitz Publishing Company, London, UK. 2020.
2. Dowling R.K., Weeden C. Cruise ship tourism. 2nd edition. Centre for Agriculture and Bioscience International (CABI). 2017.
3. Gui L., Russo A.P. Cruise ports: a strategic nexus between regions and global lines, evidence from the Mediterranean. *Maritime Policy & Management*. 2010. Vol. 38 (1), pp. 129–150.
4. Notteboom T.E., Pallis A.A. IAPH-WPSP Port Economic Impact Barometer Half Year Report: A survey-based analysis of the impact of COVID-19 on world ports in the period April to September 2020. IAPH: Antwerp. 2020.
5. Pallis A.A. Cruise shipping and Ports. Cruise Shipping and Urban Development State of the Art of the Industry and Cruise Ports. OECD-ITF Discussion Paper, OECD: Paris. 2015.
6. Pallis A.A., Papachristou A.A. Cruise industry. / In: Vickerman R. (eds.) International Encyclopaedia of Transportation, London. 2010. Vol. 5, pp. 593–599.
7. Pallis A.A., Vaggelas G.K. Cruise Shipping and Green Ports: A Strategic Challenge. / In: Bergqvist R. and Monios J. (eds): Green Ports: Inland and Seaside Sustainable Transportation Strategies. Cheltenham : Edward Elgar. 2018. Pp. 255–273.
8. Pallis A.A., Vaggelas G.K. The changing geography of cruise shipping. / In: Wilmsmeier G., Monios J., Browne M., Woxenius J. (eds.). Geographies of waterborne transport: Transitions from transport to mobilities. Cheltenham : Edward Elgar. 2020. Pp. 170–191.
9. Michael E. Porter, Michael E. Porter on Competition. Москва : Вільямс, 2020. 608 с.
10. Leiper N. Tourism Management. 3d ed. Sidney : Pearson Education Australia, 2004. 326 p.
11. Шибаев А.Г., Сильванская Г.Н. Пассажи́рские перевозки : учебное пособие / под ред. д. т. н., проф. Шибаева. Одесса : Феникс, 2013. С. 336.
12. Сильванська Г.Н., Карп Г.В. Кластерний аналіз як інструмент сегментації круїзних ліній. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського*. Київ. 2021 р. Серія «Технічні науки». Том 32 (71). № 6. С. 239.
13. Теорія туризму. URL: <http://tourlib.net/> 2022 (дата звернення: 20.10.2022).
14. Farakhutdinov Sh.F., Bushuyev A.S. Processing and Analysis of Sociological Research Data in the SPSS 17.0 Package. Course of lectures : tutorial. Tyumen : TyumSOGU, 220 p. ISBN 978-5-9961-0414-7.2011.
15. Rodrigue J-P., Notteboom T. The Geography of Cruises: Itineraries, not Destinations. *Applied Geography*. 2013. Vol. 38, pp. 31–42.
16. UN World Tourism Organisation (UNWTO) 100% of global destinations now have COVID-19 travel restrictions, UNWTO Reports. 2020. 28 April.
17. UNWTO (2020). International tourist numbers could fall 60–80% in 2020, UNWTO Reports. 2020. 7 May.

Silvanskaya G.N., Karp G.V. METHODOLOGY FOR ORGANIZING A REGULAR CRUISE ROUTE IN MODERN CONDITIONS

The cruise tourism market is developing rapidly. Maritime tourism, as its component, considered as a phenomenon of post-industrial society, is one of the fastest growing sectors of the world economy and promises huge potential benefits for regions with the necessary tourism resources. In 2021, the global cruise market brought in about 6.65 billion dollars of profit. The total global cruise industry is estimated at \$23.8 billion in 2021 (which indicates an increase of 81.8% compared to 2020 and a decrease of 52.9% compared to 2019). This was accomplished by 13.9 million cruises passengers (increase by 96.2% compared to 2020 and decrease by -49.4% compared to 2019). This publication analyzes the current state of the maritime tourism market at the international level and reveals its central problem – the competitiveness of ports. The cluster approach is considered as a tool for forming the consumer segment of the cruise business, which allows identifying the main factors influencing the effective choice of ports

The concept of “sea cluster” as a foundation for designing a sea tourist route has been studied. However, the sector of marine tourism remains one of the least researched in the world economy, so studying the possibilities and experience of implementing its structure is promising. Unfortunately, the concept of “tourist cluster” in Ukraine today is not defined at the legislative level, and there is no generally accepted definition of this term. Therefore, the formalization of this concept is relevant and requires a unified approach. The article is designed to demonstrate the importance of cruise line design using the cluster analysis method. The results of the research are used by maritime operators as a strategy for determining the company’s pricing policy.

Key words: maritime tourism, cruise line, turn-round/call port, maritime cluster, cluster analysis, competitiveness, Ward’s method.

Соколова О.Є.

Національний авіаційний університет

Чередніченко К.В.

Національний авіаційний університет

МЕТОДИ ТА МОДЕЛІ КОРОТКОСТРОКОВОГО ПРОГНОЗУВАННЯ ЄВРОПЕЙСЬКОГО РИНКУ АВІАЦІЙНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Загострення військово-політичної ситуації на території України призвело до падіння, невизначеності та нестабільності соціально-економічних показників, але не змінило державних орієнтирів в бік європейської інтеграції, зокрема у транспортній сфері. Вітчизняний авіаційний сектор, як інші галузі економіки, на сучасному етапі, знаходиться у край важкому стані.

Українські авіапідприємства зазнавши значних збитків за наслідками глобальної пандемії Covid-2019 та не встигнувши повністю повернутися до продуктивного стану, опинилися перед новим складним випробуванням, що виникло з початком війни в країні 24 лютого 2022 р. Закриття повітряного простору держави, значні пошкодження, що зазнали об'єкти авіатранспортної та критичної інфраструктури за результатами російської агресії, стали причиною, в більшості випадків, тимчасового призупинення діяльності підприємств авіаційної галузі та необхідності пошуку альтернативних напрямків щодо її відновлення та диверсифікації поза межами країни, у тому числі у країнах ЄС. Виходячи з цього, для забезпечення можливості продовження євроінтеграційних процесів на авіаційному транспорті у після військовий період, швидкої адаптації та планування авіап перевізниками стратегічних, тактичних та операційних показників з урахуванням реалій сьогодення, важливим завданням є оцінювання існуючого стану, особливостей функціонування та прогнозування тенденцій розвитку європейського ринку авіаційних перевезень.

У статті проаналізовано стан глобального та європейського ринків авіаційних перевезень у посткризовий період. Встановлено позитивну динаміку процесів відновлення галузі після пандемії Covid-2019 на початку 2022 р., але визначено суттєві відхилення між фактичними та прогнозними показниками. Досліджено методи прогнозування пасажирських та вантажних перевезень, що застосовують у сучасній практиці авіаційного бізнесу. Розроблено прогноз європейського ринку авіаційних пасажирських перевезень за методом екстраполяції часових рядів та регресійного аналізу.

Запропоновано імітаційну модель для короткострокового прогнозування експлуатаційної діяльності аеропорту на основі наявної післявідмовної динаміки ключових показників.

Ключові слова: авіаційні перевезення, європейський регіон, критичний збій, прогноз, модель множинної регресії, імітаційне моделювання.

Постановка проблеми. У 2022 році, коли світ поступово оговтується від пандемії Covid-19, визначення прогнозних значень ключових виробничо-фінансових показників діяльності авіаційної галузі на глобальному та регіональному (національному) рівнях, а також на рівні окремих авіапідприємств стають критично необхідними. Актуальність цього питання обумовлюється, перш за все, тим, що у період з 2019 р. по 2020 р. спостерігається різке скорочення експлуатаційних показників авіаційного транспорту, а це потенційно створює критичний шум у виборці статистичного ряду та виникнення можливих кореляційних помилок при прогнозуванні подальших тенденцій його розвитку; по-друге, фактично неможливо спрогнозувати динаміку показників авіапідприєм-

ства на короткострокову перспективу за наявними індикаторами після збою, оскільки вибірка даних занадто мала. Саме тому, важливим завданням є розробка оптимальних прогнозних моделей для авіаційної галузі, що могли б максимально точно відобразити поведінку досліджуваних показників у посткризовий період.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основним підходом до прогнозування на авіаційному транспорті є методика, що запропонована ІКАО [1], сутність якої полягає у представленні функціональної залежності пасажирообігу від соціально-економічних чинників у мультиплікативній формі. Практична реалізація цієї методики передбачає використання двох незалежних змінних, як правило, це макроекономічний показник

(ВВП) та показник, що характеризує вартість перевезення. Базові галузеві довгострокові прогнози авіаперевезень розробляються міжнародними організаціями ICAO [2], IATA [3], а також компаніями-лідерами світового авіабудування Airbus [4] та Boeing [5].

Розробці методичних підходів довгострокового прогнозування авіаційних перевезень присвячено значну кількість наукових праць, серед яких слід відзначити роботи таких вчених як: Марінцевої К. [6], Петрик В. [7], Хезледін Т. [8], Гудмандсон С. [9] та ін.

Характеризуючи вітчизняну та зарубіжну дослідницьку практику прогнозування попиту на авіаційні послуги, можна відзначити активне використання методів математичного моделювання на основі регресійного та кореляційного аналізу, статистичного прогнозування тимчасових рядів (екстраполяція), а також експертних оцінок. Крім цього, все частіше застосовуються нейронні мережі та системна динаміка при розробці моделей прогнозу для авіаційного транспорту [10 – 11].

Проведений аналіз науково-практичної літератури свідчить про вагомий внесок науковців стосовно прогнозування обсягів авіаційних перевезень із застосуванням різних методичних підходів, зокрема на довгострокову перспективу. Однак, при цьому, у науковому колі питання розробки короткострокових прогнозів розвитку авіатранспортної системи та її структурних елементів у посткризовий період залишаються невирішеними та мають дещо фрагментарний характер.

Постановка завдання. Мета статті полягає у визначенні тенденцій розвитку глобального та європейського ринків авіаційних перевезень у посткризовий період, дослідженні та тестуванні різних методів прогнозування європейського попиту на авіаційні послуги, а також розробці імітаційної моделі для короткострокового прогнозування експлуатаційної діяльності авіа підприємства (аеропорту) на основі наявної післявідмовної динаміки ключових показників.

Виклад основного матеріалу дослідження. Отже, Covid-19 призвів не лише до максимального скорочення обсягів авіаційних пасажирських перевезень у 2020 р. та дестабілізації роботи авіа підприємств порівняно з 2019 р., але й створив майже непередбачувані тенденції подальшого розвитку авіаційного сектору. Це пов'язано з тим, що введенні технологічні обмеження та вимоги до перевізного процесу повітрям під час пандемії негативно вплинули на відчуття комфорту серед пасажирів, що вимушені були проходити додаткові процедури контролю на наявність вірусу, дотримуватися

соціальної дистанції, а також знаходитися довгий час у захисній масці, а в деяких випадках, взагалі, бути не впевненим щодо можливості подорожі. Саме з цих причин, у травні 2020 р. 40% людей заявили, що планують менше користуватися авіаційним транспортом ніж раніше. Безумовно, такі зміни в індивідуальних уподобаннях створюють безліч потенційних перешкод для авіакомпаній, які необхідно враховувати, щоб поступово вийти з цієї кризи та стати знов привабливими для потенційної клієнтури [12].

На думку провідних експертів, глобальний авіаційний ринок може почати повноцінно функціонувати та досягнути показників 2019 р. не раніше 2024 р., але при умові відсутності повторення сценарію пандемії та погіршення загальносвітових тенденцій соціально-економічного розвитку.

На поточному етапі, вже відчуваються позитивні зміни у пасажирському сегменті світового авіаційного сектору. Так, наприклад, за результатами липня 2022 р. глобальний пасажиропотік збільшився на 39,6% порівняно з аналогічним періодом 2021 р., що на 25,4% нижче рівня 2019 р. Активне відновлення пасажирського трафіку спостерігається у всіх регіонах світу, причому найбільший приріст зареєстровано у Азіатсько-Тихоокеанському регіоні. Коефіцієнт пасажирського завантаження у липні 2022 р. досяг 83,5%, що на 1,14% вище попереднього року, коли показник дорівнював 73,1% [12].

Після короткотривалого зростання обсягів авіаційних вантажних перевезень у період з 2020 р. по 2021 р., 2022 р. характеризується зменшенням показника порівняно з 2019 р., основними причинами чого стали висока інфляція та зростання відсоткових тарифних ставок. Але не дивлячись на це, послаблення обмежень Covid-19 та необхідність зберігання стійких ланцюгів постачання все ж таки будуть сприяти підтримці глобального попиту на зовнішньоторговельні процеси та авіаперевезення у найближчій перспективі. Відзначимо, що у липні 2022 р. структура глобального вантажопотоку за регіонами світу розподіляється нерівномірно. Так, якщо Північна Америка показує суттєве зростання вантажного авіатрафіку починаючи з 2019 р., у європейському регіоні, навпаки, спостерігається його найбільше скорочення. Підкреслимо, що у звітному періоді Європа займала 30,4% у глобальній структурі ринку пасажирських авіаперевезень за показником пропускної спроможності, що на 48,9% більше ніж у попередньому 2021 р. та менше на 16,1% менше рівня 2019 р. [13].

Таким чином, проведений аналіз стану глобального та регіональних ринків авіаційних перевезень у посткризовий період, в цілому, свідчить про позитивну динаміку процесів відновлення галузі за результатами 2 кв. 2022 р., але показує суттєві відхилення між прогнозними та фактичними даними, зокрема, що були визначені на короткострокову перспективу. Саме тому, важливо провести дослідження найбільш відомих методів прогнозування на авіаційному транспорті та розробити оптимальну прогнозну модель, щоб максимально відображала поточну ринкову ситуацію та враховувала виникнення збійних ситуацій за ключовими видами діяльності.

У сучасній практиці авіаційного бізнесу застосовують різні моделі прогнозування пасажирських та вантажних перевезень, які в залежності від рівня завдання, що вирішується доцільно об'єднати у наступні групи:

- загальні моделі прогнозування обсягів перевезень в цілому по країні, окремим регіонам, економічним районам, територіальним об'єднанням, авіапідприємствам;

- часткові моделі прогнозування пасажирото- та вантажопотоків на конкретних авіалініях, між окремими аеропортами (населеними пунктами), мережі повітряних ліній.

Серед найбільш розповсюджених підходів до прогнозування на авіаційному транспорті слід відзначити: математичне моделювання на основі регресійного та кореляційного аналізу; статистичне прогнозування тимчасових рядів (екстраполяція); експертних оцінок.

На основі методів регресійного та кореляційного аналізу оцінюють тенденції розвитку прогнозованого процесу в залежності від впливу на нього певних факторів. Завдяки екстраполяції тимчасових рядів з використанням різних аналітичних функцій визначають динаміку змін досліджуваного показника послідовно у часі. Застосування методів

експертних оцінок передбачає вивчення й узагальнення думок досвідчених фахівців галузі, за допомогою яких знаходять узагальнену збалансовану оцінку параметру, що прогнозується. Відзначимо, що дельфійський метод є одним з ефективних підходів до транспортного планування та розробки національних або регіональних прогнозів розвитку авіаційних перевезень.

У загальному вигляді процес прогнозування функціонування авіатранспортної системи передбачає розробку взаємозалежних прогнозів та припущень тенденцій розвитку її складових компонентів (рис. 1).

На кожному етапі планування розвитку авіаційної галузі аналізуються специфічні чинники, що прямо або опосередковано впливають на досліджуваний показник та, в залежності від ступеня тісноти зв'язку між ними, обираються в якості вихідних даних для розробки відповідних моделей прогнозу (рис. 2). Визначення зв'язку між попитом та окремими соціально-економічними показниками проводиться на першому етапі прогнозування національних обсягів пасажирських та вантажних перевезень.

Найбільш точним вважається такий прогноз, при розробці якого використовуються зовнішні та незалежні джерела інформації щодо тенденцій змін чинників, що досліджуються. Однак непередбачені зміни розвитку цих джерел можуть бути причиною істотної варіації прогнозованого національного попиту на авіаційні перевезення, особливо в довгостроковій перспективі. Для того щоб відобразити цю невизначеність прийнято розраховувати ряд сценаріїв зміни попиту (песимістичний, оптимістичний та реалістичний прогнози).

Прогнозування розподілу пасажирото- та вантажопотоків серед аеропортів здійснюється на основі прогнозу національного попиту на перевезення. Одним з найпопулярніших джерел отримання вихідної інформації у даному випадку

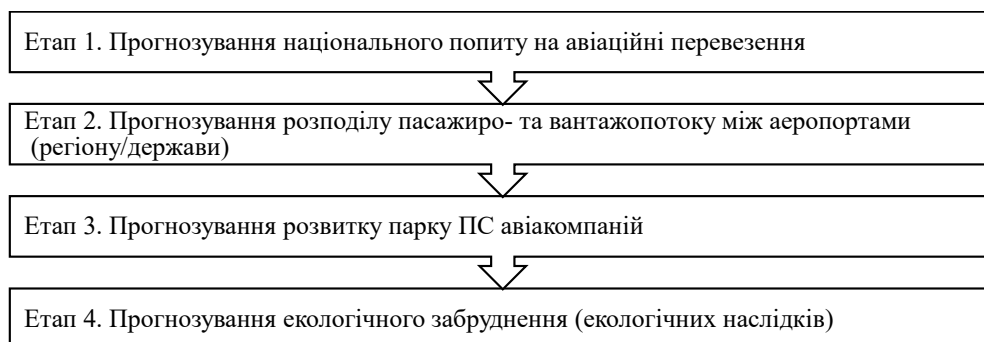


Рис. 1. Етапи прогнозування розвитку авіатранспортної системи



Рис. 2. Система ключових показників (чинників), що використовуються в моделях прогнозування тенденцій розвитку авіатранспортної системи

є опитування авіапасажирів та вантажовідправників/отримувачів з метою визначення походження, напрямів та цілей поїздок пасажирів в аеропортах, спектру аеропортових послуг.

Після цього передбачається розподіл прогнозованого попиту на перевезення між аеропортами на основі статистичного аналізу минулих рішень. Модель прогнозу також може бути використана для урахування майбутніх наслідків обмеження пропускної спроможності певного аеропорту.

На етапі розробки прогнозів розвитку парку повітряних суден авіакомпаній необхідно враховувати існуючі та прогнозовані обсяги авіаперевезень для кожного аеропорту, мережу маршрутів, тип та вік літаків, що експлуатуються на кожній авіалінії. Важливою складовою прогнозування

тенденцій розвитку авіатранспортної системи або окремого авіапідприємства є оцінка майбутніх екологічних наслідків (екологічного забруднення), що полягає у розробці прогнозів викидів CO₂, які генеруються за окремими видами діяльності та, базуються на результатах прогнозів інтенсивності руху повітряних суден наявного та проектного парку літаків.

Виходячи з вищеванеденого, можна зробити висновки про те, що прогнозування є необхідною, але складною процедурою, що спрямована на гармонізацію діяльності авіапідприємств через формування адекватної пропозиції на ринку авіаційних перевезень.

Як говорилося раніше, групою методів прогнозування, які широко використовують в авіаційній

галузі є аналітичні методи, до яких належать: методи регресійного та кореляційного аналізу, а також економетричного моделювання. Точність та надійність аналітичних методів залежить від достовірності статистичних даних залежних та незалежних змінних, а також зберігання сталого зв'язку між ними упродовж періоду, що прогнозується.

Отже, для підтвердження вищенаведеного, авторами проведено аналіз щомісячних обсягів пасажирських перевезень європейського ринку авіаційних перевезень за 2020 р. – 2022 р. (6 місяців) та побудовано моделі короткострокового прогнозу досліджуваного показника на основі методів екстраполяції часових рядів (рис. 3) та регресійного аналізу.

Згідно отриманих рівнянь прогнозу методом екстраполяції часових рядів обсягів перевезень пасажирів авіаційним транспортом європейського регіону найбільше значення апроксимації $R^2 = 0,5883$ отримано за поліноміальним типом лінії тренду:

$$y = 203666x^2 - 5E+0, 6x + 5E+0, 7. \quad (1)$$

Поліноміальне наближення дає позитивні результати, якщо залежність, що міститься у даних, характеризується постійною швидкістю зростання.

На етапі прийняття управлінських рішень слід враховувати, що екстраполяція у більшості випадків не вважається задовільним методом прогнозування. Це обумовлюється тим, що метод виправдовує себе лише через існування параметрів, які вплинули на попит у минулому зі швидкістю, яка є функцією часу. Тому, у випадку невизначеності параметрів, що базуються на часі, а також ступеню їхнього впливу на попит, процес прогнозування стає достатньо складним та не об'єктивним.

Побудова моделі прогнозування на основі регресійного аналізу передбачає встановлення зв'язку обсягів пасажирських авіаційних перевезень з іншими явищами, об'єктами та процесами у вигляді рівняння регресії:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \quad (2)$$

Прогноз здійснюється підстановкою до моделі значень обраних факторів та оцінкою очікуваного середнього значення результативної ознаки. Для встановлення області розсіювання визначаються довірчі інтервали.

Для побудови регресійної моделі прогнозу для європейського регіону обрані фактори, що мають вплив на формування попиту на авіаційні пасажирські перевезення, а саме (табл. 1): номінальний ВВП на душу населення ($R^2 = 0,5945$), кількість безробітних ($R^2 = 0,5656$) та споживчі витрати ($R^2 = 0,9432$).

За результатами проведення регресійного аналізу, залежність кількості авіаційних пасажирів (Y) від номінального ВВП (на душу населення) (X_1), кількість безробітних осіб (X_2) та споживчих витрат (X_3) в країнах ЄС можна представити у вигляді лінійної моделі:

$$y = -58056,75102x_1 - 11,43562923x_2 + 0,000985791x_3 - 363567416,1. \quad (3)$$

Враховуючі той факт, що коефіцієнт детермінації у даному випадку дорівнює $R^2=0,9051$, то ступінь залежності обсягів пасажирських авіаційних перевезень від сукупності запропонованих соціально-економічних показників достатньо високий.

Відзначимо, що отримана прогнозна модель, в цілому, свідчить про негативні тенденції роз-

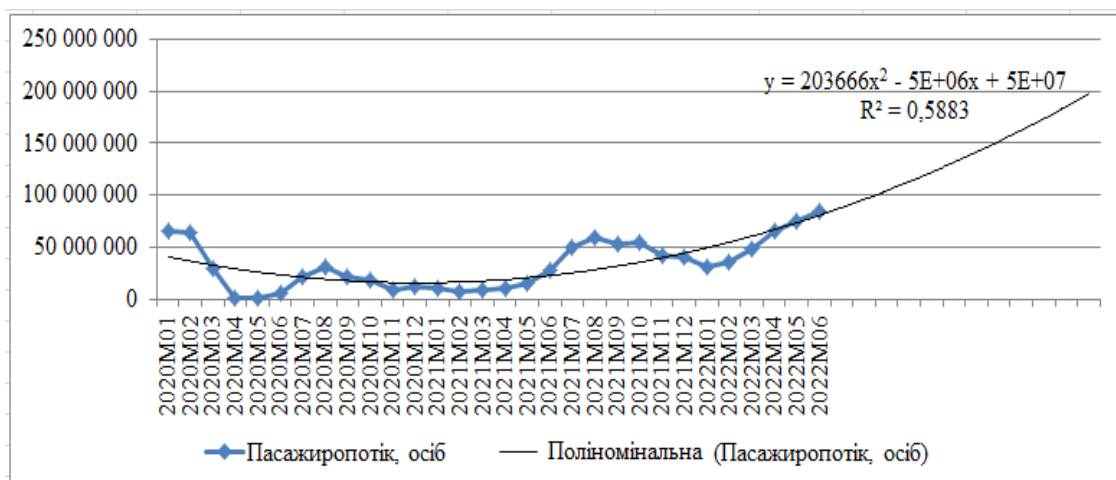


Рис. 3. Прогноз європейського ринку авіаційних пасажирських перевезень за методом екстраполяції часових рядів (поліноміальний тип лінії тренду)

Соціально-економічні показники розвитку європейського регіону (країни ЄС)
за період з 2020 р. – 2022 р. (2 кв.) [13]

Період	Авіаційний пасажиропотік, осіб	Номинальний ВВП на душу населення, євро	Кількість безробітних, осіб	Споживчі витрати, євро
1 кв. 2020 р.	158161532	7500	43503000	1468840000000
2 кв. 2020 р.	7361012	6900	42930000	1283520000000
3 кв. 2020 р.	74 726 479	7630	48990000	1462330000000
4 кв. 2020 р.	37481807	8000	46809000	1420710000000
1 кв. 2021 р.	25464457	7580	49056000	1390710000000
2 кв. 2021 р.	52387893	7980	45849000	1441950000000
3 кв. 2021 р.	161056367	8200	43257000	1504880000000
4 кв. 2021 р.	136141908	8670	41319000	1504250000000
1 кв. 2022 р.	115047157	8320	41543000	1503620000000
2 кв. 2022 р.	224572609	8700	38772000	1522570000000

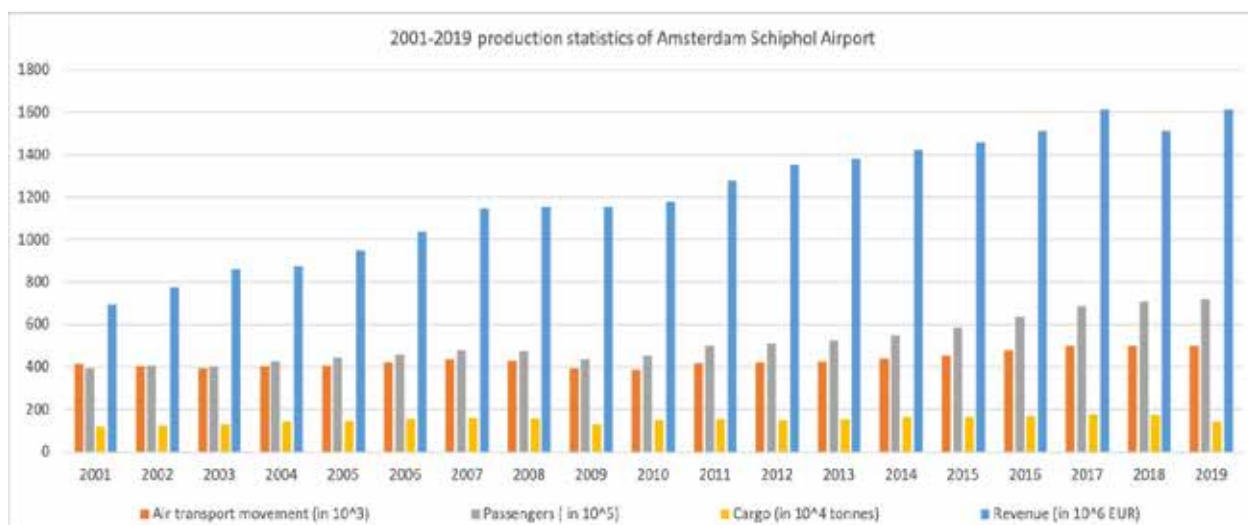


Рис. 4. Динаміка ключових виробничо-фінансових показників аеропорту «Схіпхол» (м. Амстердам, Нідерланди) за 2001–2019 рр. [14]

витку європейського ринку авіаційних пасажирських перевезень.

У посткризовий період спостерігається різке зниження експлуатаційних характеристик авіа-підприємств, що потенційно створює критичний шум у вибірці даних та призводить до кореляційних помилок прогнозування. Крім цього, фактично неможливо спрогнозувати динаміку їх розвитку за наявними індикаторами після збою, оскільки вибірка статистичних даних занадто мала.

Для вирішення цих проблем, авторами запропонована симуляційна модель для прогнозування ефективності авіаційного підприємства (на прикладі аеропорту «Схіпхол», м. Амстердам, Нідерланди), що складається з двох етапів: 1) розробка математичної моделі для встановлення загальних кореляцій між виробничими

операціями та доходами; 2) розробка імітаційної моделі для короткострокового прогнозування експлуатаційної діяльності на основі наявної післявідмовної динаміки ключових показників.

Отже, на першому етапі, згідно проведеного аналізу аналітичних матеріалів об'єкту дослідження за 2001 р. – 2019 р. (рис. 4), побудовано множинну регресійну модель з використанням таких показників як: кількість рухових операцій ПС на території аеропорту (зліт та посадка), пасажиро- та вантажопотоки.

Програмування моделі множинної регресії доходів аеропорту «Схіпхол» здійснювалося за допомогою ПЗ RStudio (рис. 5).

Кореляційні графіки за моделлю множинної регресії доходів аеропорту «Схіпхол», що побудовані у ПЗ RStudio наведені на рис. 6.

```
Call:
lm(formula = rev ~ atm + pass + carg, data = data)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-211.62  -62.95  -14.27   55.13  175.77

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  32.641     92.389   0.491  0.6294
          atm    -2.758      1.071  -2.574  0.0191 *
          pass   32.364      5.896   5.489 3.26e-05 ***
          carg  354.786    187.666   1.891  0.0749 .
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 100.4 on 18 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.9143,    Adjusted R-squared:  0.9
F-statistic: 64.02 on 3 and 18 DF,  p-value: 8.428e-10
```

Рис. 5. Результуючий код моделювання множинної регресії доходів аеропорту «Схіпхол» у ПЗ RStudio

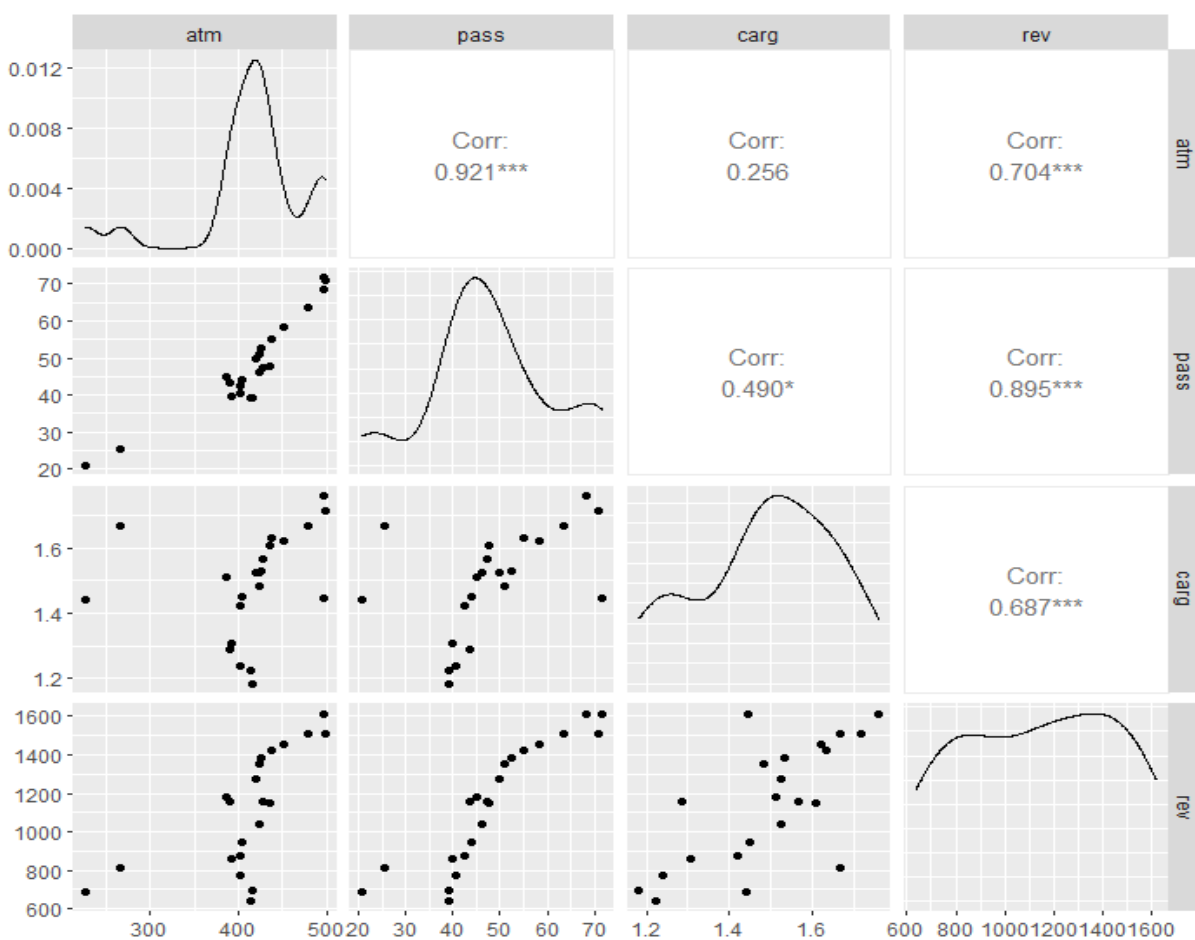


Рис. 6. Кореляція показників моделі множинної регресії доходів аеропорту «Схіпхол» у ПЗ RStudio

Отримані результати моделювання інтерпретуюмо таким чином:

- точність моделі $R^2 = 0,90$ (високий рівень $\geq 0,85$);

- існує висока кореляція доходів та рухових операцій ПС на території аеропорту ($p - value = 0,0191 < 0,05$);
- висока позитивна кореляція виручки з кількістю перевезених пасажирів ($p - value = 0,0000326$);

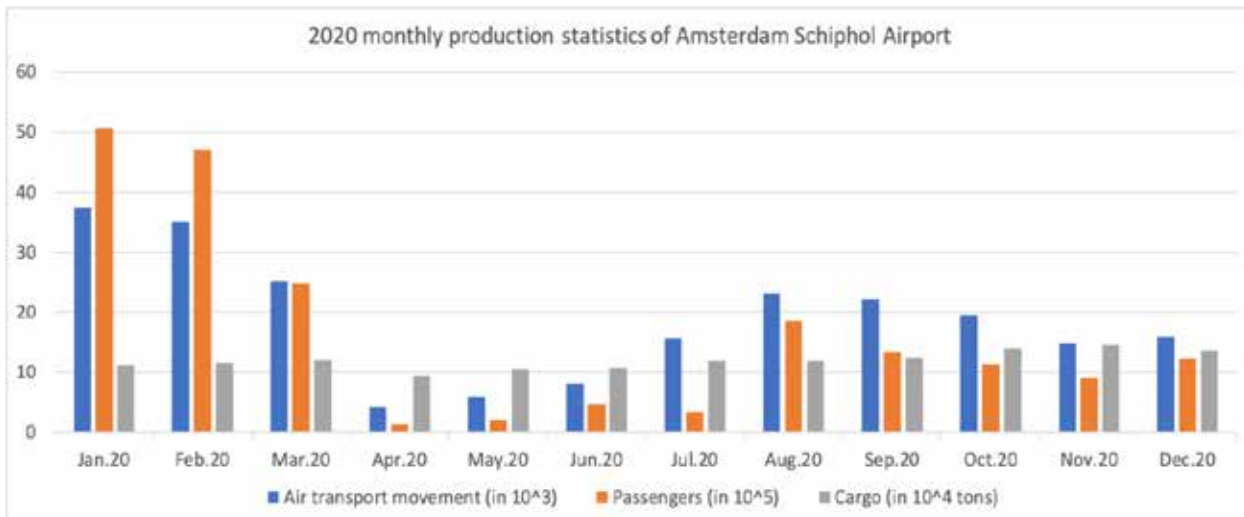


Рис. 7. Щомісячні статистичні дані виробничих показників аеропорту «Схіпхол» (м. Амстердам, Нідерланди) за 2020 р. [15]

Таблиця 2

Основні характеристики вибірки критичних статистичних даних

Показник	Min	Max	Середнє	σ
Кількість рухових операцій ПС на території аеропорту (тис.од.)	4,242	23,125	14,376	5,520614045
Кількість пасажирів (млн.осіб)	0,126015	1,854786	0,94799	0,504904633
Обсяг вантажу (млн. тонн)	0,09325489	0,15320616	0,12323052	0,015330566

– середня позитивна кореляція доходів та перевезених вантажів ($p - value = 0,0749$).

Виходячи з вищенаведеного, розроблена модель матиме такий вигляд:

$$REV_{Schiphol} = 32,641 - 2,758 \cdot \alpha + 32,364 \cdot \beta + 354,786 \cdot \gamma, \quad (4)$$

де $REV_{Schiphol}$ – дохід аеропорту «Схіпхол», млн. євро;

α – кількість рухових операцій ПС на території аеропорту, тис. од.;

β – кількість перевезених пасажирів, млн. осіб;

γ – обсяг перевезеного вантажу, млн. т.

На наступному етапі, розроблено імітаційну модель для короткострокового прогнозування діяльності аеропорту «Схіпхол» (м. Амстердам, Нідерланди) в МО Excel. В якості вихідних даних взято щомісячну виробничу статистику авіапідприємства за 2020 р. (рис. 7).

Результати розрахунку основних характеристик критичних вибірок даних за допомогою вбудованих функцій МО Excel наведені у табл. 2.

Розроблений інтерфейс імітаційної моделі представлено на рис. 8.

Основна ідея моделювання полягає в тому, що для визначення кожного індикатора прово-

Predictive Simulation Model				
	MIN	MAX	MEAN	STD.DEVIATION
Monthly Air Transport Movements (in thousands)	4,242	23,125	14,376	5,520614045
Monthly Passengers (in millions)	0,126015	1,854786	0,94799	0,504904633
Monthly Cargo	0,093254889	0,15320616	0,12323052	0,015330566
Monthly Air Transport Movements (in thousands)	Random Value	0,2026104		
	Normal Distribution	9,78100875		
				Average Revenue = 66,4226949
				Std. deviation 23,0676731
				Max 141,912713
Monthly Passengers (in millions)	Random Value	0,81700318		
	Normal Distribution	1,40442547		
Monthly Cargo	Random Value	0,8103924		
	Normal Distribution	0,13671135		
Iteration	Air Transport Movements	Passengers	Cargo	Simulated Revenue
1	9,781008748	1,40442547	0,13671135	99,62107776
2	9,796548814	0,73777211	0,11157183	69,08349916
3	13,96695482	1,30612184	0,08038305	64,91024823

Рис. 8. Розроблений інтерфейс прогновної імітаційної моделі у МО Excel

дяться 10^5 ітерацій експерименту за допомогою МО Excel. Таким чином створюється вибірка симуляційних даних, котра базується на тих самих законах розподілу, що і оригінальна статистична вибірка, але фактично не дорівнює їй:

$$SIM = NORM.INV(Probability; Mean; Standart Deviation) \quad (5)$$

де *NORM.INV* – функція, яка повертає обернений нормальний кумулятивний розподіл; *Probability* – порогове значення функції повернення, яке моделюється *RAND()* функцією.

Для того, щоб отримати змодельований місячний дохід, авторами була використана формула (4).

Основні характеристики змодельованої місячної вибірки доходу зібрані у табл. 5. Отримані дані процентилію змодельованого місячного доходу аеропорту «Схіпхол», а також графічне його представлення наведено у табл. 3 та на рис. 6. Гістограму розподілу змодельованого місячного доходу аеропорту «Схіпхол» представлено на рис. 7.

Таблиця 3

Основні характеристики змодельованої місячної вибірки доходу

Показник	Середнє	Max	
Дохід (млн. євро)	66,4226949	141,1912713	23,0676731



Рис. 6. Процентильний графік місячного доходу аеропорту «Схіпхол»

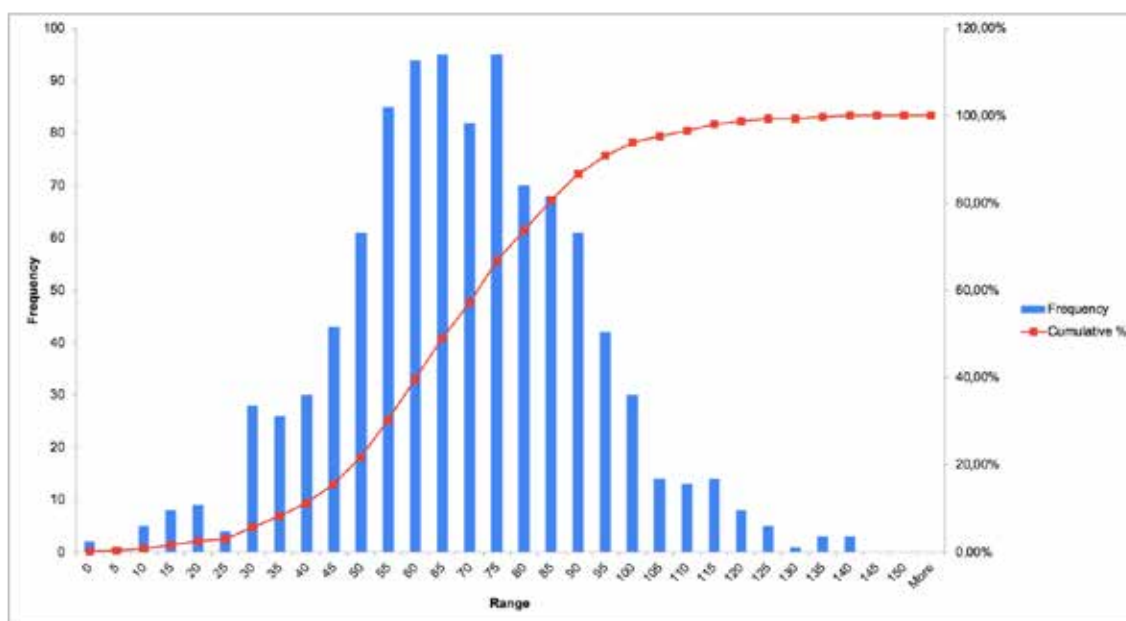


Рис. 7. Гістограма розподілу змодельованого місячного доходу аеропорту «Схіпхол»

Таблиця 4
Процентиль змодельованого місячного доходу аеропорту «Схіпхол»

Процентиль	Дохід, млн. євро
0,05	28,88784158
0,1	36,95226344
0,15	41,74715449
0,2	46,57471619
0,25	51,04351446
0,3	54,4209168
0,35	57,63116061
0,4	61,18603932
0,45	64,21002389
0,5	67,32336094
0,55	70,27680982
0,6	72,95159629
0,65	75,15860066
0,7	78,21345247
0,75	82,25044112
0,8	86,47961938
0,85	90,49937229
0,9	95,971416
0,95	102,9544739
1	141,9127131

Результати моделювання (табл. 4) інтерпретуються таким чином: при ймовірності 55% дохід об'єкту дослідження буде $\leq 70,277$ млн.євро. Це свідчить про можливість використання отриманих даних для прогнозу середньомісячної продуктивності аеропорту, з урахуванням математичного очікування результату діяльності підприємства. До того ж, значення процентилей можуть застосовуватися на етапі прийняття управлінських рішень при проведенні оцінювання критерію оптимізму/песимізму (подібно до критерію песимізму Гурвіца), який відображає очікування авіапідприємства щодо певного результату.

Для перевірки достовірності розробленої прогностичної моделі розраховано дохід аеропорту

«Схіпхол» на 2021 р. ($66,422 \times 12 = 797,064$ млн.євро). Порівнюючи проектне значення показника з фактично отриманими доходами авіапідприємства у 2021 р. (816 млн. євро [15]), можна стверджувати про високу точність та надійність запропонованого методу прогнозування (92,66%).

Висновки. Прогнозування є невід'ємною складовою процесу управління національною (глобальною, регіональною) авіатранспортною системою, а також необхідним елементом формування продукту авіакомпаній, що полягає в основі виробництва нових типів авіаційної техніки, розподілу пасажиро- та вантажопотоків між аеропортами держави (регіону) та формування системи оцінювання (мінімізації) екологічних наслідків від діяльності авіаційного транспорту.

Встановлено, що на сучасному етапі процес прогнозування стикається з низкою критичних проблем. З одного боку, пандемія призвела до різкого зниження операційних показників, що потенційно створює критичний шум у вибірці даних та кореляційні помилки в прогнозуванні. З іншого боку, неможливо передбачити динаміку підприємства за допомогою доступних індикаторів після збою, оскільки вибірка даних занадто мала.

Запропонована прогностична (імітаційна) модель, що розроблена на основі використання методу Монте-Карло, може бути потенційно корисною у таких випадках: при наявності критичного шуму вибірки, який може спричинити помилкові кореляції (наприклад, припинення діяльності підприємства через війну, пандемію або критичний збій); при відсутності значної вибірки даних для прогнозування короткострокових значень (наприклад, у випадку новонароджених авіаційних компаній, які нещодавно увійшли в галузь). Потенційно модель може бути розширена (з метою підвищення точності) фактором сезонності та значною вибіркою статистики.

Список літератури:

1. ICAO. Manual on Air Traffic Forecasting (Doc 8991 AT/722/3). URL: https://www.icao.int/MID/Documents/2014/Aviation%20Data%20Analyses%20Seminar/8991_Forecasting_en.pdf. (дата звернення: 10.12.2022).
2. ICAO (2021). Forecasts of Scheduled Passenger and Freight Traffic. URL: <https://www.icao.int/sustainability/pages/eap-fp-forecast-scheduled-passenger-traffic.aspx>. (дата звернення: 10.12.2022).
3. Air Passenger Numbers to Recover in 2024. URL: <https://www.iata.org/en/pressroom/2022-releases/2022-03-01-01/>. (дата звернення: 18.12.2022).
4. Airbus. Global Market Forecast 2022-2041. URL: <https://www.airbus.com/en/products-services/commercial-aircraft/market/global-market-forecast>. (дата звернення: 10.12.2022).
5. World Air Cargo Forecast 2022-2041. URL: <https://www.boeing.com/commercial/market/cargo-forecast/>. (дата звернення: 10.12.2022).
6. Марінцева К.В. Наукові основи та методи забезпечення ефективного функціонування авіатранспортних систем. *Монографія*. 2014. Київ, НАУ. 504 с.

7. Петрик В. Л. Аналіз стану світового ринку цивільної авіації та прогноз його розвитку в умовах нестабільного попиту на авіап перевезення. *Бізнес Інформ*. 2020. №3. С. 112–119. <https://doi.org/10.32983/2222-4459-2020-3-112-119>.
8. Hazledine T (2017). An augmented gravity model for forecasting passenger air traffic on city-pair routes. *J Transp Econ Policy*. 51(3). 208–224.
9. Gudmundsson S., Cattaneo M., Redondi R. (2021). Forecasting temporal world recovery in air transport markets in the presence of large economic shocks: The case of COVID-19. *Journal of Air Transport Management*. 91. <https://doi.org/10.1016/j.jairtraman.2020.102007>.
10. Chen S., Kuo S., Chang K., & Wang Y. (2012). Improving the forecasting accuracy of air passenger and air cargo demand: the application of backpropagation neural networks. *Transportation Planning and Technology*. 35(3). 373-392. <http://dx.doi.org/10.1080/03081060.2012.673272>.
11. Muros Anguita J. G., & Díaz Olariaga O. (2022). Air passenger demand forecast through the use of Artificial Neural Network algorithms. *International Journal of Aviation, Aeronautics, and Aerospace*. 9 (3). <https://doi.org/10.15394/ijaaa.2022.1726>.
12. Airline industry worldwide - number of flights 2004-2022. URL: <https://www.statista.com/statistics/564769/airline-industry-number-of-flights/> (дата звернення: 18.12.2022).
13. Official website of the European Union. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/data/database> (дата звернення: 18.12.2022).
14. Schiphol Group's Annual Report. URL: <https://www.schiphol.nl/en/schiphol-group/page/annual-reports/> (дата звернення: 18.12.2022).
15. Royal Schiphol Group. Traffic and transport figures per month. URL: <https://bit.ly/3mD4IUZ>. (дата звернення: 18.12.2022).

Sokolova O.Ye., Cherednichenko K.V. METHODS AND MODELS OF SHORT-TERM FORECASTING OF THE EUROPEAN AIR TRANSPORT MARKET

The aggravation of military and political situation in Ukraine led to decline, uncertainty and instability of socio-economic indicators, but had no effect on country's European integration course, particularly, in transport industry. The domestic aviation sector, similarly to other economic branches, is currently in an extremely difficult condition.

Suffered from significant losses due to global Covid-2019 pandemic with no time to fully restore the productive state, Ukrainian aviation companies faced a new challenge that came with the beginning of War on February 24, 2022. The closure of Ukraine's airspace, air transport and critical infrastructure damages caused by Russian aggression, in most cases, led to temporary suspension of aviation industry enterprises and the need to find alternative directions for recovery and diversification outside the country, including the EU. Thus, in order to ensure the continuation of European integration processes in air transportation in the post-war period, rapid adaptation and planning of strategic, tactical and operational indicators (taking into account the modern realities), it is necessary for air carriers to assess the existing state, peculiarities of operation and forecast the trends of European air transportation market development.

The article consists the state analysis of Global and European air transport markets in the post-crisis period. Positive recovery dynamics of industry after the Covid-2019 pandemic at the beginning of 2022 is established, but significant deviations between actual and forecast indicators is identified. Modern methods of passenger and cargo transportation forecasting used in aviation business, are studied. A forecast of European air passenger transport market is developed by time series extrapolation method and regression analysis.

A simulation model is proposed for short-term forecasting of airport operational activity based on the available post-failure dynamics of key indicators.

Key words: air transportation, European region, critical failure, forecast, multiple regression model, simulation modeling.

УДК 629.463.65
DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/47>

Фомін О.В.

Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О.С.

Державний університет інфраструктури та технологій

ЗАСОБИ КОНТРОЛЮ ТИПОВИХ І КОМПОЗИТНИХ КРИШОК ЛЮКІВ НАПІВВАГОНІВ

Ця стаття присвячена засобам контролю типових і композитних кришок люків напіввагонів, питанням підвищення якості технічного обслуговування вантажних вагонів, а саме розвантажувальних пристроїв напіввагонів. Для забезпечення безпеки прямування поїздів, схоронності вантажів і своєчасної доставки їх за призначенням на шляху прямування повинен виконуватися комплекс операцій. Перевантаження напіввагонів може впливати на технічний стан рухомого складу та безпеку на залізниці, потрібно контролювати стан розвантажувальних механізмів та кришок люків напіввагонів. Необхідність перевантаження і перевірки вантажів на шляху прямування – наслідок порушення правил навантаження, недбалого огляду вагонів у технічному стані. Перевантажують вантажі, як правило, тоді, коли подальше проходження вагона загрожує безпеці руху і може призвести до втрати, псування або пошкодження вантажу, а виправити положення без розвантаження неможливо. В цій статті розглянуті засоби контролю типових і композитних кришок люків напіввагонів, які дозволять запобігти можливій втраті сипких вантажів та підвищити рівень безпеки руху поїздів. Напіввагони повинні бути обладнані підніжками та поручнями, необхідними для безпечної роботи, а також зовнішніми та внутрішніми сходами. Перевірка технічного стану розвантажувальних пристроїв напіввагонів повинен контролюватись та перевірятись. Були визначені та проаналізовані несправності розвантажувальних люків напіввагонів. Вагони повинні бути придатними для перевезення даного вантажу. Несправності розвантажувальних пристроїв напіввагонів та методи їх усунення. Правильно зібраний механізм кришки люка повинен підніматися зусиллям однієї людини. Також були розглянуті типові та перспективні (композитні) конструкції кришок люків. В статті проведений розгляд сучасних установок для кришок люків напіввагонів на залізниці. Були запропоновані прилади для вимірювання товщини металу у різних видах виробничої діяльності. Розглянутий імпедансний метод контролю виробів перспективних (композитних) конструкцій.

Ключові слова: кришка люка напіввагона, установки для контролю, універсальний напіввагон, безпека руху поїздів.

Постановка проблеми. Основна проблема, що виникає при експлуатації універсальних напіввагонів, це недостатнє забезпечення необхідного рівня безпеки руху поїздів і недостатнє забезпечення збереження вантажу, який перевозиться, що відбувається в результаті обриву петель, які тримають кришку люка, зрізання валиків або випадання останніх.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Справний стан рухомого складу, що перебуває в експлуатації – неодмінна умова його нормального змісту. Правилами технічної експлуатації забороняється випускати в експлуатацію і допускати до прямування в поїздах рухомий склад, що має несправності, що загрожують безпеці руху, а також ставити в поїзди вантажні вагони, стан яких не забезпечує збереження вантажів, що перевозяться [1–4]. Відповідальність за

якість виконаного технічного обслуговування, ремонту та безпеку руху вагонів покладається як на працівників, які безпосередньо здійснюють технічне обслуговування та ремонт, так і на майстрів, начальників заводів, депо, майстерень, пунктів підготовки вагонів до перевезень та пунктів технічного обслуговування. Аналіз показав, що безліч варіантів конструкцій [6–7] які застосовуються, не передбачають захисних механізмів для запобігання відвалюванню кришок люків напіввагонів у передній частині на поворотному кріпленні.

За результатами проведеного аналізу літературних джерел [1–7] можна зробити висновок, що питання впровадження засобів контролю та ремонту типових та композитних кришок люків напіввагонів після тривалої експлуатації приділено недостатньо уваги.

Формулювання цілей статті. Метою роботи є аналіз засобів контролю та ремонту типових і композитних кришок люків напіввагонів. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань:

- визначення та аналіз несправностей розвантажувальних пристроїв напіввагонів;
- типові та перспективні (композитні) конструкції кришок люків;
- розгляд сучасних установок для кришок люків напіввагонів на залізниці;
- прилади для вимірювання товщини металу у різних видах виробничої діяльності;
- імпедансний контроль виробів перспективних (композитних) конструкцій;

Виклад основного матеріалу. Усі вагони піддаються технічному обслуговуванню в пунктах підготовки вагонів до перевезень, на станціях формування та розформування поїздів, а в дорозі – на станціях, передбачених у графіку руху поїздів. Правила технічної експлуатації забороняють подачу під навантаження вантажів та посадку людей без пред'явлення вагонів до технічного обслуговування та запису у спеціальному журналі про визнання їх придатними. Мета технічного обслуговування та ремонту – підтримування залізничних засобів у технічно справному стані та належному зовнішньому вигляді, забезпе-

чення надійності, економічності, безпеки руху та екологічної безпеки.

Визначення та аналіз несправностей розвантажувальних пристроїв напіввагонів

Напіввагони діляться на універсальні – з розвантажувальними люками у підлозі та спеціалізовані – з глухим кузовом (без кришок люків у підлозі та з глухими торцевими стінами).

В результаті функціонування кришки люка зазначеним образом виникають та розвиваються тріщини в її середній обв'язці (рисунок 1).



Рис. 1. Пошкодження бокового обв'язування типової конструкції кришки люка

Типові та перспективні (композитні) конструкції кришок люків

Типова кришка люка напіввагона (рисунок 2) – це складова його кузова. Плоска підлога напіввагонів складається із чотирнадцяти металевих штампо-

Таблиця 1

Перевірка технічного стану розвантажувальних пристроїв напіввагонів

Основні вузли, що підлягають перевірці	Технічні вимоги
Кришка люка напіввагона	Ремонт тріщин і пробоїн зваркою повинен відновити діючим РТМ 32 ЦВ-201 на ремонт вагона зваркою. Прогини виправити.
1) наявність тріщин і прогинів;	Встановити нові.
2) злам петель та кронштейнів;	Встановити нові.
3) відсутність осей в шкворневих з'єднаннях;	Встановити нові.
Механізм підйому кришки люка:	Встановити нові.
1) відсутність торсіона, шплінта або осі;	Виправити.
2) вигин важеля;	При зносі осей більше 2 мм – замінити новими.
3) знос осей	Виправити.
4) вигин опор, петель.	

Таблиця 2

Можливі несправності розвантажувальних пристроїв напіввагонів та методи їх усунення

Найменування несправностей, зовнішні прояви та додаткові ознаки	Ймовірна причина	Метод усунення
1) Зазор між кришками люків та кузовом. Спостерігається втрата вантажу	Деформація кришки люка, деформація верхніх листів шкворневих та проміжних балок, деформація нижньої обв'язки бокової стіни, зігнутий кронштейн кришки люка, згин болта закидки.	Виправити деталі; Наварити планки товщиною до 10 мм на опорну поверхню кронштейна або до 5 мм на зуб накидки; Заміна болта.
2) Відсутні зв'язувальні пристрої, скоби	Перевищення розрахункових навантажень	Встановити нові

ваних люкових кришок. Відповідно, по сім із них встановлюються симетрично з боку. Вантажі пересипаються з вагона назовні похилими площинами відкритої кришки люка. Кут нахилу кришки у верхньому (відкритому) положенні – 330° до горизонталі.



Рис. 2. Типова кришка люка з 5-ти мм листа

На рисунку 3 представлено запропоновану конструкцію кришки люка, яка складається з двох несівних гофрованих листів товщиною по 3 мм. При цьому гофри верхнього та нижнього листів направлені в протилежні сторони. Вузли кріплення залишаються типовими.



Рис. 3. Кришка люка з двох листів по 3 мм (просторова модель)

Розглянемо поліматеріальне (композитне) каркасне виконання кришки люка (рисунок 4) напіввагона з міжлистовим Ш-подібним обв'язуванням зі стандартним кріпленням:

– полотно кришки люка виконується з верхнього та нижнього листів, простір між якими заповнений пружною (пружно-в'язкою) речовиною;

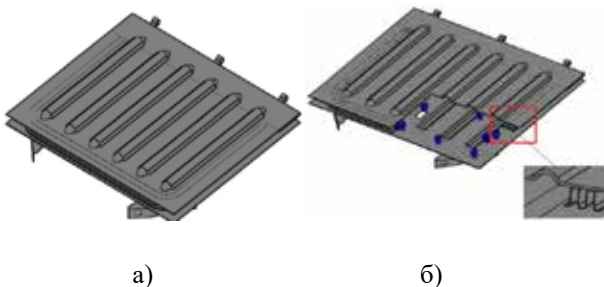


Рис. 4. Поліматеріальне каркасне виконання кришки люка напіввагона з міжлистовим Ш-подібним обв'язуванням
а) вид зверху; б) розміщення пружного елемента у кришці люка

Сучасні установки для кришок люків напіввагонів на залізниці

Розглянемо мобільну установку контролю та заміни люків напіввагонів (рисунок 5) містить малогабаритне гусеничне шасі з гідроприводом, встановлену на ньому платформу з рухомою кареткою та поворотною стійкою, що має шарнірно закріплену спрямовуючу, встановлену з можливістю повертатися (підніматися та опускатися) на осі у вертикальній площині. На направляючій у спеціальних кишенях встановлено захоплення для зняття та встановлення люка, а на трубах двигуна виконані бобишки, на які встановлюється з наступною фіксацією захоплення. Досягається підвищення зручності експлуатації, маневреності, прохідності мобільної установки.



Рис. 5. Мобільна установка правки та заміни люків напіввагонів

Машина на самохідному шасі з комплектом силових пристроїв, що здійснює безвідчипний ремонт рухомого залізничного складу. Основне призначення пристрою – правка та заміна люків напіввагону. Установка також забезпечує зняття та встановлення автозчеплення вагона, обладнання, вузлів та механізмів, розташованих під рамою вагона, підйом та подачу деталей у важкодоступні місця при монтажних та демонтажних роботах. Також є даний засіб з колісним шасі, який має недостатню прохідність.

Різноманітні стенди, сукупність систем та сучасного обладнання, зможуть знизити участь людського фактора у процесі виробництва продукції. Такі механізми дозволяють значною мірою прискорити виробничі процеси і поліпшити якість конструкцій і деталей, що випускаються, знижуючи до мінімуму можливість браку або припущення помилок.

Прилади для вимірювання товщини металу у різних видах виробничої діяльності

Для визначення товщини матеріалу або покриття використовують спеціальний прилад – товщиномір. Сфера застосування коли наприклад, критично важливо знати ступінь шару

іржі для багатьох типів обладнання та транспорту, шпаклівки, ґрунтовки та фарбуючого складу – у будівельно-монтажній області.

Ультразвуковий товщиномір PocketMIKE (Німеччина) (рисунок 6) портативний одноканалний прилад який використовується для ручного вимірювання товщини виробів з металів та сплавів, залишкової товщини стінок у місцях, що піддаються корозійному або ерозійному зносу. Діапазон вимірювань по сталі от 1,0 до 250 мм.



Рис. 6. Ультразвуковий товщиномір PocketMIKE

Вихрострумний товщиномір (рисунок 7) – високоточний сучасний прилад, призначений для визначення товщини покриття на металевій струмопровідній основі. Даний прилад призначений для визначення товщини покриття діелектричних та анодних покриттів на магнітних металах, наприклад: алюмінії, міді, латуні, немагнітної сталі. Приклад: вихрострумний товщиномір Sedge-42 призначений для вимірювання товщини виробів з ферромагнітних металів у діапазоні товщин: від 1 до 2000 мкм.



Рис. 7. Вихрострумний товщиномір Sedge-42

Пристрій даного виду високоточний на виробках з міді та алюмінію, ним можна вимірювати металеві об'єкти, на які не реагують магнітні моделі.

За допомогою товщиноміра можна без будь-яких дорогих експертиз зробити швидку діагностику автомобіля на предмет відновлення вм'ятин після аварії, а також перефарбовані фрагменти кузова, які могли зазнати корозії.

Контроль виробів перспективних (композитних) конструкцій.

Імпедансний метод контролю заснований на вимірі сили реакції, що прикладається до датчика об'єктом контролю. Даний метод доцільно застосовувати для контролю якості покриття робочих поверхонь деталей. Схема роботи імпедансного методу показана на рисунку 8.

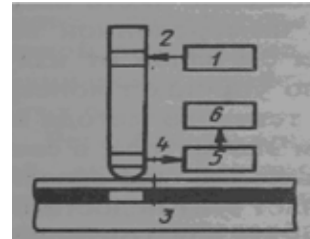


Рис. 8. Схема роботи імпедансного методу контролю (1 – генератор; 2 – випромінювач; 3 – об'єкт контролю; 4 – приймач; 5 – підсилювач; 6 – блок обробки інформації з індикатором)

Акустичний імпедансний дефектоскоп ІД-92НМ (рисунок 9) призначений для акустичного контролю виробів з композитних та інших матеріалів з великим загасанням за допомогою імпедансного методу та методу вільних коливань, на предмет визначення розшарування, непроклею, внутрішніх дефектів у виробках із шаруватих пластиків, композитних та стільникових матеріалів. Мінімальний розмір дефекту 5 мм (у виробках з композиційних матеріалів суміщеним перетворювачем).



Рис. 9. Акустичний імпедансний дефектоскоп ІД-92НМ

Акустичний імпедансний метод є найбільш поширеним засобом неруйнівного контролю з'єднань у багатошарових конструкціях та виробів із шаруватих пластиків. Акустичний дефектоскоп дозволяє підключати будь-які типи імпедансних (суміщені, роздільно-суміщені) і ударних (з п'єзоелементами або мікрофоном) перетворювачів.

Максимальна глибина виявлення дефекту у виробках із композиційних матеріалів роздільно-

сумісним перетворювачем – 13 мм (у конструкціях із алюмінієвих сплавів до 3 мм). Поєднаним перетворювачем – 4 мм (1,5 мм).

Висновки. Нами були розглянуті елементи кузова напіввагона. Типові та перспективні (композитні) конструкції кришок локів. Розглянуто обв'язування кришки гнутим листом товщиною 5 мм заповненим пружною (пружно-в'язкою) речовиною.

Похибка – важливий параметр пристроїв для вимірювання товщини покриття. Мінімальну цифру показують ультразвукові моделі – до 1%, решта – до 3%. Ультразвукова модель PocketMIKE (Німеччина) діапазон вимірювань по сталі от 1,0 до 250 мм.

Сучасні цифрові прилади мають опцію збереження вимірювань у пам'яті, працювати з ними дуже легко завдяки компактності та простоті управління. Також можна зробити висновок, що використання товщиномірів можна широко застосовувати на залізниці.

Низькочастотні (імпедансні) акустичні методи призначені для контролю з'єднань у багатошарових конструкціях та виробках із шаруватих пластиків. Імпедансні дефектоскопи визначаються чутливістю перетворювача. Мінімальний розмір дефекту, що виявляється, у виробках з композиційних матеріалів сумісним перетворювачем – 5 мм.

Список літератури:

1. Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Vaclav Pistek, Pavel Kucera Research of stability of containers in the combined trains during transportation by railroad ferry. MM Science Journal. Kyiv, March 2020. 3728-3733 p.
2. Oleksij Fomin, Alyona Lovska, Václav Pištěk, Pavel Kučera Dynamic load computational modelling of containers placed on a flat wagon at railroad ferry transportation. Vibroengineering Procedia. Kyiv, November 2019. Volume 29, 118-123 p.
3. Мартинов І.Е., Равлюк В.Г. Вагоноремонтні машини та обладнання: навч. посібник. УкрДАЗТ, Харків, 2013. Ч.2. 108 с.
4. Полувагон / Железнодорожный транспорт: Энциклопедия / гл. ред. Н.С. Конарев. Москва, 1994. 315 с.
5. Фомін О. В., Горбунов М. І., Коваленко В.В., Флярковська В.О. Формалізовані описання конструкцій кришок локів напіввагонів (частина 2). *Науковий журнал – Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2018. № 1(242). С. 145-152.
6. Коваленко, В.В. Покращення функціонування розвантажувальних пристроїв напіввагонів шляхом удосконалення їх конструкції та методів розрахунків: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.22.07 Рухомий склад залізниць та тяга поїздів; Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля. Сєвєродонецьк, 2019. 230 с.
7. Верютін М. В. Використання машинного навчання для виявлення дефектів композиційних матеріалів імпедансним методом : маг. дис. ... канд. тех. наук: спец. 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології; Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» м. Київ, 2018. 90 с.

Fomin O.V., Kozynka O.S. FUNDS OF CONTROL OF TYPICAL AND COMPOSITE HATCH COVERS OF GONDOLAS

This article is devoted to means of control of typical and composite hatch covers of gondolas, issues of improving the quality of maintenance of freight wagons, namely unloading devices of gondolas. A set of operations must be performed to ensure the safety of train travel, the safety of cargo and their timely delivery to their intended destination. Overloading of gondolas can affect the technical condition of the rolling stock and safety on the railways, it is necessary to monitor the condition of the unloading mechanisms and hatch covers of gondolas. The need for overloading and inspection of cargo on the way is a consequence of violation of loading rules, careless inspection of wagons in technical condition. Cargo is overloaded, as a rule, when the further passage of the wagon threatens the safety of traffic and may lead to loss, spoilage or damage to the cargo, and it is impossible to correct the situation without unloading. This article examines the means of controlling typical and composite manhole covers of gondolas, which will prevent the possible loss of bulk cargoes and increase the level of train traffic safety. Gondolas must be equipped with steps and handrails necessary for safe operation, as well as external and internal stairs. Inspection of the technical condition of unloading devices of gondolas should be monitored and checked. Malfunctions of unloading hatches of gondolas were determined and analyzed. Wagons must be suitable for the transportation of this cargo. Malfunctions of unloading devices of gondolas and methods of their elimination. A properly assembled manhole cover mechanism should be lifted by the efforts of one person. Typical and perspective (composite) designs of manhole covers were also considered. The article examines modern installations for manhole covers of gondolas on the railway. Devices for measuring the thickness of metal in various types of production activities were proposed. The impedance method of monitoring products of promising (composite) structures is considered.

Key words: gondolas hatch cover, control devices, universal gondola, safety of train movement.

Черненко П.В.

Національна академія Національної гвардії України

ПРОПОЗИЦІЇ ЩОДО ОБЛАДНАННЯ ДІЛЯНКИ ОБСЛУГОВУВАННЯ ТА РЕМОНТУ ПАЛИВНОЇ АПАРАТУРИ ДИЗЕЛЬНИХ ДВИГУНІВ СУЧАСНИМ УСТАТКУВАННЯМ

У статті проаналізовано основні підходи до існуючих методів діагностики та ремонту паливної системи дизельних двигунів, адже до 70% відмов дизельних двигунів припадає на паливну апаратуру. Аналіз наукової літератури дозволив нам систематизувати інформацію з даної проблематики та наголосити, що найбільш ефективними можна вважати такі методи, що не потребують розбирання, а найбільш точну оцінку технічного стану ПА можна дати з використанням методу діагностування за параметрами робочих процесів. Виходити з цього, пріоритетними можна вважати роботи, що спрямовані на створення технічних засобів діагностування, які забезпечують отримання точної інформації про фактичний технічний стан об'єкту діагностування без його розбору. Діагностичні системи доцільно створювати з урахуванням модульної основи, оскільки з'являється можливість створювати додаткові функції і можливості діагностування шляхом впровадження в систему.

Систематизовано можливі несправності за візуальними симптомами роботи двигуна та запропоновано шляхи їх усунення. Підтримано думку попередніх науковців стосовно значній ролі якості палива в коректній роботі двигуна. Наведено найбільш вагому негативні наслідки для паливної системи від неякісного дизеля. Дано характеристику найбільш поширеним стендам для діагностики паливної системи дизельного двигуна. Сказано, що при діагностуванні нерівномірності роботи циліндрів дизеля на усталених режимах його роботи використовується метод ідентифікації. Так як нерівномірність роботи циліндрів може бути викликана не тільки порушенням роботи паливної системи, але і технічним станом двигуна в цілому, для теоретичного обґрунтування діагностичних параметрів і змінних в алгоритмі цього методу використовуються відомі залежності динамічного розрахунку двигуна.

Описано технічні характеристики альтернативних стендів для обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів.

Ключові слова: несправності дизеля, закоксування, цетанове число, стенд діагностики, дизельні форсунки, M-107-CR, EC-700, DIESEL TECH DS2-11.

Постановка проблеми. Паливна система сучасного дизельного двигуна являє собою цілий комплекс складних за будовою пристроїв. Основне її завдання полягає в подачі певної кількості палива в заданий момент, із заданим тиском і якістю розпилу. Від параметрів подачі палива залежать такі показники дизельних двигунів, як ефективна потужність, питома ефективна витрата палива, склад відпрацьованих газів [8, с. 101]. Серед відомих використовуваних систем та дизельних двигунів автотранспортних засобів найбільш поширеною є система розділеного типу з багатоплунжерним паливним насосом високого тиску (ПНВТ), а способи його діагностування є трудомісткими, вимагають часткової розбирання та мають недостатню точність [6, с. 179].

Технічна діагностика дизельних двигунів внутрішнього згоряння спрямована на визначення технічного стану механізмів, функціональних систем і робочих процесів в дизельних двигунах

в умовах експлуатації. Для цього застосовуються засоби діагностування, за допомогою яких здійснюється контроль і пошук несправностей в механізмах і системах двигунів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Значний вклад у фундаментальні розробки методів діагностики стану дизельних двигунів внесли вітчизняні та закордонні вчені: Манаків А.Л., Колобов К.С., Крашенінников С.В., Ядрошніков О.В., Бабанін О.Б., Буряк М.

Постановка завдання. Розробити пропозиції щодо обладнання ділянки обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів сучасним устаткуванням.

Виклад основного матеріалу дослідження. У математичних моделях, що характеризують роботу паливних насосів високого тиску (ПНВТ) використовується велика кількість параметрів, що істотно впливають на якісну динаміку зміни значень тисків дизельного палива. Однак, у матеріа-

лах раніше опублікованих статей не розглядаються питання оцінки ступеня кількісного впливу, показників та функцій чутливості зміни параметрів математичних моделей на результати моделювання, відсутні рекомендації щодо ступеня чутливості та значущості кожного з параметрів [3, с. 51].

Для більш точного діагностування паливної апаратури дизеля доцільно використовувати кілька методів діагностування. Це дозволить знизити частку помилок при постановці діагнозу і знизити витрати на експлуатацію автомобільної техніки за допомогою скорочення трудомісткості технічного обслуговування і ремонту.

Порушення параметрів подачі палива призводить до перегріву деталей циліндро-поршневої групи і клапанів, їх закоксовування і підвищеного зносу. В результаті цього значно знижується ресурс двигуна, що призводить до необхідності його капітального ремонту або заміни. Наведені вище два варіанти є дорогими [2, с. 430].

Збільшення робочого ресурсу двигуна до капітального ремонту або списання можна збільшити якісним і своєчасним технічним обслуговуванням, а також розумною експлуатацією. В даному дослідженні проведемо аналіз найбільш ефективного устаткування для двигунів вантажних автомобілів (ЯМЗ–238Д, ТАТА 697NA, Hyundai HD 78 ХД78, Двигун Д–245).

На даний час достовірною є показник, що до 70% відмов дизельних двигунів припадає на паливну апаратуру. Проведений аналіз наукової літератури засвідчив, що дизельний автомобіль великої вантажопідйомності при пробігу 30–40 тисяч км на рік перевитратить в середньому 2–3 тони палива і збільшить викид в атмосферу шкідливих компонентів: окису вуглецю на 100–150 кг, незгорілих вуглеводнів – на 30–50 кг [1, с. 32]. При своєчасній діагностиці та технічному обслуговуванні паливної системи можливо знизити паливні втрати на 30–40% і продовжити термін служби дизельного двигуна на 15–20%.

Знос елементів паливної апаратури призводить до порушення теплового режиму роботи двигуна. Своєчасне технічне обслуговування, регулювання і ремонт паливної апаратури дизелів відновлює параметри впрыскування палива і продовжує надійну і безвідмовну роботу дизельного двигуна.

Контроль роботи фільтрів попередньої і тонкої очистки палива полягають в промиванні фільтруючих елементів при ТО–1 і заміні їх при виконанні операцій ТО–2. Засмічення очищувача повітря призводить до зниження потужності двигуна і перевитрат палива. Очистник повітря перевіряють при роботі на запилених дорогах при ТО–1, в умовах зимового періоду при ТО–2. Основні несправності та порушення нормальної роботи

Таблиця 1

Приблизний перелік операцій і періодичність технічного обслуговування паливної системи дизельних двигунів

Зовнішні ознаки несправності	Можлива причина несправності	Спосіб усунення
Утруднений пуск і нестійка робота двигуна	Порушення герметичності паливної системи	Перевірити герметичність, при порушенні усунути
Двигун працює нерівномірно, глухне або не розвиває достатньої потужності	Засмічення фільтруючих елементів паливних фільтрів	Промити або замінити фільтруючі елементи
Двигун глухне, не розвиває достатньої частоти обертання колінчастого валу	Відмова в роботі паливного насоса	Зняти і розібрати насос, при необхідності замінити деталі
Двигун не розвиває необхідної потужності, димний випуск	Закоксовування деталей КШМ і ГРМ	Перевірити та прочистити
Утруднений пуск і нерівномірна робота двигуна	Порушення нормальної роботи форсунок	Зняти форсунки і перевірити на приладі
Нерівномірна і «жорстка» робота двигуна, випуск диму чорного кольору	Порушення кута випередження уприскування палива	Перевірити і відрегулювати установку кута випередження упорскування
Нерівномірна робота двигуна зі стуками і димним випуском	Порушення регулювання ПНВТ	Перевірити і відрегулювати рівномірність подачі палива в циліндри
Двигун надмірно збільшує частоту обертання, йде " рознос"	Порушення роботи регулятора	Перевірити і відрегулювати регулятор або відремонтувати
Двигун не розвиває потужності	Забруднення очищувача повітря	Промити або замінити фільтруючий елемент

Джерело: Результати власних досліджень

паливної системи дизельного двигуна були нами систематизовані у вигляді табл. 1.

Таким чином, найважливішим правилом експлуатації є застосування якісного палива, яке істотно впливає на роботу паливної апаратури. А від якості роботи паливної апаратури залежать потужності і економічні показники двигуна.

Сучасні високофорсовані дизелі в більшій мірі схильні до сульфідної корозії, ніж двигуни старих конструкцій. При роботі сучасного дизеля на паливі, що містить підвищений вміст сірки, утворюється значно більше твердого і щільного нагару. Підвищений вміст сірки також помітно збільшує знос двигуна і паливної апаратури через сульфідну корозію, корозійний знос і швидке окиснення масла [10, с. 92]. Тому в моторному маслі для сучасних дизелів збільшений вміст омиваючих і диспергуючих присадок. А швидке окиснення масла при роботі на високосірчистих паливах вимагає його більш часті заміни. Тому саме через це термін заміни масла для умов України рекомендується скорочувати вдвічі в порівнянні з європейськими інструкціями [9, с. 139].

Наприклад, застосування палива з низьким цетановим числом призводить до збільшеного періоду затримки або запізнювання самозаймання. У цьому випадку в камері згоряння накопичується велика кількість палива, яка потім миттєво згорає (вибухове горіння). При таких умовах тиск в циліндрі наростає стрибкоподібно, відбувається жорстка робота дизеля (чується металевий стукіт), внаслідок цього відбувається велике навантаження на корінні підшипники, підвищується їх знос і більш швидкий вихід з ладу. Крім того збільшується витрата палива і димність відпрацьованих газів [12, с. 147].

Майже всі сучасні дизельні двигуни оснащені складними системами дизельного уприскування з електронним управлінням. У випадку несправності таких дизельних систем провести якісну діагностику і подальший ремонт без спеціального професійного обладнання неможливо. Попередня комп'ютерна діагностика дизельного двигуна дозволяє перевірити параметри роботи дизельної системи безпосередньо на двигуні. Дизельний стенд для діагностики дизельних форсунок і дизельних ПНВТ імітує роботу дизельного двигуна в різних режимах, для кожного типу дизельних форсунок і дизельних ПНВТ існує своя програма, яка дозволяє контролювати відповідність параметрів роботи дизельної апаратури заводом виробником [11, с. 415].

Перш ніж виконати ремонт дизельної форсунки або дизельного ПНВТ, необхідно визна-

чити характер несправності, і чи пов'язана взагалі погана робота двигуна з несправністю дизельної форсунки або дизельного ПНВТ.

Для діагностування паливної системи інструментальними методами використовується кілька алгоритмів оцінки відмов. Найбільш простим є метод порівняння, який заснований на порівнянні значень контрольованих змінних, що характеризують реакції діагностованої підсистеми дизеля і значень еталонних змінних, отриманих за діагностичними моделями цієї системи на задані тестові сигнали і «еталонного» об'єктів [4, с. 47].

При діагностуванні нерівномірності роботи циліндрів дизеля на усталених режимах його роботи використовується метод ідентифікації. Так як нерівномірність роботи циліндрів може бути викликана не тільки порушенням роботи паливної системи, але і технічним станом двигуна в цілому, для теоретичного обґрунтування діагностичних параметрів і змінних в алгоритмі цього методу використовуються відомі залежності динамічного розрахунку двигуна.

Ремонт дизельних форсунок і дизельного ПНВТ відбувається наступним чином: з урахуванням отриманих даних з діагностичного стенду проводиться повне розбирання і дефектовка внутрішніх деталей дизельних форсунок або дизельного ПНВТ, за допомогою спеціальних високоточних приладів, оцінюється ступінь зносу внутрішніх деталей і за результатами оцінки складається план заміни зношених деталей. Зношені деталі замінюються новими. Ремонт дизельних форсунок і ремонт дизельних ПНВТ закінчується складанням, регулюванням і повторною діагностикою на стенді [5, с. 59].

В якості прикладу можна вказати несправність, коли в результаті роботи дизельної форсунки на дизельному паливі низької якості, через наявні абразивні мікрочастинки в паливі сильно зношується кульковий керуючий клапан і посадочне місце клапана у втулці поршня. Внаслідок цього, порушується герметичність кулькового клапана і частина дизельного палива перетікає у великій кількості з контуру високого тиску в зворотний контур, так як при холодному запуску дизельного двигуна з системою дизельного уприскування тиску в паливній рампі потрібно більше, ніж при запуску прогрітого двигуна, то через скидання тиску через негерметичні кулькові клапани при повертанні стартером продуктивності ПНВТ може не вистачити і двигун не заведеться.

Ремонт дизельної форсунки з такою несправністю в кілька разів дешевше нової форсунки.

Інша поширена несправність, в процесі експлуатації дизельного двигуна на дизельному паливі низького якості є закоксування або оплавлення дюзи, розбризкування дизельного палива погіршується і знижується процес горіння дизельного палива в циліндрі, в результаті чого потужність дизельного двигуна знижується, витрата палива збільшується, двигун не рівно працює і димить. Ремонт дизельної форсунки в цьому випадку зводиться до заміни розпилювача [7, с. 57].

Серед сучасного обладнання, яке доцільно використовувати для ділянки обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів можна назвати такі комплектуючі стенду для

обслуговування дизельних інжекторів DIESEL TECH DS2–11, що включає: – вбудовану панель управління РК-дисплеєм, в якому покрокові робочі інструкції виводяться на дисплей; – напіваавтоматичний і ручний режими тестування; – діагностику електричних ланцюгів інжекторів (активного електроопору); – вакуумне очищення камери розпилення від парів тестової рідини; – функція захисту інжекторів в процесі тестування.

Серед відомих виробників інжекторів, з якими працюють стенди можна назвати Bosch, Delphi, Denso, Siemens CR, Cummins, CAT, Detroit Diesel, John Deere, Scania, Volvo, Iveco, VW, Mercedes Actros / Atego / Mack.

Таблиця 2

Технічні характеристики альтернативних стендів для обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів

№	Назва стенду	Основні технічні характеристики
1	Стенд для обслуговування дизельний інжекторів DIESEL TECH DS2–11	Частота вприскування 30–6000 імп. / Січ. (з кроком 10). Ширина імпульсу уприскування 200–200000 мсек (з кроком 100). Налаштування часу тестування 5–60.000 сек. Налаштування напруги управління інжекторами 1–150 В. Налаштування струму відкриття / утримання 1–35 А. Вимірювання об'єму 5–130 мл. Споживана потужність 250 Вт. Електроживлення, 100–250 / 50–60 В / Гц. Робочий тиск повітря 3–10 бар. Середній/максимальний витрата повітря 350 / 700 л/хв. Розміри 605x702x1015 мм. Вага 67 кг.
2	Стенд М–107–CR для повної діагностики форсунок дизелів	Діапазон відтворюваного тиску, 0... 40 (0... 400) МПа (кгс/см ²). Ємність для палива 2 л. Подача палива 1200 мм ³ / цикл. Габаритні розміри 480x456x716 мм. Маса 25 кг.
3	Стенд для перевірки дизельних форсунок ЕС–700 / 2	Робочий тиск 0–1800 бар. Температура 20–150 °С. Терморегулювання 40 °С. Кількість одночасно тестованих форсунок: 2. Електронна вимірювальна система 4 канали. Межа вимірювання 0–300 мл. Точність вимірювання 0,1%. Крок вимірювання 0,1 мл. Калібрувальне масло ISO 4113. Продуктивність 0,1–5 л/хв. Електроживлення 380В / 50Гц. Габаритні розміри 1800x800x1700 мм. Вага 680 кг.
4	Стенд для випробування і регулювання ПНВТ з цифровим дисплеєм 12PSDB	Потужність двигуна 5,5 кВт. Обороти двигуна 1440 об/хв. Кількість тестованих секцій 12. Висота від настановної плити до центру вихідного валу 125 мм. Висота робочого столу 940 мм. Ємність малих колб 45 мл. Ємність великих колб 150 мл. Ємність паливного бака 60 л. Габаритні розміри 1820 x1010x1800мм. Вага стенду 1000 кг.

№	Назва стенду	Основні технічні характеристики
5	Стенд для випробування і регулювання ПНВТ - 12PSDB75E	Потужність двигуна 7,5 кВт. Обороти двигуна 1500 об/хв. Кількість тестованих секцій 12. Висота від настановної плити до центру вихідного валу 125. Висота робочого столу 960 мм. Ємність малих колб 50 мл. Ємність великих колб 160 мл. Ємність паливного бака 65 л. Габаритні розміри 1850x1020x1820. Вага стенду 10 кг.
6	Стенд СДМ-8-3,7 для випробування, регулювання і ремонту ПНВТ	Частоти обертання приводного валу, 50-3000 хв - 1. Відліку числа обертів, 1-9999 об. Відліку числа 1-9999 циклів. Частоти обертання приводного валу в інтервалі від 70 до 800 хв - 1. Тиск палива насоса ПНВТ 0-0,6 МПа. Ємність паливного бака 38 л. Харчування 380 В. Габаритні розміри 1400x540x1740 мм. Вага 800 кг

Джерело: Результати власних досліджень

Підсвічена вбудованими світлодіодами високої яскравості, камера розпилення дає можливість чітко розглянути форму факела з метою діагностики неправильної форми факела, витоку і пошкодження інжекторів.

У комплект поставки стенду для обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів сучасним устаткуванням входить: – комплект адаптерів, фітінгів і електричних з'єднувачів для установки широкого ряду інжекторів систем CRI / MDI (адаптери для інжекторів CRIN – опція); – напівавтоматична ультразвукова (42 кГц) ванна з електронним контролем підігріву; – шланги високого і низького тиску; – змінні фільтри для тестової (2 мкм) і очищаючих (8 мкм) рідин; – резервуари для тестової (4 л) і очищаючих рідин (2,5 л).

Стенд M-107-CR для повної діагностики форсунок дизелів необхідний для випробування і регулювання дизельних форсунок і дизельних інжекторів системи Common Rail: електромагнітних BOSCH, Denso, DELPHY і п'єзоелектричних BOSCH, Denso, SIEMENS, знятих з двигуна. На стенді є пряма паливна магістраль для перевірки вібрації голки і звукових характеристик розпилювача. Вимірювання проводяться по стрілочному манометру.

В якості альтернативних стендів для обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів наведемо такі стенди, характеристики яких є в табл. 2.

Для перевірки дизельних форсунок системи Common Rail в стенд вбудований модулятор сиг-

налів. У комплект поставки модулятора сигналів входить 3 кабелі з прозорою ізоляцією для електромагнітних інжекторів – з роз'ємами для BOSCH, DELPHI і вантажних інжекторів, і два кабелі для п'єзоелектричних інжекторів – кабель з червоною ізоляцією для п'єзо інжекторів SIEMENS і кабель з червоною ізоляцією і червоними мітками для п'єзо інжекторів BOSCH.

Стенд для перевірки дизельних форсунок EC-700 / 2 дозволяє виконувати повний комплекс робіт, пов'язаних з ремонтом дизельних форсунок. Стенд оснащений потужним асинхронним двигуном потужністю 7,5 кВт. Діапазон робочого тиску апарату від 50 до 1800 бар дозволяє проводити роботи як з легковими, так і з вантажними автомобілями. Електронні датчики, якими оснащена дана модель, дозволяють вимірювати кількість подається і повертається в зворотну магістраль палива. Тестування форсунок виконується в повністю автоматизованому режимі, а результати виводяться на екран і можуть бути роздруковані на принтері.

Слід також зауважити, що на сьогоднішній день популярністю користуються наступні моделі стендів діагностування й очищення дизельних форсунок: FOCUS-DIESEL, Bosch DCI 700, Force 905G13.

Тестер тиску паливної системи є універсальним та достатньо популярним діагностичним приладом. Найбільш популярними моделями є пневмотестер для дизелів 938G1 Force.

Висновки. Проаналізовано основні підходи до існуючих методів діагностики та ремонту палив-

ної системи дизельних двигунів. Систематизовано можливі несправності за візуальними симптомами роботи двигуна та запропоновано шляхи їх усунення. Наведено найбільш вагому негативні наслідки для паливної системи від неякісного дизелю. Дано характеристику найбільш поширеним стендам для діагностики паливної системи

дизельного двигуна. Описано технічні характеристики альтернативних стендів для обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів. Даними стендами пропонується обладнання ділянки обслуговування та ремонту паливної апаратури дизельних двигунів в приміщеннях пунктів технічного обслуговування і ремонту.

Список літератури:

1. Бабанін О. Б., Буцький О. В. Аналіз методів діагностування паливної апаратури дизелів // Збірник наукових праць УкрДУЗТ, 2017, вип. 168. С. 31–37.
2. Бернштейн А. І., Чередник А. Г. проблеми технічної експлуатації паливної апаратури дизельних двигунів автомобілів // Міжнародний журнал прикладних і фундаментальних досліджень. 2015. № 8–3. С. 429–432.
3. Колобов К. С. Розробка методики експрес-діагностування дизеля // К. С. Колобов / LXXIII наукова конференція професорсько-викладацького складу, аспірантів, студентів та співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2017. С. 51.
4. Колобов К. С. Програмований технологічний процес експрес-діагностування дизеля // LXXIV наукова конференція професорсько-викладацького складу, співробітників відокремлених структурних підрозділів університету. К.: НТУ, 2018. С. 47.
5. Крашенінников С. В. Сучасні підходи до діагностування дизельних двигунів внутрішнього згоряння // Вісник Новосибірського державного педагогічного університету. 2013. № 2 (13). С. 58–69.
6. Манаков А. Л. Використання внутрішньоциклових параметрів обертання колінчатого вала для оцінки технічного стану двигунів внутрішнього згоряння // Наукові проблеми транспорту. 2014. № 3. С. 178–182.
7. Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу // Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. Дніпропетровськ, 2012. Вип. 41. С. 56–60.
8. Огневий В.О. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів. Вінниця: ВНТУ, 2021 121 с.
9. Розум Р., Буряк М. Методологія діагностування автомобільних дизельних двигунів // Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. 2022. № 1 (18), 138–142.
10. Тригуб О. А. Технологічне обладнання для обслуговування та ремонту автомобілів: навч. посіб. [Електронний ресурс]. Черкаси: ЧДТУ, 2021. 187 с.
11. Ядрошніков О. В. Управління технічним станом парків транспортних і технологічних машин на основі діагностування // Прогресивні технології в транспортних системах. 2015. С. 415–421.
12. Rozum R. I., Shevchuk O. S., Prohni P. B. Optimization of working processes of internal combustion engines with the purpose of improving their environmentality. Modern engineering and innovative technologies. Sergeieva&Co Karlsruhe (Germany) 2022. Issue 19. Part 1. P. 147–150.

Chernenko P.V. PROPOSALS FOR EQUIPMENT OF THE MAINTENANCE AND REPAIR SITE OF DIESEL ENGINE FUEL EQUIPMENT WITH MODERN EQUIPMENT

The article analyzes the main approaches to the existing methods of diagnosis and repair of the fuel system of diesel engines, because up to 70% of diesel engine failures are due to the fuel equipment. The analysis of the scientific literature allowed us to systematize information on this issue and to emphasize that the methods that do not require disassembly, can be considered as the most effective, and the most accurate assessment of the technical condition of the PA can be given using the method of diagnosis based on the parameters of work processes. Proceeding from this, priority can be given to works aimed at creating technical means of diagnosis, which ensure obtaining accurate information about the actual technical condition of the object of diagnosis without its analysis. It is advisable to create diagnostic systems taking into account the modular basis, as it becomes possible to create additional functions and diagnostic capabilities by introducing them into the system.

Possible malfunctions based on visual symptoms of engine operation are systematized, and ways to eliminate them are proposed. The opinion of previous scientists regarding the significant role of fuel quality in the correct operation of the engine is supported. The most significant negative consequences for the fuel system from low-quality diesel are given. The characteristics of the most common stands for diagnosing the fuel system of a diesel engine are given. It is said that the identification method is used to diagnose uneven operation of diesel

cylinders at established operating modes. Since uneven operation of the cylinders can be caused not only by a malfunction of the fuel system, but also by the technical condition of the engine as a whole, for the theoretical justification of the diagnostic parameters and variables in the algorithm of this method, known dependencies of the dynamic calculation of the engine are used.

Technical characteristics of alternative stands for maintenance and repair of fuel equipment of diesel engines are described.

Key words: *diesel malfunctions, coking, cetane number, diagnostic stand, diesel injectors, M-107-CR, EC-700, DIESEL TECH DS2-11.*

УДК 341.24

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/49>**Чупайленко О.А.**

Національний транспортний університет

Білоус М.В.

Національний транспортний університет

Колесник Ю.О.

Національний транспортний університет

Поліщук Р.В.

Національний транспортний університет

ВИЗНАЧЕННЯ ТРАНСПОРТНИХ І МИТНИХ РИЗИКІВ У МІЖНАРОДНИХ ВАНТАЖНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ МЕТОДОМ ЕКСПЕРТНИХ ОЦІНОК

Транспорті і митні ризики формується із низки економічних ризиків різних учасників зовнішньоекономічної діяльності. Зокрема у міжнародному постачанні товарів, зазвичай, беруть участь виробник товару, експортер, перевізник, імпортер, яким притаманний свій спектр економічних ризиків. До основних джерел та сфер виникнення митних ризиків потрібно зараховувати: митний режим, характер порушення, мета порушення (умисел), вид товару, стосовно якого може бути вчинене порушення. Зокрема за митним режимом ризики виникають при: імпорті, реімпорті, експорті, реекспорті, транзиті, тимчасовому ввезенні (вивезенні), на митному складі, у спеціальній митній зоні, магазині безмитної торгівлі, при переробці на митній території України, переробці за межами митної території України, знищенні або руйнуванні, відмові на користь держави.

Задачею аналізу взаємозв'язку порушення функцій системи з виникненням ситуацій, що загрожують виникненням ризиків, є встановлення функціональних зв'язків між станом елементів системи та параметрами споживачів, а також можливими ситуаціями, які можуть виникати у разі реалізації загроз виникнення ризику.

Для розрахунку кількісного значення ризиків необхідні дослідження, пов'язані з експертною оцінкою кожного етапу доставки окремо, що тягне за собою велику кількість розрахунків. Визначення ваги митних ризиків проводилося за методом Делфі.

Для опитування було вибрано 10 незалежних експертів. Опитування було проведено за тими митними ризиками, з якими найчастіше зустрічаються на практиці учасники зовнішньоекономічної діяльності і які є найбільш розповсюдженими у роботі митних органів. Опитування було проведено на п'яти митницях, на яких студенти проходять виробничу практику.

Водночас для розв'язання існуючих проблем і сприяння розвитку діяльності вітчизняних товаровиробників на зовнішніх ринках необхідно забезпечити: розвиток ринкової та транспортної інфраструктури, зокрема підприємств із надання страхових, консалтингових, інжинірингових, експедиторських послуг; підтримку експорту вітчизняних товаровиробників; удосконалення форм фінансових розрахунків під час зовнішньоторговельних операцій; посилення ролі державного регулювання зовнішньоторговельної діяльності; оптимізацію структури експорту та імпорту, розширення товарної пропозиції та стимулювання процесу надходження іноземного капіталу.

Ключові слова: транспортні і митні ризики, міжнародні вантажні перевезення, метод Делфі, джерела митних ризиків.

Постановка проблеми. Виявлення джерел транспортних і митних ризиків при міжнародних вантажних перевезеннях дозволить розробити й обґрунтувати ефективність заходів щодо мінімізації митних ризиків, які виникають під час здійснення зовнішньоекономічних операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Митний ризик формується із низки економічних ризиків різних учасників зовнішньоекономічної діяльності. Зокрема у міжнародному постачанні товарів, зазвичай, беруть участь виробник товару, експортер, перевізник, імпортер, яким притаманний свій спектр економічних ризиків.

Згідно із Порядком розроблення профілів ризиків, який затверджений Наказом Державної митної служби України [1, с. 45] до основних джерел та сфер виникнення митних ризиків потрібно зараховувати: митний режим, характер порушення, мета порушення (умисел), вид товару, стосовно якого може бути вчинене порушення. Зокрема за митним режимом ризики виникають при: імпорті, реімпорті, експорті, реекспорті, транзиті, тимчасовому ввезенні (вивезенні), на митному складі, у спеціальній митній зоні, магазині безмитної торгівлі, при переробці на митній території України, переробці за межами митної території України, знищенні або руйнуванні, відмові на користь держави.

Можливими характеристиками порушення є: неправильна класифікація товару, неправдиві дані про походження товару, заниження/завищення митної вартості товару, недекларування товару, контрабанда/приховування від митного контролю, неправильні дані про підстави надання пільг зі сплати митних платежів, неправильні дані про характеристики/властивості товару, декларування товару не своїм найменуванням. Серед ймовірних цілей порушення в порядку запропоновано виокремлювати: ухилення від сплати/зменшення розміру ввізного мита, ухилення від сплати/зменшення розміру вивізного мита, ухилення від сплати/зменшення розміру особливого виду мита (антидемпінгового, спеціального, компенсаційного, відшкодування ПДВ), ухилення від сплати/зменшення розміру акцизного збору, використання митних пільг, ухилення від нетарифних обмежень. Вирізняють такі види товарів, стосовно яких може бути вчинене порушення: товари сільськогосподарського виробництва, метали та брухт, товари, які містять об'єкти права інтелектуальної власності, отруйні, радіоактивні, вибухові речовини, небезпечні відходи, наркотичні засоби, психотропні речовини, зброя та боєприпаси, історичні та культурні цінності, міжнародна торгівля дикими видами тварин та рослин, що перебувають під загрозою зникнення [2, с. 10].

Система управління ризиками (СУР) ґрунтується на наступних базових принципах побудови, які забезпечують вирішення основних завдань митної служби [3, с. 55]:

- принцип цільової спрямованості;
- принцип цілісності, що полягає в розробці та використанні митною службою функціональних підсистем управління ризиками;
- принцип інформаційної єдності;
- принцип законності;
- принцип єдності управління ризиками.

Транспортні ризики – ризики, які виникають у зовнішньоекономічній діяльності при укладенні зовнішньоекономічних угод, а саме при переміщенні товару від продавця (постачальника) до покупця.

Під час здійснення перевезень у міжнародному сполученні організації всіх типів і розмірів стикаються з внутрішніми і зовнішніми факторами і впливами, через які стає неможливо визначити, яким чином і коли вони досягнуть своїх цілей. Зокрема з проблемами та різноманітними ризиками. На сьогоднішній день існують такі проблеми: недосконале законодавство і перевищення маси вантажу.

Основними видами транспортних ризиків є: ризик невірною визначення моменту передачі відповідальності за вантаж у процесі транспортування; ризик вибору транспортного засобу; ризик пошкодження вантажу при перевезенні.

З 2012 р., коли були визначені основні види ризиків, пройшов певний час і тому треба уточнити, які види ризиків найбільш частіші і які треба враховувати у системі управління ризиками для підвищення ефективності роботи митної системи.

Формулювання цілей статті. Розробка й обґрунтування ефективності заходів щодо мінімізації транспортних і митних ризиків, які виникають під час здійснення зовнішньоекономічних операцій.

Виклад основного матеріалу. Причинами митних ризиків можуть бути наступні порушення: неправильна класифікація товару, неправдиві дані про походження товару, заниження/завищення митної вартості товару, недекларування товару, контрабанда/приховування від митного контролю, неправильні дані про підстави надання пільг зі сплати митних платежів, неправильні дані про характеристики/властивості товару, декларування товару не своїм найменуванням. Серед ймовірних цілей порушення в порядку запропоновано виокремлювати: ухилення від сплати/зменшення розміру ввізного мита, ухилення від сплати/зменшення розміру вивізного мита, ухилення від сплати/зменшення розміру особливого виду мита (антидемпінгового, спеціального, компенсаційного, відшкодування ПДВ), ухилення від сплати/зменшення розміру акцизного збору, використання митних пільг, ухилення від нетарифних обмежень. Вирізняють такі види товарів, стосовно яких може бути вчинене порушення: товари сільськогосподарського виробництва, метали та брухт, товари, які містять об'єкти права інтелектуальної власності, отруйні, радіоактивні, вибухові речовини, небезпечні відходи, наркотичні засоби, психотропні речовини, зброя та боєприпаси, історичні та культурні цінності, міжнародна

торгівля дикими видами тварин та рослин, що перебувають під загрозою зникнення [4, с. 44].

Для дослідження функціонування систем існують моделі комбінаційних об'єктів, які передбачають два підходи: функціональний та структурний. Функціональний підхід заключається у розгляді тільки алгоритмів функціонування об'єкту, тобто функцій, що реалізується об'єктом. Структурний підхід передбачає дослідження не тільки функцій, які реалізуються, а також внутрішню організацію чи структуру об'єкту. Для дослідження даної системи більш підходить структурна математична модель комбінаційного дискретного об'єкту, під якою приймають правильну логічну мережу (схему).

Задачею аналізу взаємозв'язку порушення функцій системи з виникненням ситуацій, що загрожують виникненням ризиків, є встановлення функціональних зв'язків між станом елементів системи та параметрами споживачів, а також можливими ситуаціями R_j , які можуть виникати у разі реалізації загроз виникнення ризику.

Такі ситуації можна класифікувати таким чином [5, с. 262]:

R_0 – нейтральна ситуація, яка не приводить до виникнення ризику ($R_0=0$);

R_1 – ускладнена ситуація, яка може привести у майбутньому до виникнення ризиків ($R_1=0,2$);

R_2 – загроза виникнення ризику ($R_2=0,4$);

R_3 – потенційне виникнення ризику ($R_3=0,6$);

R_4 – фактичне виникнення ризику ($R_4=0,8$);

R_5 – подальше збільшення ризику при фактичному виникненню ризику ($R_5=1$).

Кожній із можливих загроз виникнення ризиків присвоюється індекс Z_j , у якій j – порядковий номер фактору. В результаті аналізу встановлена залежність між потенційними факторами та обсягами ризику, а також встановлена імовірність її реалізації.

Комбінацію значень вхідних змінних Z_1, Z_2, \dots, Z_n комбінаційно-дискретного об'єкту з n входами прийнято називати вхідним набором і позначати символом Z_j . Комбінацію значень вихідних функцій r_1, r_2, \dots, r_n комбінаційного об'єкту прийнято називати вихідним набором і позначати R_j . Вихідні функції R_j являються булевими функціями вхідних змінних Z_j , для задання яких використовують матрицю бінарних станів об'єктів або матрицю істинності. Стовпчикам та рядками матриці є вхідні функції об'єкту. На перетині відповідних (ідентичних) рядків та стовпчиків вихідне значення параметру системи R_j , до якого призводить поява вхідного параметру Z_i . На перетині кожного рядку зі стовпчиком вказується значення

рангу вихідного параметру R_j , до якого призводить сумісна дія двох вхідних факторів.

Для визначення стану імовірності виникнення ризику Q_j необхідно застосувати метод мінімальних перерізів. Під мінімальним перерізом мається на увазі така мінімальна сукупність елементів системи, яка може привести до виникнення ризику. Їх визначення суттєво спрощується при використанні методу «дерева подій». У даному випадку деревом подій є графічне відображення зв'язку реалізації вище визначених факторів з обсягами ризику (R_j). «Дерево подій» дозволяє наглядно показати слабкі місця системи [6, с. 358].

Виходячи з даних табл.1, виділяють елементи загроз (ситуації R_j), які в залежності від логічного взаємозв'язку поєднують між собою за допомогою матриці бінарних станів системи. Послідовність побудови «дерева подій»:

Виникнення ситуацій:

R_0 обумовлено проявом фактору Z_{13} ;

R_1 обумовлено проявом факторів $Z_2, Z_6, Z_8, Z_9, Z_{12}, Z_{15}, Z_{17}$;

R_2 обумовлено проявом факторів Z_1, Z_5, Z_{10}, Z_{19} , а також сумісною дією факторів Z_8 та Z_{15} , Z_9 та Z_{12} , Z_6 та Z_{17} ;

R_3 обумовлено проявом факторів Z_3, Z_4, Z_{16}, Z_{20} , а також сумісною дією факторів Z_1 та Z_5 , Z_{19} та Z_{10} ;

R_4 обумовлено проявом факторів $Z_7, Z_{11}, Z_{14}, Z_{18}$, а також сумісною дією факторів Z_3 та Z_4 , Z_{16} та Z_{20} ;

R_5 обумовлено сумісною дією факторів Z_{11} та Z_{14} , Z_{18} та Z_5 , Z_3 та Z_4 , Z_{14} та Z_{16} , Z_{19} та Z_{12} , Z_3 та Z_7 .

Виходячи з цього, ймовірність виникнення ситуації може бути описана розрахунковою моделлю:

Для нейтральної ситуації:

$$Q R_0 = Q(Z_{13}) \quad (1)$$

Для ускладненої ситуації:

$$Q R_1 = Q(Z_2) + Q(Z_6) + Q(Z_8) + Q(Z_9) + Q(Z_{12}) + Q(Z_{15}) + Q(Z_{17}) \quad (2)$$

Для загрози виникнення ризику:

$$Q R_2 = Q(Z_1) + Q(Z_5) + Q(Z_{10}) + Q(Z_{19}) + Q(Z_8) * Q(Z_{15}) + Q(Z_9) * Q(Z_{12}) + Q(Z_6) * Q(Z_{17}) \quad (3)$$

Для потенційного виникнення ризику:

$$Q R_3 = Q(Z_3) + Q(Z_4) + Q(Z_{16}) + Q(Z_{20}) + Q(Z_1) * Q(Z_5) + Q(Z_{19}) * Q(Z_{10}) \quad (4)$$

Для фактичного виникнення ризику:

$$Q R_4 = Q(Z_7) + Q(Z_{11}) + Q(Z_{14}) + Q(Z_{18}) + Q(Z_3) * Q(Z_4) + Q(Z_{16}) * Q(Z_{20}) \quad (5)$$

Для подальшого збільшення ризику при фактичному ризику:

$$Q(R_5) = Q(Z_{11}) * Q(Z_{14}) + Q(Z_{18}) * Q(Z_5) + Q(Z_3) * Q(Z_4) + Q(Z_{14}) * Q(Z_{16}) + Q(Z_{19}) * Q(Z_{12}) + Q(Z_3) * Q(Z_7) \quad (6)$$

Характеристика стану елементів системи

Індекс фактору	Вид фактору	Складові елементи	Вид ситуації Ri
Z ₁	Затримки на внутрішній митниці	Митні ризики	R1
Z ₂	Черги на пунктах пропуску		R2
Z ₃	Неправильно нараховані митні платежі		R2
Z ₄	Заниження митної вартості		R2
Z ₅	Недостовірне декларування		R3
Z ₆	Перевищення маси вантажу при зважуванні		R1
Z ₇	Невизначений код товару		R1
Z ₈	Відсутність потрібних сертифікатів		R3
Z ₉	Затримка під час навантажувально-розвантажувальних робіт	Ризики при н/р роботах	R2
Z ₁₀	Неправильне укладення вантажу		R2
Z ₁₁	Пошкодження вантажу		R2
Z ₁₂	Перевищення маси вантажу при навантаженні	Ризики при перевезенні	R3
Z ₁₃	Зміна вартості пального		R3
Z ₁₄	Втрата вантажу		R1
Z ₁₅	Неповнота документів, необхідних для перевезення		R1
Z ₁₆	Недотримання термінів доставки		R3
Z ₁₇	Правильність оформлення документів	Ризики при оформленні документів	R1
Z ₁₈	Недекларування товарів		R2
Z ₁₉	Приховування інформації		R3
Z ₂₀	Затримка при оформленні документів		

Для розрахунку кількісного значення ризиків необхідні дослідження, пов'язані з експертною оцінкою кожного етапу доставки окремо, що тягне за собою велику кількість розрахунків. Далі наведемо порядок визначення ваги ризику за методом Делфі [6, с. 357].

Метод «Дельфі» - метод швидкого пошуку рішень, заснований на їх генерації в процесі мозкової атаки, яку вели групою фахівців, і відбору кращого рішення виходячи з експертних оцінок. Дельфійський метод використовується для експертного прогнозування шляхом організації системи збору та математичної обробки експертних оцінок. Метод «Дельфі» - спосіб вибору та оцінки рішення з проблем, за якими відчувається брак інформації.

Для опитування було вибрано 10 незалежних експертів (співробітники п'яти митниць, на яких проходили практику студенти). Опитування було проведено за тими митними ризиками, з якими найчастіше зустрічаються на практиці учасники зовнішньоекономічної діяльності і які є найбільш розповсюдженими у роботі митних органів [7 с. 124; 8 с. 156]. Експерти виставили оцінки від 1 до 10, де 1 – найвища оцінка. А саме:

- затримки під час митного оформлення;
- огляд товарів на митниці на митниці з додатковими витратами на завантаження – виванта-

ження та відновлення товарного вигляду розкритим упаковкам;

- витрати пов'язані з проведенням експертизи товарів;
- зміна митницею заявленого коду УКТЗЕД, що тягне збільшення сплати обов'язкових митних платежів або отримання додаткових дозвільних документів;
- коригування митницею заявленої митної вартості, що тягне збільшення сплати митних платежів;
- відмова митниці від надання учаснику ЗЕД пільгового режиму;
- припинення митного оформлення товарів на підставі даних митного реєстру об'єктів права інтелектуальної власності, які охороняються згідно закону;
- заявлення в митній декларації товарів віднесених до групи «ризик» або групи «прикриття» (список визначає ДМСУ);
- розбіжності відомостей, що містяться в електронному повідомленні, яке надійшло з митного органу відправлення, документі контролю доставки або книжці МДП, з відомостями, заявленими у МД, якщо зазначені розбіжності призведуть до зменшення величини належних до сплати митних зборів і податків.

Метод «Дельфі» ґрунтується на принципі, що стверджує, що незалежні експерти (у більшості

випадків незв'язані і навіть не знають один про одного) можуть набагато краще оцінити і передбачити результат, ніж чим спеціально організований колектив.

Результати чисельного анкетування експертів у табл. 2.

Отже, проаналізувавши чисельні оцінки експертів, можна зробити висновок, що найпоширенішим є ризик «Затримки під час митного оформлення». А також, в трійку найпоширеніших входять – «витрати пов'язані з проведенням експертизи товарів» та «огляд товарів на митниці з додатковими витратами на завантаження – вивантаження та відновлення товарного вигляду розкритим упаковкам».

Прорахуємо коефіцієнт конкордації. Коефіцієнт конкордації характеризує ступінь погодженості суджень експертів по всім напрямкам. При оцінці узгодженості думок експертів важливо визначити, в якій мірі кожний експерт впливає на узагальнену узгодженість групи. Для цього послідовно з роз-

рахунків виключається один експерт та обчислюється коефіцієнт конкордації без врахування думок виключеного експерта. Виключати з розрахунків окремих експертів, що мають оригінальну точку зору, необхідно з великою обережністю. В процесі багатотурової експертизи можливі випадки, коли такі експерти повернуть на свій бік значну частину групи. Результати розрахунків рангів по першим трьом видам ризиків наведено у табл. 3.

Розрахунок відхилення показників:

$$d = \sum x_{ij} - \frac{\sum \sum x_{ij}}{n} = \sum x_{ij} - 55 \quad (7)$$

Оцінка середнього ступеня узгодженості думок всіх експертів:

Коефіцієнт конкордації:

$$W = \frac{12S}{m^2(n^3 - n)} \quad (8)$$

де $S = 5520, n=10, m=10$

$$W = \frac{12 \times 5520}{10^2 (10^3 - 10)} = 0,669 \quad (9)$$

Таблиця 2

Результати чисельного анкетування експертів

№	Експерти/Ризики	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ
1	Витрати пов'язані з проведенням експертизи товарів	2	1	3	4	3	4	5	2	4	5	33
2	Огляд товарів на митниці з додатковими витратами	3	5	2	1	2	3	6	1	5	1	29
3	Затримки під час митного оформлення	1	2	1	3	1	1	2	3	1	2	17
4	Зміна митницею заявленого коду УКТЗЕД	6	4	5	2	4	2	1	5	3	4	36
5	Коригування митницею заявленої митної вартості	4	9	4	6	6	5	4	6	2	6	52
6	Відмова митниці від надання учаснику ЗЕД пільг	7	8	10	7	5	10	3	4	10	3	67
7	Відмова митниці від надання учаснику ЗЕД преференцій	5	3	6	5	9	9	8	8	9	10	72
8	Призупинення митного оформлення товарів на підставі даних митного реєстру	9	10	9	10	7	8	9	9	7	8	86
9	Заявлення в митній декларації товарів віднесених до груп «ризиків»	10	7	8	9	8	7	10	7	6	7	79
10	Розбіжності відомостей, що містяться в електронному повідомленні	8	6	7	8	10	6	7	10	8	9	79

Таблиця 3

Розрахунок рангів по видам ризиків

Ризики / Експерти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Σ рангів	d	d ²
x ₁	2	1	3	4	3	4	5	2	4	5	33	-22	484
x ₂	3	5	2	1	2	3	6	1	5	1	29	-26	676
x ₃	1	2	1	3	1	1	2	3	1	2	17	-38	1444
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
X ₁₀	8	6	7	8	10	6	7	10	8	9	79	24	576
Σ	55	55	55	55	55	55	55	55	55	55	550	-	5520

Коефіцієнт конкордації приймає значення від 0 до 1. Чим більше значення коефіцієнта конкордації, тим більший ступінь узгодженості думок експертів. При $W=1$ є повна узгодженість думок експертів; якщо $W=0$, то узгодженість практично відсутня. Коефіцієнт конкордації дорівнює 0,669 це свідчить про наявність середнього ступеня узгодженості думок експертів.

Висновки. При побудові ієрархічної структури ризиків, розподілено фактори ризику, які впливають на процес доставки вантажів. Визначили, що найвпливовішою групу ризиків є митні ризики. Серед них впливовими та важливими є ризик затримки часу під час митного оформлення, невідомого коду товару, ризик черг на пунктах пропуску, неправильного нарахування митних платежів та інші.

Таким чином, проведений аналіз сучасного стану зовнішньоекономічної діяльності України на світовому ринку свідчить про те, що вона супроводжується значною кількістю обмежень і труднощів, які зумовлюють торговельні ризики. У вітчизняній та зарубіжній літературі розрізняють кілька видів ризиків у торговельній діяльності на зовнішньому ринку: ринкові (збутові), які пов'язані зі зниженням попиту на певних зарубіжних ринках або зі зниженням світових цін; політичні, які пов'язані з введенням обмежень, ембарго, воєнного стану, тощо; комерційні, які зумовлені недобросовісністю або неплатоспроможністю покупця; виробничі (зміни собівартості продукції та послуг через ріст затрат на матеріали та комплектуючі, на оплату праці тощо, труднощі організації виробництва, реалізації, підготовці кадрів, тощо); науково-технічні, які зумовлені

труднощами освоєння нових технологій під час ліцензійного обміну, спільної діяльності; інфляційні; валютні, які пов'язані з можливою зміною валютного курсу; непередбачувані ризики, які пов'язані зі стихійним лихом та іншими нездоланими труднощами.

Проведений аналіз і структуризація ризиків, а також використання відповідних адекватних економіко-математичних моделей дають змогу приймати правильні рішення в цій сфері діяльності.

Проаналізувавши чисельні оцінки експертів, можна зробити висновок, що найпоширенішим є ризик «Затримки під час митного оформлення». А також, в трійку найпоширеніших входять – «витрати пов'язані з проведенням експертизи товарів» та «огляд товарів на митниці на митниці з додатковими витратами на вантаження – вивантаження та відновлення товарного вигляду розкритим упаковкам». Розрахунок середнього ступеня узгодженості думок експертів показало достатній рівень узгодженості.

Воднораз для розв'язання існуючих проблем і сприяння розвитку діяльності вітчизняних товаровиробників на зовнішніх ринках необхідно забезпечити: розвиток ринкової та транспортної інфраструктури, зокрема підприємств із надання страхових, консалтингових, інжинірингових, експедиторських послуг; підтримку експорту вітчизняних товаровиробників; удосконалення форм фінансових розрахунків під час зовнішньоторговельних операцій; посилення ролі державного регулювання зовнішньоторговельної діяльності; оптимізацію структури експорту та імпорту, розширення товарної пропозиції та стимулювання процесу надходження іноземного капіталу.

Список літератури:

1. Байда Н.В. Ризики зовнішньоторговельної діяльності//Фінанси України. 2020. № 11. С. 44-47.
2. Беднарська О.Р. Особливості планування ризиків зовнішньоекономічної діяльності машинобудівних підприємств//Збірник статей Національного університету Львівська політехніка. 2018. С. 8-12.
3. Закомлистов С.В., Управління ризиками зовнішньоекономічної діяльності на підприємстві//Інвестиції: практика і досвід. № 13. 2019. С. 55-56.
4. Кузьмін О.Є., Подольчак Н.Ю. Врахування фактору ризику при плануванні зовнішньоекономічної діяльності//Вісник Львівської політехніки. № 11. 2018. С. 43-48.
5. Припарникова І.Ю. Шляхи підвищення ефективності зовнішньоекономічних операцій підприємств//Економічний простір. 2018. № 13. С. 260-268.
6. Сишук А.А. Фактори та ризики участі фірми у транскордонних економічних операціях//Науковий вісник Волинського національного університету імені Лесі Українки. 2019. № 3. С. 356-360.
7. Чупайленко О.А., Колесник Ю.О. Управління ризиками міжнародних перевезень вантажів//VII Міжнародна науково-практична конференція. «Eurasian Scientific Discussions». Барселона, Іспанія. 2022. Рр. 122-129.
8. Чупайленко О.А., Колесник Ю.О. Ризики під час доставки вантажів у міжнародному сполученні//Міжнародна наукова конференція «Особливості інноваційного розвитку у сфері техніки: порівняльний досвід України та Європейського Союзу». 2022. Влоцлавек. Республіка Польща. С. 154-159.

Chupaylenko O.A., Bilokur M.V., Kolesnyk Yu.O., Polishchuk R.V. DETERMINATION OF TRANSPORT AND CUSTOMS RISKS IN INTERNATIONAL TRUCK TRANSPORTATION USING THE METHOD OF EXPERT ASSESSMENTS

Transport and customs risks are formed from a number of economic risks of various participants in foreign economic activity. In particular, the international supply of goods usually involves the manufacturer, exporter, carrier, and importer, each of which has its own range of economic risks. The following are the main sources and areas of occurrence of customs risks: customs regime, the nature of the violation, the purpose of the violation (intention), the type of goods, in relation to which the violation may be committed. In particular, according to the customs regime, risks arise during: import, re-import, export, re-export, transit, temporary import (export), in a customs warehouse, in a special customs zone, a duty-free shop, during processing in the customs territory of Ukraine, processing outside the customs territory of Ukraine, destruction or destruction, refusal in favor of the state.

The task of analyzing the relationship between system malfunctions and the occurrence of situations threatening the occurrence of risks is to establish functional relationships between the state of system elements and consumer parameters, as well as possible situations that may arise in the event of the realization of threats of risk occurrence.

Calculating the quantitative value of risks requires research related to the expert assessment of each stage of delivery separately, which entails a large number of calculations. Determination of the weight of customs risks was carried out according to the Delphi method.

10 independent experts were selected for the survey. The survey was conducted on those customs risks that are most often encountered in practice by participants in foreign economic activity and which are the most widespread in the work of customs authorities. The survey was conducted at five customs offices where students undergo practical training.

At the same time, in order to solve existing problems and promote the development of activities of domestic producers in foreign markets, it is necessary to ensure: development of market and transport infrastructure, in particular enterprises providing insurance, consulting, engineering, forwarding services; export support of domestic producers; improvement of forms of financial calculations during foreign trade operations; strengthening the role of state regulation of foreign trade activity; optimization of the structure of export and import, expansion of product supply and stimulation of the process of foreign capital inflow.

Key words: *transport and customs risks, international cargo transportation, Delphi method, sources of customs risks.*

БУДІВНИЦТВО

УДК 614.841

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/50>

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Савченко О.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Добряк Д.О.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

КРИТЕРІЇ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СИСТЕМ ПРОТИПОЖЕЖНОГО ЗАХИСТУ НА ІНДИВІДУАЛЬНИЙ ПОЖЕЖНИЙ РИЗИК

За результатами аналізу наукових праць щодо дослідження ефективності технічних систем встановлено перелік показників їх надійності: безвідмовність, ефективне функціонування, довговічність, збереження, ремонтпридатність.

Обґрунтовано, що під час досліджень впливу систем протипожежного захисту (далі – СПЗ) на рівень індивідуального пожежного ризику, слід використовувати такий показник надійності, як ефективне функціонування.

Обґрунтовано критерії, які обумовлюють закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. Встановлено, що під час дослідження доцільно розглянути два можливі варіанти розвитку подій, а саме відповідна система протипожежного захисту не функціонує та коли відповідна система протипожежного захисту функціонує. При цьому для таких можливих варіантів розвитку подій значення індивідуального пожежного ризику можливо встановити щонайменше двома шляхами: із використанням методів теорії ймовірності та із використанням польових моделей, які засновані на повній системі диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса. В роботі запропоновано алгоритм дослідження закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику та розроблено відповідний порядок. Розглянуті сценарії пожеж, під час яких доцільно досліджувати закономірність впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику. Сформульовані напрямки для подальших досліджень.

Ключові слова: критерії надійності систем протипожежного захисту, індивідуальний пожежний ризик, системи протипожежного захисту, системи протипожежного захисту, показники надійності.

Постановка проблеми: у роботі [1] встановлено актуальність роботи щодо удосконалення СПЗ та методології з управління індивідуальним пожежним ризикам шляхом виявлення коефіцієнтів ефективного функціонування систем протипожежного захисту як підґрунтя такого удосконалення.

Однією із задач вирішення, якої допоможе досягти поставленої мети є обґрунтування критеріїв із використанням яких можливо дослідити вплив систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.

Тому актуальним є розроблення порядку дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику із

використанням відповідних критеріїв, які обумовлюють закономірності зазначеного впливу.

Аналіз основних досліджень і публікацій. За результатами наукових досліджень встановлено, що під час встановлення надійності та працездатності будь-якої технічної системи дослідниками [2-4] використовуються різні комбінації показників, що можуть описувати процеси надійного функціонування технічних систем, серед них зокрема можна виділити такі показники: безвідмовність, ефективне функціонування, довговічність, збереження, ремонтпридатність.

Показник безвідмовності характеризується такими критеріями, як імовірність, відсоток нароби-

ток, середнє напрацювання до відмови, інтенсивність відмов. Даний показник дає можливість встановити кількісні дані щодо спрацювання чи не спрацювання певної системи протипожежного захисту [5].

Показник ефективного функціонування характеризується кількісним впливом функціонування відповідного типу системи протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, тобто визначається співвідношенням значення індивідуального пожежного ризику без функціонування відповідної системи протипожежного захисту до значення індивідуального пожежного ризику із функціонуванням відповідної системи протипожежного захисту. Даний показник є важливим під час оцінювання впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, оскільки саме за допомогою цього показника можна встановити кількісні дані щодо ефективного функціонування певної системи протипожежного захисту [6]. Тому саме цей показник надійності використовуємо під час дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику. Крім того, саме такий показник реалізований національним стандартом [6].

Показник довговічність характеризується таким критерієм, середній термін служби. Даний показник не має прямого впливу під час оцінювання впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, але пов'язаний із показником безвідмовності [7].

Показник збереження характеризується таким критерієм, як термін зберігання. Даний показник не має прямого впливу під час оцінювання впливу систем протипожежного захисту на індивідуальний пожежний ризик, але пов'язаний із показником безвідмовності [8].

Показник ремонтпридатності характеризується такими критеріями, як ймовірність відновлення, середній час відновлення. Даний показник також не має прямого впливу під час оцінювання впливу систем протипожежного захисту на значення індивідуального пожежного ризику, але пов'язаний із показником безвідмовності системи [9].

Постановка завдання. Метою даної роботи є обґрунтувати порядок дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику та критерії, які обумовлюють закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.

Для досягнення поставленої мети сформовані та вирішені наступні задачі:

– проведено аналіз досліджень і публікацій, щодо показників надійності, які використовують під час оцінки надійного функціонування технічних систем;

– встановлено критерії, які обумовлюють закономірності впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику;

– обґрунтовано порядок дослідження впливу систем протипожежного захисту на рівень індивідуального пожежного ризику.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до [6] розрахункове значення індивідуального пожежного ризику $R_{i,i}$ розраховується за формулою:

$$R_{i,i} = Q_{п,i} \cdot P_{пр,i} \cdot (1 - P_{с,i}) \cdot (1 - K_{спз,i}) \cdot (1 - K_{о.з.}) \cdot (1 - K_{п.ф.}), \quad (2.1)$$

Отже такі параметри, як частота виникнення пожежі, ймовірність перебування людей у будівлі та споруді, ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди, коефіцієнт запровадження організаційних заходів протипожежного захисту та коефіцієнт наявності протипожежних формувань у розрізі індивідуального пожежного ризику пов'язані із коефіцієнтом ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту.

Частота виникнення пожежі залежить від ефективності функціонування систем протипожежного захисту і є лише елементом перевірки того, на скільки ефективно вплинула під час функціонування та чи інша система протипожежного захисту на наслідки від пожежі. Тому під час обґрунтування впливу систем протипожежного значення на індивідуальний пожежний ризик зміною частоти виникнення пожежі можна знехтувати, а його значення можна прийняти сталим для всіх випадків, що розглядаються під час досліджень.

Ймовірність перебування людей у будівлі та споруді залежить від часу продовж якого можливе перебування людей у будівлі чи споруді. І хоч параметр ймовірність перебування людей у будівлі та споруді та коефіцієнт ймовірної ефективності спрацювання систем протипожежного захисту пов'язані між собою через значення індивідуального пожежного ризику, на рівні залежності один від одного спільних критеріїв не мають. Тому під час обґрунтування впливу систем протипожежного значення на індивідуальний пожежний ризик зміною параметра, а ймовірність перебування людей у будівлі та споруді також можна знехтувати.

Ймовірність евакуації людей із будівлі чи споруди залежить від співвідношення трьох проміжків часу це: тривалість евакуації людей із будинку чи споруди

у разі пожежі, тривалості початку евакуації людей та тривалості настання критичних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі.

Імовірність евакуації людей P_e із будівлі чи споруди залежно від значень проміжків часу, які розраховують за формулою:

$$P_e = \begin{cases} 0,999 \cdot \frac{0,8 \cdot t_{\text{ба}} - t_p}{t_{\text{пе}}}, \text{ якщо } t_p < 0,8 \cdot t_{\text{ба}} < t_p + t_{\text{пе}} \text{ та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,999, \text{ якщо } t_p + t_{\text{пе}} \leq 0,8 \cdot t_{\text{ба}} \text{ та } t_{\text{ск}} \leq 6 \text{ хв} \\ 0,000, \text{ якщо } t_p \geq 0,8 \cdot t_{\text{ба}} \text{ або } t_{\text{ск}} > 6 \text{ хв} \end{cases}, \quad (2.2)$$

Тривалість евакуації людей із будинку чи споруди у разі пожежі залежить від об'ємно-планувальних рішень, зокрема довжини ширини евакуаційних шляхів та виходів, а також від кількості людей, які перебувають в будівлі чи споруді та підлягають евакуації, на даний параметр ефективність спрацювання СПЗ не впливає. Тривалість початку евакуації людей залежить від наявності таких систем протипожежного захисту, як автоматичні системи пожежної сигналізації (далі АПС) та системи оповіщення про пожежі та управління евакуацією людей (далі – СО), що залежить від інерційності спрацювання зазначених систем, як наслідок зазначений параметр (тривалість початку евакуації людей) залежить від ефективності спрацювання СПЗ, зокрема таких як АПС та СО. Тривалість настання критичних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі залежить як від об'ємно-планувальних рішень об'єкту (площа, висота будівлі, особливостей його планування так і від конструктивних і технологічних особливостей об'єкту (характеристика за пожежною безпекою речовин і матеріалів, які використані в будівельних конструкціях, оздоблювальних матеріалах, вид та кількість пожежної навантаги як постійної так і тимчасової, яка використовується на об'єкті), як наслідок зазначений проміжок часу залежить від наявності на об'єкті, таких систем протипожежного захисту як: автоматичні системи пожежогасіння, системи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання, системи протидимного захисту. Таким чином зазначений параметр (тривалість настання критичних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі) залежить від ефективності спрацювання СПЗ, зокрема таких як автоматичні системи пожежогасіння (далі – АСПГ), системи внутрішнього та зовнішнього протипожежного водопостачання (далі – СВЗП) та системи протидимного захисту (далі – СПДЗ).

Отже, час настання небезпечних для життя людини значень відповідними чинниками пожежі також можна використати під час оцінювання впливу СПЗ на значення ІПР. Зокрема, стандартом

[6] визначений такий перелік небезпечних чинників пожежі: полум'я і іскри, підвищена температура оточуючого середовища, токсичні продукти згоряння і термічного розкладання, дим, знижена концентрація кисню. При цьому, стандартом [6] встановлені гранично допустимі значення за кожним з небезпечних чинників пожежі.

За досвіду проведених численних розрахунків [10-12] встановлено, що найбільш швидким по настанню гранично допустимих значень є критерій втрати видимості. Тому саме критерій втрати видимості використовуємо в подальших наших дослідженнях щодо впливу СПЗ на значення ІПР.

Такі параметри, як коефіцієнт запровадження організаційних заходів протипожежного захисту та коефіцієнт наявності протипожежних формувань залежать від організації керівником суб'єкта господарювання належного виконання встановлених [13] вимог пожежної безпеки та створення ним на об'єкті протипожежних формувань. І хоча параметри таких коефіцієнтів пов'язані із коефіцієнтом ймовірної ефективності спрацювання СПЗ через значення ІПР, на рівні залежності один від одного спільних критеріїв не мають.

Таким чином вплив на значення ІПР мають такі СПЗ: АПС, СО, АСПГ, СПДЗ, а також такі інженерні системи, як СВЗП.

Згідно із [6] значення коефіцієнту ймовірної ефективності спрацювання для відповідних систем протипожежного захисту ($K_{\text{спз}}$) розраховується за формулою:

$$K_{\text{спз}} = (1 - K_{\text{спс}}) \cdot (1 - K_{\text{аспг}}) \cdot (1 - K_{\text{со}}) \cdot (1 - K_{\text{спдз}}) \cdot (1 - K_{\text{свзп}} \cdot K_{\text{со}}), \quad (2.3)$$

Отже суттєвими показниками надійності СПЗ є їх ефективність функціонування. При цьому, такий показник надійності СПЗ під час оцінювання їх впливу на ІПР можна виразити через тривалість досягнення граничного стану для життя людини таким небезпечним чинником пожежі, як втрата видимості.

Під час дослідження впливу систем протипожежного захисту на значення ІПР слід порівняти між собою два можливі варіанти розвитку подій, а саме: перший варіант, коли пожежа відбувається і відповідна СПЗ не функціонує при цьому кількісно оцінюють наслідки від такої пожежі встановлюється значення ІПР та другий варіант, коли пожежа відбувається та спрацьовує відповідна СПЗ при цьому також кількісно оцінюються наслідки від пожежі (встановлюється значення ІПР). Шляхом порівняння кількісних значень наслідків від пожеж (ІПР) за двома варіантами сценаріїв їх розвитку можна отримати коефіцієнт ймовірної ефективності спрацювання СПЗ.

Значення ІПР для двох варіантів розвитку подій (відповідна СПЗ функціонує та не функціонує) визначаємо двома шляхами: із використанням методів теорії ймовірності реалізація яких здійснюється за рахунок статистичних даних та із використанням польових моделей, які засновані на повній системі диференціальних рівнянь Нав'є-Стокса реалізація яких здійснюється за рахунок комп'ютерного моделювання.

Статистичні дані, які потрібні для реалізації методів теорії ймовірності повинні давати відповідні по таким питанням:

- кількість об'єктів, які оснащені відповідною СПЗ;
- кількість об'єктів, які згідно із нормативних документів повинні оснащуватися відповідною СПЗ;
- кількість відповідних СПЗ, по яким дотримуються регламенти технічного обслуговування;
- кількість спрацювань під час пожеж відповідних СПЗ;
- кількість пожеж, які ліквідуються на їх початковій стадії;
- кількість пожеж, які ліквідуються із залученням пожежно-рятувальних підрозділів;
- кількість пожеж на ліквідаціях, яких залучаються додаткові сили і засоби;
- кількість пожеж в наслідок, яких гинули люди.

Із отриманих значень коефіцієнтів ймовірної ефективності спрацювання СПЗ під час реалізації методів теорії ймовірності та польової моделі для

остаточного рішення обираємо значення, яке найменше знижує значення ІПР для кожної СПЗ.

Алгоритм дослідження закономірності впливу СПЗ на рівень ІПР наведено на рисунку 1.

Розглянемо більш детально можливі шляхи досліджень кожного із двох варіантів можливих подій для відповідних СПЗ.

АПС та СО – в даному випадку для дослідження порівняльним критерієм є час виявлення людьми пожежі та початок ними процесу евакуації. Як зазначалося вище граничним критерієм слід прийняти втрату видимості, яка фіксується на рівні 1,7 м від рівня підлоги. У разі відсутності системи для фіксації часу виявлення людьми пожежі слід прийняти час, коли ознаки пожежі (дим) з'являються у суміжному приміщенні відносно приміщення де розташовується джерело горіння (модельне вогнище пожежі) на рівні нижче від підвісної стелі, що легко візуально спостерігати. При цьому простір над підвісною стелею доцільно прийняти таким що є спільним для приміщення де знаходиться модельне вогнище пожежі та приміщення де фіксуються наявність ознак пожежі (диму).

У разі наявності системи для фіксації часу виявлення людьми пожежі слід прийняти час спрацювання зазначених систем та подавання відповідного сигналу тривоги про пожежу. При цьому сигнал тривоги про пожежу слід запрова-

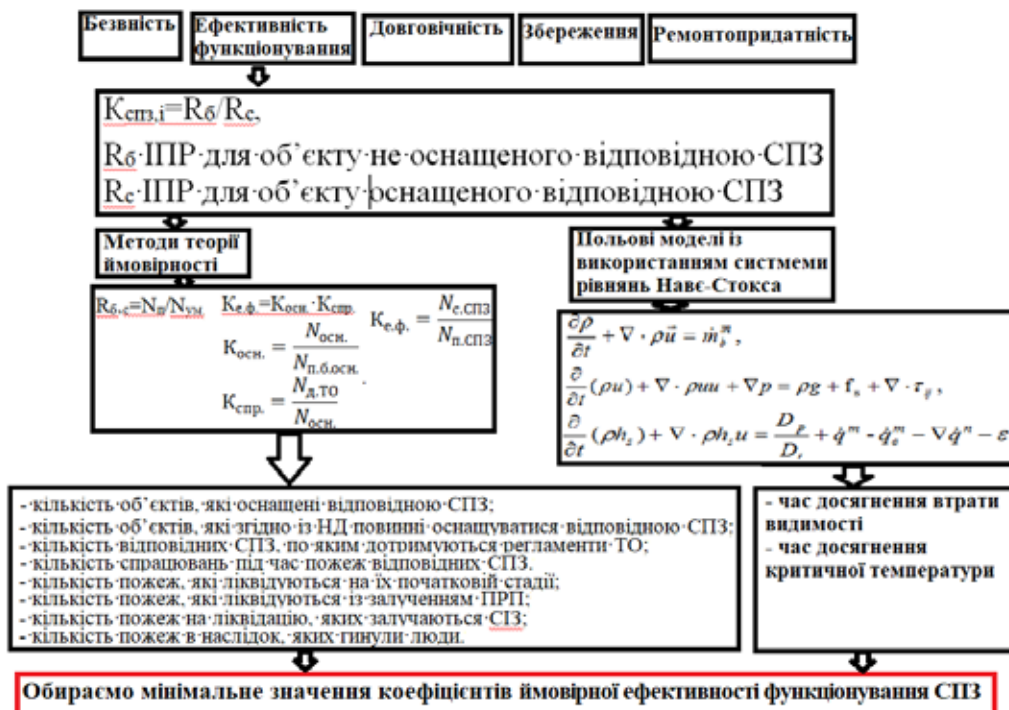


Рис. 1. Алгоритм дослідження закономірності впливу СПЗ на рівень ІПР

Сценарії розвитку пожеж під час, яких доцільно досліджувати вплив СПЗ на значення ІПР

№ п/п	Сценарій пожежі	Критерій для дослідження
1.	АПС, СО, СЗВП, СПДЗ	Час виявлення людьми пожежі та початок процесу евакуації. Без системи – ознаки пожежі фіксують у суміжному приміщенні, із приміщенням розташування осередку пожежі, нижче рівня підвісної стелі.
	АСПГ	Із системою – ознаки пожежі фіксують за часом спрацювання системи пожежної сигналізації. Зміна показника видимості в часі. Даний показник видимості фіксується на рівні 1,7 м від рівня приміщення у двох частинах випробувального боксу. Здійснюється порівняння закономірності зміни зазначеного показника для варіанту із системою пожежогасіння та без системи пожежогасіння

дити за алгоритмом «і» спрацювання пожежного сповіщувача у частині приміщення де розташовується модельне вогнище пожежі «і» у просторі над підвісною стелею.

АСПГ – в даному випадку для дослідження порівняльним критерієм є зміна показника видимості в просторі як для приміщення де знаходиться модельне вогнище пожежі так і суміжного приміщення.

СВЗП та СПДЗ – ефективність впливу зазначених систем доцільно порівняти до таких систем як АПС та СО, оскільки функціонування таких систем без оператора в автоматичному режимі не можливо. А обслуговуючий персонал може приступити до гасіння пожежі тільки у разі його оповіщення про пожежу.

З урахуванням зазначеного розроблено опис сценаріїв розвитку пожеж під час, яких можливо здійснити дослідження закономірності впливу СПЗ на значення ІПР, що наведено у таблиці 1. Зазначені сценарії слід обирати під час постановки розрахункових задач, а в подальшому під час планування експериментальних досліджень.

На підставі вищезазначеного порядок дослідження закономірності впливу СПЗ на рівень ІПР повинен містити такі процедури:

1. Встановлюємо перелік параметрів, які характеризують вплив СПЗ на значення ІПР.
2. Розробляємо опитувальну анкету для збору статистичних даних.
3. Проводимо узагальнення зібраних статистичних даних.
4. Обираємо математичний метод для обробки статистичних даних.
5. Будуються геометричні моделі з прикладанням граничних умов та обґрунтовуємо сценарії розрахунку.
6. Організовується цикл в ході якого змінюється чинник, які характеризують вплив СПЗ на значення ІПР.
7. Визначаємо та обробляємо зазначені чинники.

8. Під час розгляду різних сценаріїв пожежі фіксуємо наявність чи відсутність впливу відповідної СПЗ.

9. Здійснюється порівняння результатів дослідження наслідків від пожежі, які отримані із урахуванням наявності відповідної СПЗ із результатами дослідження наслідків від пожежі без урахуванням впливу СПЗ.

10. Встановлення коефіцієнтів впливу СПЗ на значення ІПР.

Висновки.

1. Показником надійності для випадку дослідження впливу СПЗ на значення ІПР є ефективність функціонування СПЗ. Зазначений показник можна виразити через тривалість настання граничних значень для життя людини небезпечними чинниками пожежі, найшвидший із них який досягається під час пожеж втрата видимості, який можна дослідити через коефіцієнт задимленості.

2. Обґрунтовано, що дослідження коефіцієнту ймовірної ефективності спрацювання СПЗ, який встановлює кількісне значення їх впливу на значення ІПР слід здійснювати під час розгляду паралельної реалізації двох варіантів розвитку пожежі та наслідків від неї: із функціонуванням відповідної СПЗ, без функціонування відповідної СПЗ.

3. Обґрунтовані сценарії розвитку пожежі, які доцільно застосовувати під час дослідження закономірності впливу СПЗ на значення ІПР.

4. Показано, що оцінювання впливу СПЗ на значення ІПР можна здійснити двома шляхами із використанням теорії ймовірності на основі статистичних даних та із використанням методу, який заснований на польових моделях та засобів обчислювальної газодинаміки.

5. Запропоновано алгоритм дослідження впливу СПЗ на значення ІПР та встановлення відповідних коефіцієнтів ймовірності ефективного спрацювання СПЗ та розроблено відповідний порядок.

6. В подальших дослідженнях необхідно дослідити коефіцієнти ймовірних ефектів спрацювання СПЗ шляхом реалізації методу теорії ймовірності та польових моделей.

Список літератури:

1. Ніжник В., Савченко О., Добряк Д., Кравченко Н. Аналіз сучасного стану управління індивідуальним пожежним ризиком із використанням систем протипожежного захисту Науковий журнал «Вчені записки таврійського національного університету імені В.І. Вернадського Серія: Технічні науки», Том 33 (72) № 1. Київ: 2022. – С. 328-333.
2. Stephen G. Badger, Thomas Johnson. 1999 Large Loss Fires and Explosions. NFPA Journal. November / December 2000. – p.79-82.
3. В.В. Холщевников, Б.Б. Серков / Значимость автоматических систем протиповоженной защиты для обеспечения безопасности людей в высотных зданиях / Журнал Пожаровзрывобезопасность – 2017. – Т.26 №9 С. 44 – 49.
4. Фан А. Ле Н. З. Анализ мероприятий по снижению пожарной опасности в высотных жилых зданиях // Журнал пожарной безопасности ИПБ Республики Вьетнам. -2015. – Т. 77. С. 20 – 23.
5. Kallenberg O. Foundation of Modern Probability – Springer – Verlag, 1997.
6. Оценка надежности технических систем: учеб. пособие /А.С. Ширшиков, В.В. Лянденбургский, А.М. Белоковылский. –Пенза: ПГУАС, 2015. – 240 с.
7. Gray R.M. Probability, Random Processes and Ergodic Properties-Springer-Verlag, 1987.
8. Durrett R. Probability, Probability, Theory and Examples – Wadsworth Publishing, 1996.
9. Брушлинский Н.Н. Снова о рисках и управлении безопасностью систем. Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях ВИНТИ. 2002, № 4. С. 230-234.
10. Дишкант О.В., Дивень В.І., Доценко О.Г., Савченко О.В. Чинники, які впливають на швидкість евакуації ХХІІ-ий том міжнародної колективної монографії "MODERNÍ ASPEKTY VĚDY" ("Сучасні аспекти науки"), Київ: 2022. – С.516-526.
11. О. М. Тесленко, С. З. Цимбалістий, Н. В. Кравченко, О. Г. Доценко, О. М. Крикун Аналіз існуючих програмних комплексів для розрахунку часу евакуації людей під час пожежі. Науковий вісник: Цивільний захист та пожежна безпека № 1 (7), 2019. – С. 33-39.
12. М. В. Білошицький, Н. В. Кравченко, О. М. Тесленко, Д. О. Добряк, С. З. Цимбалістий Деякі питання токсичної дії продуктів горіння на людину ІХ Всеукраїнська науково-практична конференція з міжнародною участю «Надзвичайні ситуації: безпека та захист», НУЦЗУ ЧПБ ім. Героїв Чорнобиля: 2019. С. 19 – 24.
13. Наказ МВС України від 06.06.2017 № 470 зареєстрований в Міністерстві юстиції України 29 червня 2017 р. за № 795/30663 Про затвердження Правил пожежної безпеки на ринках України.

Nizhnyk V.V., Savchenko O.V., Dobriak D.O. CRITERIA FOR STUDYING THE INFLUENCE OF FIRE PROTECTION SYSTEMS ON INDIVIDUAL FIRE RISK

Based on the results of the analysis of scientific works on the study of the effectiveness of technical systems, a list of their reliability indicators was established: infallibility, efficient functioning, durability, preservation, maintainability.

It is substantiated that during studies of the impact of fire protection systems (hereinafter – FPS) on the level of individual fire risk, such a reliability indicator as effective functioning should be used.

The criteria were substantiated, determining patterns of influence of fire protection systems on the level of individual fire risk. It has been established that in the study it is advisable to consider two possible scenarios for the development of events, namely, when the corresponding fire protection system is not functioning and when the corresponding fire protection system is functioning. At the same time, for such possible variants of the development of events, it is possible to establish the value of individual fire risk in at least two ways: using the methods of probability theory and using field models, which are based on the complete system of Navier-Stokes differential equations. The paper proposes an algorithm for studying the regularity of the influence of fire protection systems on the level of individual fire risk and develops an appropriate procedure. Scenarios of fires were considered, during which it is advisable to investigate the regularity of the influence of fire protection systems on the value of individual fire risk. Directions for further research were formulated.

Key words: *reliability criteria of fire protection systems, individual fire risk, fire protection systems, fire protection systems, reliability indicators.*

Ніжник В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Присяжнюк В.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Савченко О.В.

Інститут державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

АНАЛІЗ СУЧАСНОГО СТАНУ ЗАСТОСУВАННЯ ЗАСОБІВ ДИМО- ТА ТЕПЛОВИДАЛЕННЯ ПОЖЕЖНО-РЯТУВАЛЬНИМИ ПІДРОЗДІЛАМИ

У цій публікації наведено статистичні дані про пожежі в Україні та актуальність застосування засобів димо- та тепловидалення під час гасіння пожеж у житловому секторі. Наведено порівняльний аналіз технічних характеристик засобів димо- та тепловидалення, що експлуатуються у провідних країнах світу та Україні. Встановлено, що нагнітання свіжого повітря у приміщення є найефективнішим порівняно з відсмоктуванням загазованого повітря. Зазначено, що застосування комбінованого способу управління газовими потоками за допомогою засобів димо- та тепловидалення дає змогу знизити температурний вплив на людину на основних шляхах евакуації. З'ясовано фактори, що підвищують ефективність гасіння пожеж із застосуванням пожежних димососів. Наведено основні ознаки, за якими класифікують пожежні димососи. Розглянуто нормативно-технічні документи та патенти на засоби димо- та тепловидалення, способи та прийоми їх застосування. Визначено основні технічні характеристики, які впливають на ефективність роботи засобів димо- та тепловидалення. Акцентовано увагу на математичних моделях, які описують процес видалення небезпечних чинників пожеж із приміщень та будівель. Зазначено потреба виконання подальших досліджень з метою встановлення закономірності залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик, як наукового підґрунтя удосконалення таких засобів. Визначено основні задачі досліджень, які необхідно в подальшому вирішити.

Ключові слова: засоби димо- та тепловидалення, управління газовими потоками, пожежі у житловому секторі.

Постановка проблеми: Аналіз світових інформаційно-аналітичних матеріалів за останні п'ять років вказує, що кожного року близько 40 % пожеж виникають у будівлях житлового сектору. На рис. 1 наведено статистику пожеж. Статистичні дані про пожежі свідчать, що під час гасіння пожеж у житлових будівлях в 50 % випадків застосовуються ланки газодимозахисної служби (далі – ГДЗС). Як такі пожежі супроводжуються небезпечними чинниками пожежі, що значно ускладнює проведення рятувальних робіт та пожежогасіння. В Україні під час гасіння пожеж із застосуванням ланок ГДЗС щорічно близько 30 пожежників отримують травми різного характеру.

Вагомим тактичним способом зниження такого впливу на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів є керування теплорозсілювальними потоками пожежі за допомогою переносних засобів димо- та тепловидалення (пожежних димосмоктувачів), які функціонально призначені для локального підвищення повітряного тиску шля-

хом нагнітання повітря до зони роботи особового складу або видалення продуктів горіння з приміщень в умовах пожежі для нормалізації температурного і повітряного середовища.

Найбільш поширеним і застосовуваним на практиці засобом димо- та тепловидалення є переносний засіб з функцією нагнітання чистого повітря у зону горіння. Основним технічним параметром яких є продуктивність нагнітання повітря і вона становить від 11 000 до 24 000 м³/год. Тому питання підвищення продуктивності засобу димо- та тепловидалення для більш ефективної роботи щодо гасіння пожеж пожежними підрозділами шляхом удосконалення окремих його елементів є актуальним науковим завданням.

Аналіз основних досліджень і публікацій. Питаннями удосконалення технічних рішень спрямованих на покращення роботи засобів димо- та тепловидалення займалися такі вчені Paul H Wiedorn, Jurgen Bader, William L. Jackman, Konz Lufttechnik та інші. Їхні роботи були направлені

на модифікацію конструктивних елементів та покращення експлуатаційних характеристик цих засобів. У зазначених роботах більшість технічних рішень стосуються спрямуванню потоку повітря створюваного лопатями вентилятора.

Наукові дослідження, спрямовані на осадження продуктів горіння, зниження температури та збільшення видимості в задимлених приміщеннях наведено в роботах Ковалишина В.В., Луца В.І., Штангерета Н.О., Tuomisaari M. та інших.

Проте слід відзначити, що в наведених роботах не досліджувались питання встановлення закономірності залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від зміни їх технічних параметрів, зокрема площі та кута лопатей вентилятора.

Постановка завдання. Метою даної роботи є провести дослідження сучасного стану технічного розвитку засобів димо- та тепловидалення. Для досягнення поставленої мети поставлені та вирішені такі завдання:

- проведено аналіз статистичних даних виникнення пожеж в Україні;
- проведено аналіз нормативних та патентних досліджень засобів димо- та тепловидалення, а також їх конструктивних параметрів, які впливають на покращення основних характеристик;
- досліджені існуючі тактичні прийоми застосування засобів димо-та тепловидалення;
- математичні моделі, що описують процес димо- та тепловидалення з приміщень будинків та споруд із використанням засобів димо- та тепло-видалення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Відповідно до [1] гасіння пожежі – дії, спрямовані на припинення горіння в осередку пожежі, обмеження впливу її небезпечних факторів та усунення умов для самовільного відновлення пожежі після гасіння. Для гасіння пожеж застосовуються спеціальне захисне спорядження та засоби захисту.

Значна кількість випадків гасіння пожеж пов'язана із небезпечним впливом на особовий склад небезпечних чинників пожежі. Статистичні дані про їх кількість виникнення та ліквідацію у період з 2018 по 2022 рік наведено на рис. 1. Так статистика пожеж свідчить про те, що щорічно у будівлях житлового сектору виникає 40 % пожеж від загальної їх щорічної кількості.

Під час гасіння пожеж для захисту особового складу і роботи у непридатному для дихання середовищі відповідно до [2] обов'язково застосовуються апарати на стисненому повітрі та відповідно формуються ланки ГДЗС, які виконують вищезазначені функції [3-5]. Так статистичні дані свідчать про те, що щорічно під час гасіння пожеж використання ланок ГДЗС становить 20–25 % від загальної щорічної кількості пожеж. Статистичні дані про кількість застосування ланок ГДЗС у період з 2018 по 2022 роки наведено на рис. 2.



Рис. 1. Статистичні дані про кількість пожеж у період з 2018 по 2022 роки

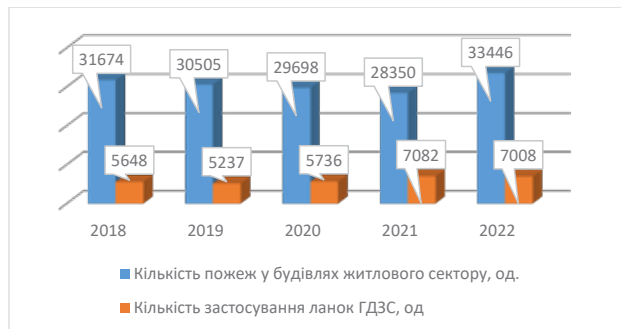


Рис. 2. Статистичні дані про кількість застосування ланок ГДЗС у період з 2018 по 2022 роки

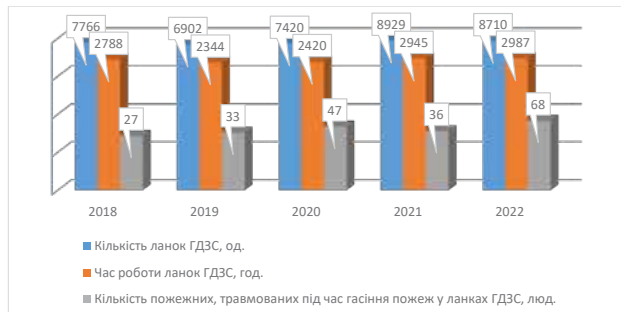


Рис. 3. Статистичні дані про кількість травмованих пожежних під час гасіння пожеж у ланках ГДЗС за період з 2018 по 2022 роки

За результатами аналізу стану виробничого травматизму у підрозділах ДСНС України встановлено, що основними причинами травмування рятувальників на пожежах є гасіння пожеж у ланках ГДЗС. За період з 2018 по 2022 роки відповідно до статистичних даних в Україні під час гасіння пожеж за допомогою ланок ГДЗС отримали травми 194 рятувальника [6]. Статистичні дані про кількість травмованих пожежних під час гасіння пожеж у ланках ГДЗС за період з 2018 по 2022 роки наведено на рисунку 3.

Пожежна статистика свідчить, що за період з 2018 по 2022 роки для забезпечення безпечної роботи

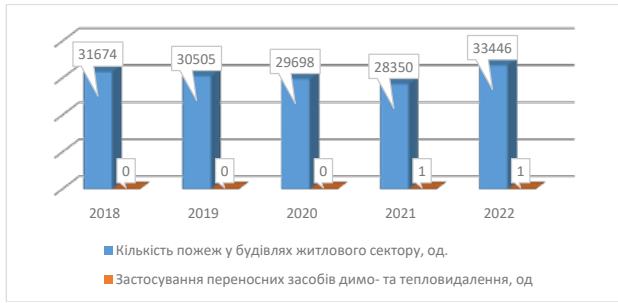


Рис. 4. Статистичні дані про кількість застосування переносних засобів димо- та тепловидалення у період з 2018 по 2022 роки

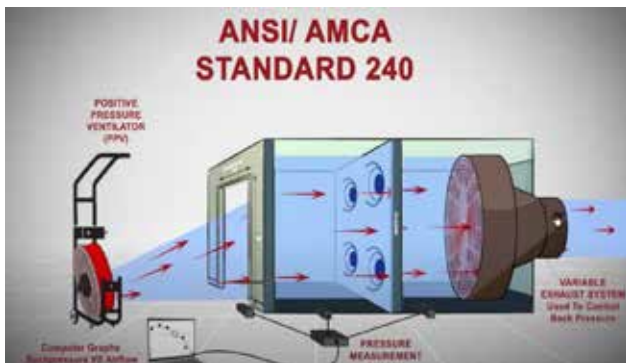


Рис. 5. Робочий момент випробувань переносного засобу димо- та тепловидалення

з гасіння пожеж засоби димовидалення використано лише на 12 пожежах, що складає в середньому близько 0,003 % від загальної кількості пожеж. Статистичні дані про кількість застосування переносних засобів димо- та тепловидалення у період з 2018 по 2022 роки наведено на рисунку 4.

Це підтверджує той факт, що один із способів покращення безпечних умов роботи пожежних підрозділів під час пожежі використовується на практиці не ефективно. Однією із причин такого стану є технічні характеристики існуючих засобів димовидалення, які не задовільняють потреби пожежних підрозділів.

Аналіз оперативно-рятувальної роботи рятувальних служб провідних країн світу вказує на високу тактичну значимість використання переносних пожежних димовсмоктувачів, які набули інноваційних змін у порівнянні із вітчизняними подібними засобами. Сучасні пожежні димовсмоктувачі, які на сьогоднішній день застосовуються, наприклад, підрозділами США та європейських країн значно відрізняються від вітчизняних аналогів [8]. Вони є більш маневреними за рахунок їхнього встановлення на колеса, по-друге, габарити димовсмоктувачів є більш компактнішими та є можливість їхнього складання. По-третє продуктивність димовсмоктувача по нагнітання свіжого повітря складає до 60000 м³/год. Разом з тим європейські зразки засобів димо- та тепловидалення теж можливо удосконалювати, зокрема це лопаті вентилятора (зміна їх площі та кута нахилу) чим у разі збільшити основний параметр засобу димо- та тепловидалення – продуктивність.

За результатами аналітичних досліджень нормативних документів встановлено, що наприклад в Австрії існує [9], яким врегульовано проведення випробувань засобів димо- та тепловидалення. На рисунку 5 наведено робочий момент випробувань переносного засобу димо- та тепловидалення.

За результатами аналізу нормативних документів визначено основні показники якості за якими перевіряють переносні пожежні димовсмоктувачі: аеродинамічні випробування, які полягають, зокрема, у визначенні об'ємної подачі димовсмоктувача за повітрям; перевірка об'ємної подачі димовсмоктувача за піною, кратності піни та витрати розчину піноутворювача; перевірка номінального діаметра робочого проточного перетину димовсмоктувача; перевірка маси димовсмоктувача; перевірка відповідності вимогам всмоктуючого та напірного рукавів; перевірка стійкості до кліматичних впливів; перевірка стійкості до меха-

Таблиця 1

Порівняння основних технічних характеристик пожежних димовсмоктувачів відчизняних із зарубіжними

Показники	Переносні пожежні димовсмоктувачі				
	ДПЭ-7	ДПМ-7	Leader Fan ES230 NEO-230V PPV (Франція)	Ziegler Tempest DD 16-H 5,5 (Німеччина)	Ramfan GF 164SE (США)
Продуктивність за повітрям, м ³ /год: – із всмоктуючими та напірними рукавами; – без рукавів.	7000 8500	9000 11000	27140	10000	17099
Потужність приводу, кВт	1,1	2,5	2,2	1,9	3,7
Маса в комплекті, кг	40,5	40,0	39,3	38,0	27

нічних впливів (вібростійкість); перевірка зусилля, яке прикладається до рукояток управління.

Основні тенденції розвитку переносних засобів димо- та тепловидалення (пожежних димовсмоктувачів) відбуваються у напрямку застосування виробниками різних модифікацій їх конструктивних елементів, які направлені на покращення експлуатаційних характеристик цих засобів. Переважна кількість знайдених і опрацьованих патентів стосується модифікації пристроїв для спрямування потоку повітря, створюваного лопатями вентилятора, механізмів для регулювання висоти встановлення та куту нахилу вентилятору відносно опорної поверхні тощо. Під час виконання удосконалення засобу димо- та тепловидалення планується провести експериментальні дослідження та отримати залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик.

Оптимізація керування конвекційними потоками на пожежі може досягатися шляхом застосування декількох нагнітачів повітря [10-11].

Паралельно вертикальне розташування засобів димо- та тепловидалення, як наведено на рисунку 6 використовується у випадку, якщо отвір для нагнітання повітря має висоту більше ніж 3 м. В залежності від висоти припливного отвору застосовують 2 і більше засоби димо- та тепловидалення. На практиці такі отвори можуть мати великі розміри не тільки за висотою, але і за шириною, тому використовують комбінацію паралельно вертикального і паралельно горизонтального розташування переносних засобів димо- та тепловидалення.



Рис. 6. Приклад паралельно вертикального розташування переносних засобів димо- та тепловидалення

Паралельно горизонтальне розташування засобів димо- та тепловидалення, як наведено на рисунку 7 використовується в тому випадку коли

отвір нагнітання повітря ширше ніж 3 метри та відсутні можливості його зменшити. При паралельно горизонтальному розташуванні переносних засобів димо- та тепловидалення, вони встановлюються поруч один з одним на одній лінії, при цьому межі повітряного потоку повинні перекривати отвір нагнітання повітря повністю. Найбільш ефективним буде розташування у формі конуса. В такому випадку відбувається найменша втрата повітря та зростає ефективність.

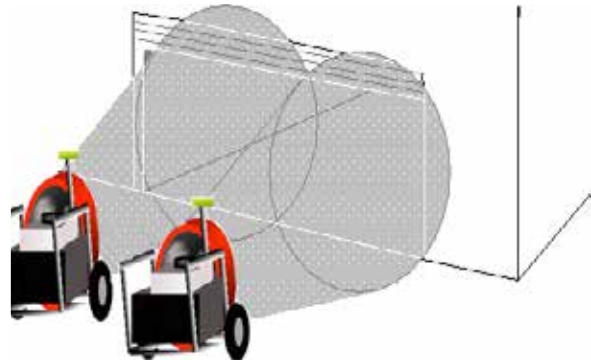


Рис. 7. Приклад паралельно горизонтального розташування переносних засобів димо- та тепловидалення

Під час аналізування існуючих математичних моделей [12-15] визначено, що математична модель пожежі описує в найзагальнішому вигляді зміну параметрів стану середовища в приміщенні з плином часу, а також параметрів стану огорожувальних конструкцій цього приміщення і різних елементів.

Основні рівняння, з яких складається математична модель пожежі, впливають з фундаментальних законів природи: першого закону термодинаміки і закону збереження маси. Ці рівняння відображають і пов'язують всю сукупність взаємопов'язаних і взаємообумовлених процесів, властивих пожежі, таких як тепловиділення в результаті горіння, димовидалення в полум'яній зоні, зміна оптичних властивостей газового середовища, виділення і розповсюдження токсичних газів, газообмін приміщення з навколишнім середовищем і з суміжними приміщеннями, теплообмін і нагрівання огорожувальних конструкцій, зниження концентрації кисню в приміщенні.

Математичні моделі пожежі в приміщенні умовно діляться на три види: інтегральні, зонні і польові (диференціальні).

Щоб зробити науково обґрунтований прогноз, необхідно звернутися до тієї чи іншої моделі пожежі. Вибір моделі визначається метою (завданнями) прогнозу (дослідження) для зада-

них умов однозначності (характеристики приміщення, горючого матеріалу і т.д.) шляхом рішення системи диференціальних рівнянь, які складають основу обраної математичної моделі.

Інтегральний (однозонний) метод є найбільш простим методом моделювання пожеж. Суть інтегрального методу полягає в тому, що стан газового середовища оцінюється через усереднені по всьому об'єму приміщення термодинамічні параметри. Відповідно температура огорожувальних конструкцій та інші подібні параметри оцінюються як усереднені по поверхні.

Розвиток пожежі можна описати досить детально за допомогою зонних (зональних) моделей, заснованих на припущенні про формування в приміщенні двох шарів: верхнього шару продуктів горіння (задимлена зона) і нижнього шару невогнегасного повітря (вільна зона). Таким чином, стан газового середовища в зональних моделях оцінюється через усереднені термодинамічні параметри не однієї, а кількох зон, причому міжзонного кордону зазвичай вважаються рухомими.

Польові моделі, що позначаються в зарубіжній літературі аббревіатурою CFD (computational fluid dynamics), є більш потужним і універсальним інструментом, ніж зональні; вони ґрунтуються на зовсім іншому принципі. Замість однієї або декількох великих зон в польових моделях виділяється велика кількість (зазвичай тисячі або десятки тисяч) маленьких контрольних обсягів, ніяк не пов'язаних з передбачуваною структурою потоку.

Висновки.

За результатами аналітичних досліджень встановлено, що:

– щороку у середньому близько 40 % від загальної кількості пожеж в Україні припадає на будівлі житлового сектору, як правило, такі пожежі супроводжуються високою температурою та задимленням, що в свою чергу сприяє засто-

суванню пожежно-рятувальними підрозділами роботу великої кількості ланок ГДЗС;

– існуючі засоби димо- та тепловидалення, які експлуатуються в пожежно-рятувальних підрозділах України не відповідають необхідним тактико-технічним характеристикам;

– показана актуальність наукової роботи за вибраним напрямом дослідження.

За результати аналітичних досліджень сформувано мету, предмет, об'єкт та задачі подальших досліджень.

Мета роботи – встановлення закономірності залежності продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик, як наукового підґрунтя удосконалення таких засобів.

Об'єкт досліджень – процес видалення небезпечних чинників пожежі із приміщень та будівель.

Предмет досліджень – залежність продуктивності засобів димо- та тепловидалення від їх технічних характеристик.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

1) проаналізувати сучасний стан технічного розвитку засобів димо- та тепловидалення;

2) встановити технічні характеристики, які впливають на ефективність видалення небезпечних чинників пожежі із приміщень та будівель із використанням засобів димо- та тепловидалення;

3) побудувати математичну модель засобу димо- та тепловидалення;

4) встановити залежність ефективності видалення небезпечних чинників пожежі від технічних характеристик засобів димо- та тепловидалення;

5) розробити програму та методику проведення натурних експериментальних досліджень, провести експериментальні дослідження та встановити адекватність розробленої математичної моделі;

6) обґрунтувати технічні характеристики модернізованого засобу димо- та тепловидалення.

Список літератури:

1. Статут дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж, затверджений наказом МВС України від 16 квітня 2018 року № 340.
2. Настанова з організації газодимозахисної служби в підрозділах Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту МНС України, затверджена наказом МНС України №1342 від 16.12.2011 року.
3. Перепечаев В. Д., Береза В. Ю. Газодымозащитная служба пожарной охраны. Чернигов : РИК «Деснянська правда», 2000. 468 с.
4. Грачев В. А., Поповский Д. В. Газодымозащитная служба : учебник / под общ. Ред. Д.т.н., профессора Е.А. Мешалкина. М.: Пожкнига, 2004. 384 с.
5. Ковалишин В. В., Луц В. І., Пархоменко Р. В. Основи підготовки газодимозахисника : навч. Посіб. Львів : ЛДУ БЖД, 2015. 379 с.
6. Правила безпеки праці в органах і підрозділах МНС України : Наказ МНС України № 312 від 07.05.2007 року.

7. Довідник керівника гасіння пожежі. Київ: ТОВ «Літера-Друк», 2016. 320 с.
8. Димовсмоктувачі [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.leader-group.eu/products/fire-fighting-equipment/ventilators-blower-fans-207.html>.
9. Standard: AMCA 240 Laboratory methods of testing positive pressure ventilators for aerodynamic performance rating (лабораторні методи випробування нагнітальних вентиляторів для оцінки аеродинамічних характеристик).
10. Щодо тенденцій технічного розвитку переносних засобів димо- та тепловидалення / Мілютін О.В. Присяжнюк В.В., Семичаєвський С.В., Куртов О.В., Осадчук М.В. // Сучасний стан цивільного захисту України та перспективи розвитку: Матеріали 20 Всеукраїнської наук.-практ. конф., (м. Київ).
11. Переносні засоби димо-та тепловидалення для підвищення ефективності гасіння пожеж підрозділами ОРС ЦЗ ДСНС України В.В.Присяжнюк, С.В. Семичаєвський, М.В. Осадчук, О.В. Куртов, О.В. Мілютін, Б.І. Кривошей// Львів: НЛТУ України, 2018. С. 113-116.
12. Рыжов А.М. Дифференциальный (полевой, CFD) метод моделирования пожаров //Моделирование пожаров и взрывов / Под общ. ред. Н.Н. Брушлинского и А.Я. Корольченко. М.: Ассоциация «Пожнаука», 2000. С. 25-88.
13. Кошмаров Ю.А., Молчадский И.С. Моделирование пожара в помещениях зданий различного назначения // Пожаровзрывобезопасность, 1992, № 1. С. 22-28.
14. Jonathan Barnett, Vince Dowling FDS modelling of hot smoke testing, cinema and airport concourse, s 110.
15. Tuomisaari M. Smoke ventilation in operational fire fighting/ M. Tuomisaari. VTT Building Technology. Technical Research Center of Finland. ESPOO 1997.

Nizhnyk V.V., Prisyazhnyuk V.V., Savchenko O.V. ANALYSIS OF THE CURRENT STATUS OF USE OF SMOKE AND HEAT EXTRACTION MEANS BY FIRE AND RESCUE DEPARTMENTS

This publication provides statistical data on fires in Ukraine and the relevance of the use of smoke and heat removal tools when extinguishing fires in residential areas. A comparative analysis of the technical characteristics of smoke and heat removal devices operated in the leading countries of the world and Ukraine is given. It has been established that the injection of fresh air into the room is the most effective compared to the suction of gassed air. It is noted that the use of a combined method of managing gas flows with the help of smoke and heat removal means makes it possible to reduce the temperature impact on a person on the main evacuation routes. Factors that increase the efficiency of extinguishing fires with the use of fire extinguishers have been identified. The main features by which fire extinguishers are classified are given.

Regulatory and technical documents and patents for smoke and heat removal devices, methods and methods of their application are considered. The main technical characteristics that affect the effectiveness of smoke and heat removal devices have been determined. Attention is focused on mathematical models that describe the process of removing dangerous fire factors from premises and buildings. The need to carry out further research in order to establish the regularity of the dependence of the productivity of smoke and heat removal means on their technical characteristics, as a scientific basis for the improvement of such means, is indicated. The main tasks of research, which must be solved in the future, are defined.

Key words: *means of smoke and heat removal, gas flow management, fires in the residential sector.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 681.2

DOI <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.1/52>

Бурик І.П.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Бібік В.В.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Гричановська Т.М.

Конотопський інститут Сумського державного університету

Бурик М.П.

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МОДЕЛЮВАННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЛЬОВОГО ТРАНЗИСТОРА З КАНАЛОМ НА ОСНОВІ МОЛІБДЕН СУЛЬФІДУ

Наведено огляд робочих характеристик польового транзистора з каналом на основі молібден сульфїду. Розглянуто основи моделювання таких структур за допомогою програмного середовища NanoHub. Наведено результати дослідження робочих характеристик польового транзистора з каналом на основі молібден сульфїду, отримані результати свідчать про більш високу його продуктивність, ніж планарних структур або FinFET. Чисельне моделювання робочих характеристик польового транзистора із каналом на основі молібден сульфїду розкриває проблемні сторони та особливості застосування двовимірних матеріалів у електронному приладобудуванні, отримані результати демонструють допустимі величини електричних параметрів та можуть бути застосовані при вивченні особливостей комп'ютерного моделювання приладових структур наноелектроніки. Поряд з цим, повністю охопити або навіть правильно оцінити потенціал двовимірних матеріалів для застосування у транзисторах досить складно. Електронні властивості визначаються їхніми внутрішніми дефектами, поверхневими адсорбатами або порушеннями міжфазної поверхні. На робочі характеристики негативно впливають надмірний контактний опір, значний гістерезис та великі відхилення між приладами. Екстраполяція відомих принципів, які засновані на ідеалізованих приладах з керованим легуванням, омичним контактом, незначним гістерезисом, малою паразитною ємністю і струмом витоку, у транзистори із каналом у вигляді двовимірного матеріалу іноді може призвести до значних невізначностей або навіть до помилкових висновків. Тому, щоб сприяти ефективному просуванню в цій галузі, необхідно створити належну оцінку забезпечення дійсності параметрів транзисторів. Це обумовить розуміння справжнього потенціалу та проблем кожного матеріалу, структури приладу або технологічного процесу виготовлення.

Ключові слова, польовий транзистор, молібден сульфїду, балістичний транспорт, електричні параметри.

Постановка проблеми. Зараз не існує фундаментальних перешкод для обробки транзисторів із каналами на основі двовимірних (2D) матеріалів у масштабі пластин і промислових спроб їх виробництва. Успішний перехід від лабораторії до фабрики вимагає об'єднаних зусиль багатьох сторін:

– від хіміків і матеріалознавців, щоб синтезувати та оцінити атомарнотонкі матеріали;

– від фізиків, щоб розробити та апробувати відповідні моделі для опису інжекції та транспортування носіїв заряду;

– від інженерів-електроників, щоб оцінити та перевірити пристрої з більш значущими показниками продуктивності та розробити та впровадити стратегії інтеграції з поточною кремнієвою електронікою.

Постійна мініатюризація електроніки сприяла значному зростанню ступеня інтеграції мікросхем. Кремнієві транзистори знаходяться у нормах техпроцесу нижче 10 нм. Поряд з цим зросли і різні технічні проблеми. Дослідження альтернативної будови польових транзисторів або нових матеріалів стає все більш важливим для майбутніх процесорних чіпів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У 90-х роках минулого сторіччя як реакція на запит суб-25 нм норм техпроцесу було розроблено такі структури як FinFET. Прийняття останніх успішно розширило масштабування елементів до вузлів технології нижче 10 нм. Слід відміти, що найменування норма техпроцесів втратило своє історичне значення (фізична довжина затвору) і служить лише «маркетинговою назвою». Поряд з загальновідомими планарними та FinFET транзисторами великий інтерес мають коаксіальні структури із затвором, що оточує канал з усіх сторін. Побудовані та активно досліджуються горизонтальні та вертикальні канали на основі нанодротів та нанотрубок [1-5].

Поряд з цим перспективними вважаються транзисторні структури із каналами на основі таких 2D матеріалів як молібден сульфід, вольфрам сульфід, чорний фосфор, максени (MXenes) [4]. Насамперед це пов'язано з можливістю практичної реалізації для останніх балістичного транспорту носіїв заряду.

Розглянемо основні вимоги, які пред'являються до польових транзисторів із каналом на основі 2D матеріалу: несприйнятливості до випадкових флуктуацій домішки; електростатична якість вища, ніж у планарних транзисторах; відносна простота виготовлення; можливість динамічного регулювання порогової напруги; ефективність топологічного розміщення елементів така сама або краще, ніж у планарних транзисторах. Для задоволення першої вимоги концентрація домішки у каналі має бути низькою. Для виконання другої вимоги необхідні багатозатворні транзистори. Для реалізації третьої вимоги необхідно уникати суб-5нм товщини каналу або високого відношення топологічних розмірів (наприклад, «Fin» із відношенням висоти до ширини більше 3). Щоб виконати четверту вимогу, необхідний нижній затвор або безпосередній контакт до бази. П'ята вимога не є критичною, вона призначена для транзисторів із каналом, ширина якого більша ніж крок металізації. З усіх транзисторів з тонкою базою тільки планарні структури (з відповідним зміщенням нижнього затвора) можуть задовольнити всім

цим вимогам. Практичне виготовлення останніх визначається високою вартістю підкладок із прихованим шаром (< 10 нм) [1].

Для вирішення проблем, пов'язаних з масштабуванням в тривимірних об'ємних напівпровідниках, велике сімейство 2D матеріалів привернуло останнім часом значний інтерес завдяки своїй атомарно тонкій товщині каналу (< 1 нм), де носії заряду утримуються в одноатомному каналі, або каналі з кількома атомами. Зокрема, 2D матеріали мають ряд переваг, зокрема незначну зміну рухливості зі зменшенням товщини. Тому, хоча багат шарові структури можуть не показати конкурентну перевагу над об'ємними напівпровідниками (такими як кремній або арсенід галію), одно- або багат шарові структури демонструють очевидні переваги в діапазоні суб-3 нм товщин [2]. Це є суттєвим для продовження масштабування транзистора. Ефективна рухливість кремнію швидко зменшується з товщиною нижче 5 нм, тоді як рухливість польового ефекту для 2D напівпровідників мало залежить від товщини і значно вища в цьому випадку.

Транзистори із каналом на основі 2D матеріалів демонструють набагато меншу величину допорогового розкиду, що важливо для постійного масштабування довжини затвора нижче 10 нм. Це важко досягти в кремнієвих структурах, навіть якщо використовується передова конструкція FinFET. Таким чином, застосування 2D напівпровідників дозволяє забезпечити шлях до вузлів із суб-5 нм нормами техпроцесу [2-5].

Поряд з цим листовидна структура, електронні, оптоелектронні, фізичні та хімічні властивості 2D матеріалів надзвичайно привабливі та викликали величезний дослідницький інтерес [2-5]. Через їхню малу товщину транспорт носіїв (електрон/дірка), фононів і фотонів сильно обмежений зовнішніми поверхнями. Це призводить до незвичайних змін їх електронних, теплових та оптичних властивостей. Однак застосування 2D матеріалів сильно обмежено або через низьку власну рухливість носіїв, або через зниження рухливості внаслідок впливу матеріалу підкладки. Як приклад, хоча кілька застосувань графену були досліджені через його надзвичайно високу рухливість носіїв, але його практично нульова заборонена зона призводить до низького співвідношення струму включення/вимкнення. Це суттєво обмежило його практичне застосування для електронних пристроїв.

Таким чином, відмітимо наступні переваги транзисторів із каналом на основі 2D матері-

алу: зменшення геометричних короткоканальних ефектів; малий статичний струм витоку та динамічне споживання; високе відношення струмів у відкритому та закритому станах; сумісність із існуючими технологіями виготовлення; потенційно дуже високий рівень інтеграції.

Постановка завдання. У класичній теорії для визначення густоти струму носіїв, коефіцієнтів генерації, рекомбінації та інших параметрів як базові використовують рівняння Пуассона та безперервності. Для прогнозування робочих характеристик польових транзисторів можуть бути застосовані дифузійно-дрейфові транспортні моделі із статистиками Больцмана або Фермі-Дірака. Врахування квантового потенціалу Бома дозволяє подолати проблеми їх апробації при проявленні ефектів короткого каналу.

Слід відмітити, що т.зв. балістичні транзистори мають характерну схему енергетичних рівнів з контрольованим бар'єром. На ній присутня невелика область (вікно Фермі), яка має балістичну провідність. Сила струму в каналі визначається згідно концепції Ландауера. Завдяки відсутності зворотного розсіювання (довжина вільного пробігу збільшується до лінійного розміру каналу), такі транзистори можуть мати відмінні характеристики. Також між металевим електродом та каналом формується бар'єр Шоттки. Це довгий час перешкоджало створенню балістичних транзисторів. Цю проблему вдалося вирішити завдяки використанню паладію як матеріалу електродів.

Для дослідження нанорозмірних транзисторних структур із каналом на основі молібден сульфідів використано on-line ресурси NanoHUB [6]. В основу моделювання покладено розв'язання систем рівнянь Пуассона і Шредінгера в рамках співвідношення нерівноважної функції Гріна. Для розв'язання рівняння Пуассона, що зв'язує заряди та потенціали всередині каналу приладу використовується тривимірна задача. У цьому випадку сітка будується навколо кожного одиничного елемента (атома, іона) структури. Двовимірною моделлю Шредінгера визначає можливість знаходження носія заряду в перерізах каналу, а сам транспорт враховується одновимірним рівнянням [7, 8].

Таким чином в рамках співвідношення Ландауера-Буттікера квазібалістичний транспорт носіїв заряду для польових транзисторів може бути визначений згідно виразу [7, 8]:

$$I_{DS}(V_{DS}, V_{GS}) = \frac{2q}{h} \int_{-\infty}^{+\infty} \{T(E, V_{DS}, V_{GS}) [f_S(E - E_{FS})] - [E - E_{FD}]\} dE,$$

де E_{FS} та E_{FD} –рівні Фермі відповідно витоку та стоку, $f_S(E, E_{FS})$ and $f_S(E, E_{FD})$ –функції Фермі-Дірака

відповідно витоку та стоку, $T(E, V_{DS}, V_{GS})$ – транспортний коефіцієнт.

Об'єктом дослідження даної роботи є особливості транспорту носіїв заряду польових транзисторів з каналами на основі двовимірних матеріалів.

Мета роботи полягає у вивченні особливостей робочих характеристик польових транзисторів, отриманих шляхом чисельного моделювання із врахуванням розсіювання носіїв заряду та балістичного транспорту.

Виклад основного матеріалу. Транзистор – це електронний перемикач, у якому провідність напівпровідникового каналу між електродами витоку та стоку може вмикатися та вимикатися третім електродом затвором, електростатично з'єднаним через тонкий діелектричний шар. Таким чином, поведінка перемикачів типового тонкоплівкового польового транзистора диктується електростатикою в трививідному пристрої. У даній роботі використано наступні вхідні дані: у двовимірному каналі на основі молібден сульфідів потік електронів рухається від витоку до стоку та керується третім електродом затвором, який має довжину 20 нм. Затвор оточує канал з обох боків та відокремлений ізоляційним шаром товщиною 3,0 нм, який має діелектричну проникність 20. Величину температури середовища визначено на рівні 300 К. Значення порогової напруги становило 0,3 В, а напруги зміщення на керуючих електродах варіювалися в межах від 0 до 0,5 В. Для моделювання були використані транспортні моделі з врахуванням розсіювання носіїв та без врахування розсіювання носіїв (балістичний транспорт).

На рис. 1 та рис. 2 відповідно наведено вихідні та передавальні вольт-амперні характеристики (ВАХ) для наномасштабних транзисторних структур із каналом на основі молібден сульфідів. Отримані результати, зокрема в логарифмічних координатах дозволили визначити електричні параметри відповідно в рамках транспортних моделей з врахуванням розсіювання носіїв та без врахування розсіювання носіїв: допороговий розкид 78,7 мВ/декаду та 69,2 мВ/декаду; струм у відкритому стані $1,2 \cdot 10^3$ мкА/мкм та $1,9 \cdot 10^3$ мкА/мкм та струм витоку 0,1 мкА/мкм та 0,2 мкА/мкм; коефіцієнт підсилення $\sim 10^4$; зниження бар'єру, індуковане стоком 43,3 мВ/В та 30,1 мВ/В.

Отримані результати моделювання вказують на більш високу ефективність спроектованих структур польових транзисторів із каналом на основі молібден сульфідів, ніж структур польових транзисторів із каналом у вигляді вуглецевих нанотрубок [9]. Це дуже важливо для цифрового проектування, оскільки є визначальним параме-

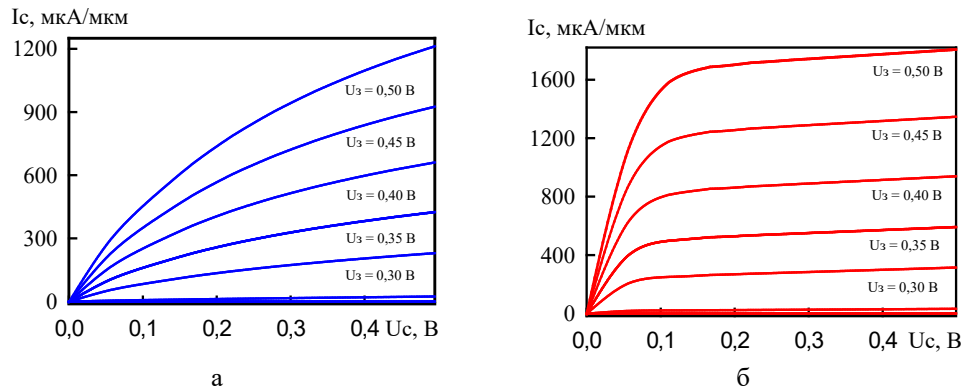


Рис. 1. Вихідні ВАХ транзистора із каналом на основі молібден сульфїду, отримані в рамках моделей із розсіюванням носіїв (а) та балістичного транспорту (б)

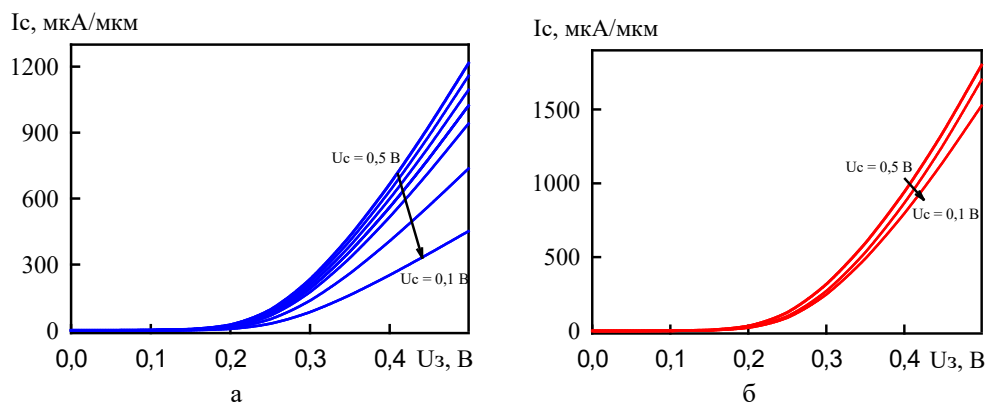


Рис. 2. Передавальні ВАХ транзистора із каналом на основі молібден сульфїду, отримані в рамках моделей із розсіюванням носіїв (а) та балістичного транспорту (б)

тром швидкості та потужності як окремого елемента так і схеми в цілому. Чим вище коефіцієнт, тим краща їх продуктивність.

Згідно моделі Шоклі при дослідженні транзисторів із каналом на основі 2D матеріалу рухливість носіїв визначається за допомогою рівняння [2]:

$$\mu = \frac{L}{WCU_c} \left(\frac{\partial I_c}{\partial U_g} \right),$$

де μ , W , L , C , U_c , U_g , I_c – рухливість носіїв, ширина каналу, довжина каналу, ємність затвора, напруга витік-стік, напруга затвор-стік, та сила струму витік-стік відповідно.

При зміщеннях на стоці та затворі напругою 0,5 В рухливість носіїв становила величину $50,2 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ та $74,6 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, відповідно отримані в рамках моделей із розсіюванням носіїв та балістичного транспорту. Такі дані добре узгоджуються з відомими даними [2, 4] для польових транзисторів із каналом на основі молібден сульфїду.

Для покращення мобільності двовимірних матеріалів застосовувалися різні методи, такі як легування, інженерія деформацій, створення гетероструктур або багат шарових систем, але жоден

з матеріалів не досяг значень мобільності, порівнянних з приладовим кремнієм. Наприклад, експериментально виміряна рухливість носіїв одношарового молібден сульфїду набагато менша, ніж прогнозована теоретично ($410 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$) [4], внаслідок розсіювання на фонах ґратки, викликане міжфазними фонами, зарядженими домішками та високою к діелектричного середовища. Розсіювання носіїв заряду може відбуватися на фонах ґратки через дефор маційний потенціал. Розсіювання фонів залежить від температури і, таким чином, збільшується при підвищенні температури. На основі перших принципів розрахунків розсіювання акустичних/полярних фонів та екранування моношару молібден сульфїду, повідомляється, що їх мобільність може бути досягати $17410 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ [4]; однак ці розрахунки не врахували ефект екранування вільних носіїв та діелектричної невідповідності.

Розсіювання фонів стає домінуючим через наявність високодіелектричного матеріалу, що призводить до зниження рухливості при кімнатній температурі. У сполуках молібден сульфїду дипольний момент, що виникає між катіоном та

аніоном, був зумовлений полярною природою хімічного зв'язку. Електричне поле, створене збуренням дипольного моменту полярних фононів, взаємодіє з носіями заряду, що призводить до низької рухливості носія. Цей процес відомий як полярне оптичне розсіювання фононів або взаємодія Фроліха [2]. Носії заряду можуть збуджувати фонони, якщо мода полярних коливань підтримується шаром діелектрика. Такі фонони мають віддалений інтерфейс або поверхневі оптичні фонони. У розсіянні через поверхневі оптичні фонони при кімнатній температурі переважає високодіелектричне середовище в порівнянні діелектричним шаром із низькою діелектричною проникністю [2, 10, 11]. Крім того, крім кулоновського та фононного розсіяння, структурні дефекти також відіграють важливу роль у зменшенні рухливості носіїв. Наприклад, джерелом сильного розсіювання може виступати іонна вакансія в неякісному зразку.

Висновки. За допомогою відкритих ресурсів проведено дослідження електричних параметрів короткоканальних транзисторних структур у рамках транспортних моделей із врахуванням роз-

сіювання носіїв та без розсіювання (балістичний транспорт).

Досліджено робочі характеристики транзисторних структур із каналом на основі молибден сульфіді. Відповідно до транспортних моделей з урахуванням розсіювання носіїв та без урахування розсіювання носіїв отримано наступні електричні параметри при напрузі зміщення затвору 0,5 В: допороговий розкид 78,7 мВ/декаду та 69,2 мВ/декаду; струм у відкритому стані $1,2 \cdot 10^3$ мкА/мкм та $1,9 \cdot 10^3$ мкА/мкм, струм витоку 0,1 мкА/мкм та 0,2 мкА/мкм; коефіцієнт підсилення $\sim 10^4$; зниження бар'єру, індуковане стоком 43,3 мВ/В та 30,1 мВ/В.

В рамках моделі Шоклі було визначено рухливість носіїв для польових транзисторів із каналом на основі молибден сульфіді; при напрузі зміщення стоку 0,5 В величина рухливості носіїв у каналі в рамках моделі балістичного транспорту носіїв становила $74,6 \text{ см}^2\text{В}^{-1}\text{с}^{-1}$, яка узгоджується з відомими даними. Відносно малі значення рухливості носіїв характерні для молибден сульфіді. Поряд з цим відомо, що для чорного фосфору можуть бути отримані її значно більш високі значення.

Список літератури:

1. Hu C. Modern semiconductor devices for integrated circuits. Upper Saddle River, N.J. ; London : Pearson Education. 2010. 351 p.
2. Liu Y., Duan X., Shin HJ. et al. Promises and prospects of two-dimensional transistors *Nature*. 2021. V. 591. Pp. 43-53. DOI: 10.1038/s41586-021-03339-z.
3. Veloso A., Eneman G., Huynh-Bao T. et al. Vertical nanowire and nanosheet FETs: device features, novel schemes for improved process control and enhanced mobility, potential for faster & more energy efficient circuits. 2019 IEEE International Electron Devices Meeting (IEDM). 7-11 Dec. 2019. San Francisco: IEEE, 2019. Pp. 11.1.1-11.1.4. DOI:10.1109/IEDM19573.2019.8993602
4. Mir S.H., Yadav V.K., Singh J. K. Recent Advances in the Carrier Mobility of Two-Dimensional Materials: A Theoretical Perspective *ACS Omega*. 2020. V. 5. Pp. 14203-14211. <https://doi.org/10.1021/acsomega.0c01676>
5. Carvalho A., Trevisanutto P.E., Taioli S. et al. Computational methods for 2D materials modeling *Rep. Prog. Phys.* 2021. V.84. Pp. 106501 (21pp). DOI: 10.1088/1361-6633/ac2356
6. Ning Yang, Tong Wu, Jing Guo (2021), "2DFET," <https://nanohub.org/resources/2dfets>. (DOI: 10.21981/MCT5-1694).
7. Datta S. Lessons from Nanoelectronics: A New Perspective on Transport – Part B: Quantum Transport. Singapore: World Scientific. 2018. 260 p.
8. Lundstrom M. Fundamentals of Nanotransistors. Singapore: World Scientific, 2018. 342 p.
9. Xu L., Yang J., Qiu C. et al. Can carbon nanotube transistors be scaled down to the sub-5 nm gate length? *ACS Appl. Mater. Interfaces*. 2021. V. 13. Pp. 31957-31967. <https://doi.org/10.1021/acsaami.1c05229>
10. F. Wu, H. Tian, Y. Shen et al. Vertical MoS₂ transistors with sub-1-nm gate lengths. *Nature*. 2022. V. 603. Pp. 259-264. DOI: 10.1038/s41586-021-04323-3
11. Zhang, S., Liu, Y., Zhou, J. et al. Low Voltage Operating 2D MoS₂ Ferroelectric Memory Transistor with Hf_{1-x}Zr_xO₂ Gate Structure. *Nanoscale Res Lett*. 2020. V. 15. P. 157 (9 pp). <https://doi.org/10.1186/s11671-020-03384-z>

Buryk I.P., Bibyk V.V., Grychanovs'ka T.M., Buryk M.P. SIMULATION OF THE CHARACTERISTICS OF A CHANNEL FIELD TRANSISTOR BASED ON MOLYBDENUM SULPHIDE

An overview of the operating characteristics of the field-effect transistor with a channel based on molybdenum sulfide is given. The basics of modeling such structures using the NanoHub software environment are considered. The results of the study of the operating characteristics of the field-effect transistor with a channel based on molybdenum sulfide are presented, the obtained results indicate its higher performance

than that of planar structures or FinFET. Numerical modeling of the operating characteristics of a field-effect transistor with a channel based on molybdenum sulfide reveals problematic aspects and features of the use of two-dimensional materials in electronic device construction, the obtained results demonstrate the permissible values of electrical parameters and can be applied when studying the features of computer modeling of nanoelectronics device structures. Along with this, it is quite difficult to fully grasp or even correctly assess the potential of two-dimensional materials for transistor applications. The electronic properties are determined by their internal defects, surface adsorbates or disturbances of the interfacial surface. The operating characteristics are adversely affected by excessive contact resistance, significant hysteresis and large deviations between devices. The extrapolation of known principles, which are based on idealized devices with controlled doping, ohmic contact, negligible hysteresis, low parasitic capacitance and leakage current, to channel transistors as a two-dimensional material can sometimes lead to significant uncertainties or even erroneous conclusions. Therefore, in order to promote effective advancement in this industry, it is necessary to create a proper assessment of ensuring the validity of transistor parameters. This will lead to an understanding of the true potential and problems of each material, device structure or manufacturing process.

Key words: *field-effect transistor, molybdenum sulfide, ballistic transport, electrical parameters.*

Осадчук Я.О.

Вінницький національний технічний університет

АВТОГЕНЕРАТОРНІ МІКРОЕЛЕКТРОННІ СЕНСОРИ МАГНІТНОГО ПОЛЯ З БІПОЛЯРНИМ І ПОЛЬОВИМ МАГНІТОЧУТЛИВИМИ ТРАНЗИСТОРАМИ

У роботі розглянуто автогенераторні параметричні сенсори індукції магнітного поля на основі транзисторних структур з диференційним від'ємним опором з магніточутливими елементами на базі біполярного і польового транзисторів, причому чутливі до магнітного поля елементи є також активними елементами схем автогенераторних перетворювачів, що значно спрощує конструктивне рішення параметричних сенсорів індукції магнітного поля.

На основі розгляду фізичних процесів у чутливих до магнітного поля елементах та автогенераторах розроблено математичні моделі параметричних сенсорів індукції магнітного поля, на основі яких отримано основні характеристики автогенераторних сенсорів магнітного поля, таких як параметрична залежність функції перетворення та параметрична залежність чутливості від зміни індукції магнітного поля. На основі досліджень показано, що основний внесок у зміну функції перетворення та функції чутливості вносить зміна індукції магнітного поля. Зміна величини індукції магнітного поля викликає зміну еквівалентної ємності транзисторної структури та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту розроблених вимірювальних пристроїв. Чутливість розроблених автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля змінюється від 9,255 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

Отримані аналітичні вирази які описують параметричні залежності функцій перетворення автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики параметричних сенсорів магнітного поля і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля на вихідну частоту вимірювальних пристроїв у порівнянні з розрахунками функції перетворення та рівняння чутливості з нелінійних еквівалентних схем пристроїв.

Ключові слова: сенсор, магнітне поле, диференційний від'ємний опір, автогенератор, магніто-транзистор.

Постановка проблеми. Сучасний стан розвитку науки і техніки вимагає створення сенсорів магнітного поля на основі мікроелектронної технології, що дає можливість різко покращити метрологічні показники сенсорів. Вимірювання магнітних величин знаходять велике практичне застосування при дослідженнях властивостей різноманітних матеріалів, наприклад, у вивченні магнітних полів землі, у магнітному неруйнівному контролі, зокрема, магнітній дефектоскопії, а також при вимірювальному контролі магнітних полів в ядерних установках, у військовій та авіаційній техніці, в електроенергетиці, тощо [1, с. 22-56; 2, с. 15-76; 3, с. 287-230; 4, с. 208-230; 5, с. 11-18; 6; 7; 8].

Основними фізичними величинами, які характеризують магнітне поле, є магнітна індукція, магнітний потік, а також напруженість магнітного поля. Магнітні величини, які вимірюються, попе-

редньо перетворюються в електричні величини, які є більш зручними для вимірювання в інформаційно-вимірювальних системах. Параметричні пристрої перетворення магнітних величин в електричні величини базуються на основі фізичних явищ, таких як ядерний магнітний резонанс, електромагнітна індукція, гальваномагнітні та деякі інші явища [9; 10].

На даний час в усіх напрямках інформаційно-вимірювальної техніки, окрім систем телеметрії, використовуються практично тільки такі структурні та схемо технічні рішення, в яких вихідною інформативною величиною є зміна величини напруги або струму, що призводить до появи значних похибок вимірювання фізичних величин, втрати деякої кількості інформації в каналі зв'язку між виходом вимірювального перетворювача та входом підсилювально-перетворювального пристрою, а також малих потужностей вихідного інфор-

мативного сигналу вимірювальних перетворювачів, та їх низькою швидкодією і завадостійкістю.

Усунення вище перераховані недоліки можливе при застосування параметричних частотних сенсорів магнітного поля, які працюють на принципі перетворення «індукція магнітного поля – частота», який дозволяє в значній мірі покращити метрологічні показники параметричних перетворювачів [11; 12, с. 124-155].

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Одним з перспективних наукових напрямків у побудові сенсорних пристроїв індукції магнітного поля є дослідження і розробка сенсорів на основі напівпровідникових структур з диференціальним від'ємним опором, що дозволяє створювати автогенераторні пристрої з частотним виходом.

Сенсори індукції магнітного поля з частотним інформаційним вихідним сигналом поєднують універсальність та простоту, які мають аналогові сенсорні пристрої, з чутливістю, завадостійкістю та точністю, які притаманні сенсорним пристроям з кодовим виходом.

Перетворення частотно-модульованого сигналу отриманого із параметричного сенсора, в подальшому, зводиться до підрахунку періодів чи самої частоти інформативного сигналу упродовж певного часу (часових воріт). Застосування принципу перетворення «індукція магнітного поля – частота» на основі мікроелектронних структур з диференціальним від'ємним опором дозволяє суттєво знизити вартість інформаційно-вимірювальних приладів, а також дозволяє значно зменшити масогабаритні характеристики параметричних сенсорів індукції магнітного поля, підвищити чутливість та точність перетворення фізичної величини [13, с. 35-75; 14; 15; 16; 17; 18; 19; 20].

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка та дослідження автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля на основі транзисторних структурах з диференціальним від'ємним опором, в яких біполярний чи польовий магніточутливі транзистори виступають як первинні перетворювачі індукції магнітного поля, а також застосовуються як активні елементи генератора, в якому втрачає енергію в коливальному контурі компенсуються енергією диференційного від'ємного опору.

Для досягнення поставленої мети у даній роботі потрібно розв'язати наступні задачі:

1) провести аналіз існуючих літературних джерел та обґрунтувати застосування транзисторних структур з диференціальним від'ємним опором для побудови автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля;

2) розробити математичні моделі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, в яких були б враховані залежності параметрів магніточутливих біполярних та польових транзисторів від дії магнітної індукції і її вплив на вихідну частоту автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля;

3) отримати параметричні залежності функцій перетворення та чутливості автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля від зміни індукції магнітного поля;

4) зробити висновки з проведених досліджень.

Математичні моделі параметричних сенсорів магнітного поля.

Параметричний сенсор індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом побудований на основі транзисторної структури з диференціальним від'ємним опором, в якій магніточутливим елементом є біполярний магнітотранзистор (рис. 1).

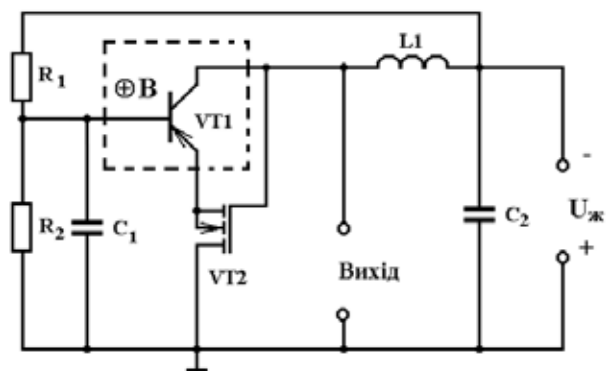


Рис. 1. Електрична схема параметричного сенсора індукції магнітного поля

Автогенераторний параметричний сенсор магнітного поля складається з магніточутливого біполярного транзистора VT1 і польового транзистора VT2, опорів R1-R2, ємності C1, C2 та індуктивності L1. Коливальний контур параметричного сенсора магнітного поля утворений еквівалентною ємністю повного опору на електродах колектора магніточутливого біполярного транзистора VT1 і стоку польового транзистора VT2 та пасивної індуктивності L1.

Під час дії магнітного поля на біполярний магніточутливий транзистор VT1 відбувається зміна еквівалентної ємності коливального контуру, а також зміна диференційного від'ємного опору на виході параметричного сенсора магнітного поля, що викликає суттєву зміну резонансної частоти автогенераторного параметричного сенсора. Втрати енергії в коливальному контурі автоге-

нераторного параметричного сенсора компенсуються енергією диференційного від'ємного опору. За допомогою опорів R1-R2 здійснюється живлення автогенераторного параметричного сенсора від джерела постійної напруги U1. Ємність C2 запобігає проходженню змінного височастотного струму через джерело живлення U1. Вольтамперна характеристика автогенераторного параметричного сенсора магнітного поля має спадаючу ділянку, яка відповідає диференційному від'ємному опору.

Перейдемо до розрахунку зміни параметрів біполярного магніточутливого транзистора при дії на нього магнітного поля. Біполярний транзистор VT1 включено по схемі із загальним емітером, що забезпечує його кращу чутливість до магнітного поля, ніж його включення за схемою із загальною базою [21]. Під час дії поперекового магнітного поля на базову область біполярного транзистора відбувається скривлення траєкторії інжектованих носіїв заряду під дією сили Лоренца. При малих значеннях потоку магнітної індукції B , яка діє на базу, практично всі носії заряду попадають на колектор. Це еквівалентно тому, що магнітне поле збільшує ефективну довжину бази W . Якщо вектор струму збігається з напрямком швидкості носіїв заряду, відбувається відхилення вектора струму від напрямку електричного поля на деякий кут φ , який отримав назву кута Холла. При малих магнітних полях ($\mu B < 1$) кут Холла дорівнює [22, с. 226].

$$\varphi = \mu_p B l, \quad (1)$$

де μ_p – рухливість дірок для транзистора типу р-п-р, B – магнітна індукція.

Для біполярного транзистора з вузькою базою ($W < L_p$) зміна ефективної довжини бази визначається

$$W = \frac{W_0}{\cos \varphi}, \quad (2)$$

де W_0 – довжина бази без дії магнітного поля.

Розклавши у степеневий ряд $\cos \varphi$, і зберігши перші дві складових розкладу, можна записати

$$W = \frac{W_0}{1 - \varphi^2 / 2} = \frac{W_0}{1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2}. \quad (3)$$

Коефіцієнт передачі струму для вузькобазових біполярних транзисторів h_{21E} описується формулою

$$h_{21E} = \frac{2L_p^2}{W^2}, \quad (4)$$

де L_p – дифузійна довжина дірок.

Підставивши у формулу (4) вираз (3), отримаємо

$$h_{21E} = \frac{2L_p^2(1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}{W_0^2}. \quad (5)$$

Виходячи з формули (5), струм колектора, який проходить через базу транзистора при дії магнітного поля, приймає вигляд

$$I_K = \frac{2I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}{W_0^2}, \quad (6)$$

де I_E – струм емітера. При використанні формули (6) опір бази транзистора описується виразом

$$R_B = \frac{U_{KE} W_0^2}{2I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2}, \quad (7)$$

де U_{KE} – напруга на електродах колектор-емітер біполярного магніточутливого транзистора.

Приріст опору бази при дії магнітного поля має вигляд

$$\Delta R_B(B) = \frac{\partial R_B}{\partial \mu_p} \Delta \mu_p(B) + \frac{\partial R_B}{\partial B} \Delta B. \quad (8)$$

Провівши диференціювання у виразі (8), отримаємо

$$\Delta R_B(B) = -\frac{U_{KE} W_0^2}{I_E L_p^2} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-3} (-\mu_p(B) B^2 \Delta \mu_p(B) - B \mu_p^2(B) \Delta B). \quad (9)$$

Таким чином, знаючи залежність зміни опору бази магніточутливого біполярного транзистора при дії магнітного поля, перейдемо до отримання аналітичної параметричної залежності вихідної частоти автогенераторного сенсора магнітного поля від зміни магнітної індукції. При вирішенні цієї задачі необхідно розглянути перетворення енергії магнітного поля в енергію змінного електричного поля на виході автогенераторного сенсора магнітного поля. Для цього визначимо коефіцієнт корисної дії параметричного сенсора. На першому етапі роботи пристрою енергія магнітного поля перетворюється в енергію електричного поля на електродах емітер-колектор магніточутливого транзистора, яка в наступному етапі перетворюється в енергію змінного електричного поля, що зв'язана з еквівалентною ємністю $C_{екв}$ коливального контуру параметричного сенсора магнітного поля. На підставі вище сказаного, коефіцієнт корисної дії пристрою визначається формулою

$$\eta = \frac{C_{екв} U^2 W_0^2}{4t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2 U_{KE}}, \quad (10)$$

де U – вихідна змінна напруга пристрою,

t – період коливань вихідної змінної напруги U без дії магнітного поля.

З формули (10) визначається еквівалентна ємність коливального контуру автогенератора

$$C_{екв} = \frac{4\eta t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 l^2 / 2)^2 U_{KE}}{U^2 W_0^4}. \quad (11)$$

З іншої сторони, еквівалентну ємність $C_{екв}$ транзисторної структури можливо визначити

з виразу, який описує резонансну частоту генератора, яка має вигляд [23]

$$F_0 = \frac{1}{2\pi R_g C_{ekv}} \left[\frac{R_g^2 C_{ekv}}{L} - 1 \right]^{1/2}, \quad (12)$$

де R_g – диференційний від’ємний опір в коливальному контурі параметричного сенсора магнітного поля, L – величина індуктивності коливального контуру автогенератора. З формули (12) отримуємо квадратне рівняння, з якого визначимо еквівалентну ємність C_{ekv}

$$(4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L) C_{ekv}^2 - R_g^2 C_{ekv} + L = 0. \quad (13)$$

Введемо позначення

$$a_1 = 4\pi^2 F_0^2 R_g^2 L, \quad (14)$$

$$a_2 = R_g^2, \quad (15)$$

$$a_3 = L, \quad (16)$$

$$a_4 = C_{ekv} = \frac{4\eta t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^2 U_{KE}}{U_- W_0^2}. \quad (17)$$

Розв’язок квадратного рівняння (13) має вигляд

$$C_{ekv} = \frac{a_2 \pm \sqrt{a_2^2 - 4a_1 a_3}}{2a_1}. \quad (18)$$

Прирівнявши вирази (11) і (18), отримуємо рівняння, з якого визначаємо параметричну залежність вихідної частоти параметричного сенсора від дії магнітного поля на магніточутливий біполярний транзистор

$$a_1 = \frac{a_2}{a_4} - \frac{a_3}{a_4^2}. \quad (19)$$

Підставивши у рівняння (19) значення ($a_1 - a_4$) на основі виразів (14) – (17) і вирішивши його, отримаємо функцію перетворення параметричного сенсора магнітного поля

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{U_-^2 W_0^2}{4\eta t I_E L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^2 U_{KE} L} - \frac{U_-^4 W_0^4}{16\eta^2 t^2 I_E^2 L_p^2 (1 - \mu_p^2 B^2 / 2)^4 U_{KE}^2 R_g^2} \right]^{1/2}. \quad (20)$$

Отримана формула (20) дозволяє простим шляхом розрахувати функцію перетворення параметричного сенсора магнітного поля на основі магніточутливого біполярного транзистора, ніж складним класичним шляхом з нелінійної еквівалентної схеми пристрою на основі розв’язку системи рівнянь Кірхгофа. На рис. 2 подано графічну залежність розрахункової та експериментальної залежності функцій перетворення параметричного сенсора магнітного поля.

Чутливість параметричного сенсора магнітного поля визначається похідною функції (20) за параметром індукції магнітного поля B . Параметром, який залежить від магнітної індукції B , як показали експериментальні дослідження, є також вихідна змінна напруги U_- параметричного сен-

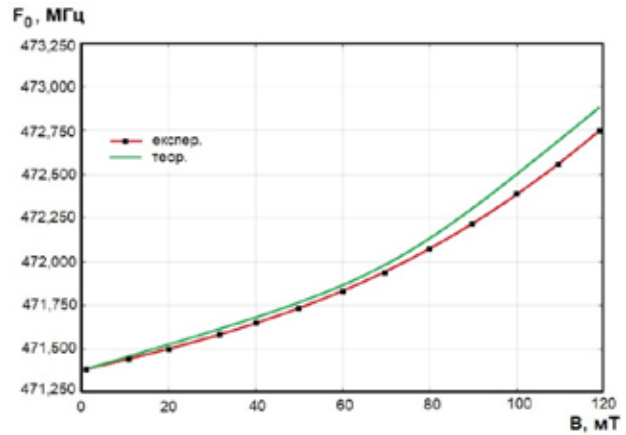


Рис. 2. Залежність функції перетворення параметричного сенсора від зміни індукції магнітного поля

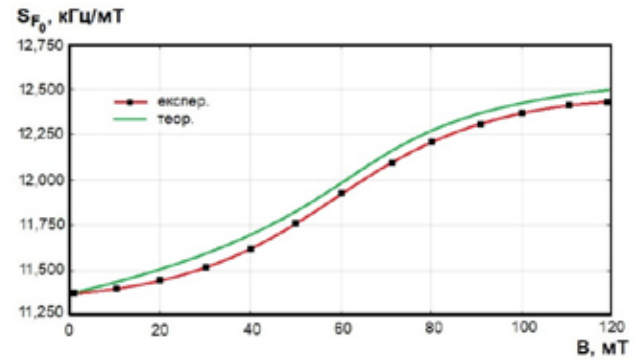


Рис. 3. Залежність функції чутливості параметричного сенсора від індукції магнітного поля

сора. Таким чином, функція перетворення параметричного сенсора магнітного поля з врахуванням залежності її складових від індукції магнітного поля приймає вигляд

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[U_-^2(B) (1 - \mu_p^2(B) B^2 / 2)^{-2} a_5 - U_-^4(B) (1 - \mu_p^2(B) B^2 / 2)^{-4} a_6 \right]^{1/2}. \quad (21)$$

де

$$a_5 = \frac{W_0^2}{4\eta t I_E L_p^2 U_{KE} L}, \quad (22)$$

$$a_6 = \frac{W_0^4}{16\eta^2 t^2 I_E^2 L_p^2 U_{KE} R_g^2}. \quad (23)$$

З врахуванням виразів (22)-(23), функція чутливості описується формулою

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U_-^2(B) \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-2} a_5 - U_-^4(B) \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-4} a_6 \right]^{1/2} \times \left[2U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-2} - 2 \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-3} \left(-\mu_p(B) \frac{d\mu_p(B)}{dB} B^2 - B\mu_p^2(B) U_-^2(B) \right) - \right. \quad (24)$$

$$\left. - a_6 \left[4U_-^3(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-4} - 4 \left(1 - \frac{\mu_p^2(B) B^2}{2} \right)^{-5} \left(-\mu_p(B) \frac{d\mu_p(B)}{dB} B^2 - B\mu_p^2(B) U_-^2(B) \right) \right] \right]$$

Графік розрахункової та експериментальної залежності функції чутливості подано на рис. 3.

Як видно з графіків (рис. 3), чутливість параметричного сенсора магнітного поля змінюється

від 11,325 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ в діапазоні зміни індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

Оскільки магніточутливі транзистори значно спрощують конструкції сенсорів магнітного поля, то також необхідно дослідити і розробити математичну модель пристрою з магніточутливим польовим транзистором з індукованим каналом. Електрична схема параметричного сенсора магнітного поля наведена на рис. 4.

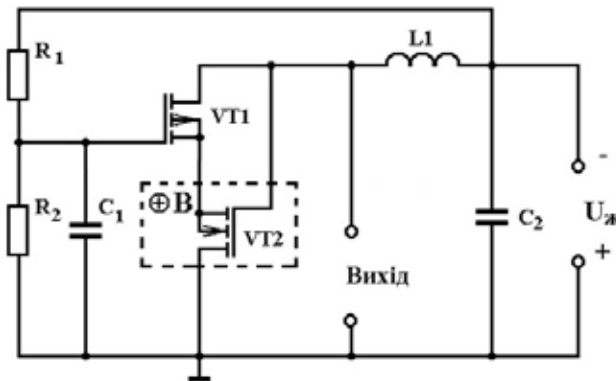


Рис. 4. Електрична схема параметричного сенсора магнітного поля

Вона складається з двох комплементарних польових транзисторів VT1 і VT2. Транзистор VT2 є магніточутливим елементом. Комплементарність польових транзисторів пристрою приводить до появи від'ємного диференційного опору на спадній ділянці вольт-амперної характеристики. Енергія від'ємного диференційного опору компенсує втрати енергії в коливальному контурі автогенератора сенсора. Коливальний контур складається з ємнісної складової повного опору на електродах стік-стік польових транзисторів VT1 і VT2 і пасивної індуктивності L1. Ємність C2 запобігає проходженню високочастотного змінного струму через джерело постійної напруги U1, яке через резистори R1 і R2 живить електричну схему пристрою.

Під час дії поперекового магнітного поля на канал транзистора VT2 з вектором магнітної індукції +В електрони на шляху до стоку будуть відхилятися до підзатворного діелектрика, а при дії вектора магнітної індукції -В – вглиб об'єму напівпровідникової підкладки за рахунок дії сили Лоренца. Струм стоку визначається формулою

$$I_c = S\sigma E, \quad (25)$$

де S – площа каналу, σ – електропровідність каналу, E – напруженість електричного поля в каналі. Якщо на канал діє поперекове магнітне поле, то струм через канал описується виразом

$$I'_c = S\sigma' E, \quad (26)$$

де σ' – електропровідність каналу при дії магнітного поля. Відносна зміна електропровідності каналу при дії магнітного поля має вигляд [22, с. 234]

$$\frac{\sigma - \sigma'}{\sigma} = \frac{\mu_n^2 B^2}{2}, \quad (27)$$

тоді з врахуванням (25), (26) і (27) можливо записати

$$I'_c = I_c \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right). \quad (28)$$

Струм стоку польового транзистора у лінійній області вихідної вольт-амперної характеристики описується формулою [22, с. 129]

$$I_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{пор}) U_c - \frac{1}{2} U_c^2 \right], \quad (29)$$

де Z – ширина каналу, μ_n – рухливість електронів у каналі, C_0 – ємність підзатворного діелектрика на одиницю площі, U_3 – напруга на затворі відносно витоку, U_c – напруга на стоці відносно витоку, $U_{пор}$ – порогова напруга.

З врахуванням дії магнітного поля струм стоку можна записати у вигляді

$$I'_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{пор}) U_c - \frac{1}{2} U_c^2 \right] \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right), \quad (30)$$

Струм стоку в режимі насичення при дії магнітного поля на польовий транзистор має вигляд

$$I'_c = \frac{Z\mu_n C_0}{L_{кан}} \left[(U_3 - U_{пор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right) \right], \quad (31)$$

Оскільки робочим режимом польового транзистора є режим насичення, то в подальшому у роботі будемо використовувати формулу (31). Опір каналу магніточутливого польового транзистора з використанням (31) описується виразом

$$R_{кан}(B) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z\mu_n C_0 (U_3 - U_{пор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2} \right)}, \quad (32)$$

де $U_{св}$ – напруга на електродах стік-втік транзистора. Приріст опору каналу від дії магнітної індукції визначається формулою

$$\Delta R_{кан}(B) = \frac{\partial R_{кан}}{\partial \mu_n} \Delta \mu_n(B) + \frac{\partial R_{кан}}{\partial B} \Delta B. \quad (33)$$

Виконавши диференціювання у формулі (33), отримуємо вираз

$$\Delta R_{кан}(B) = \frac{U_{св} L_{кан}}{Z C_0 (U_3 - U_{пор})^2} \left[\Delta \mu_n (-\mu_n^{-2} - B^2 / 2) - B \mu_n(B) \Delta B \right]. \quad (34)$$

Визначивши залежність зміни опору каналу магніточутливого польового транзистора від дії магнітного поля, перейдемо до розрахунку основної характеристики автогенераторного параметричного сенсора це залежності вихідної частоти при дії індукції магнітного поля. Дана залежність визначається аналогічним чином як і для авто

генераторного параметричного сенсора з магніто-чутливим біполярним транзистором, яка була розглянута вище. Вхідна потужність для автогенераторного параметричного сенсора визначається на основі виразу (31) та виразу (32)

$$P_{вх} = \frac{Z\mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}{L_{кан}}, \quad (35)$$

Вихідна потужність визначається формулою

$$P_{вих} = \frac{C_{екв} U_-^2}{2t}, \quad (36)$$

де t – період вихідної напруги пристрою без дії магнітного поля на сенсор. Отже, виходячи з формул (32) і (33), коефіцієнт корисної дії параметричного сенсора магнітного поля дорівнює

$$\eta = \frac{C_{екв} U_-^2 L_{кан}}{2t Z \mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}, \quad (37)$$

З рівняння (37) визначається еквівалентна ємність $C_{екв}$, яка має вигляд

$$C_{екв} = \frac{2\eta t Z \mu_n C_0 (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}}{U_-^2 L_{кан}}, \quad (38)$$

З другого боку, зв'язок еквівалентної ємності коливального контуру параметричного сенсора магнітного поля з резонансною частотою описується виразом (12). Підставивши у формулу (12) вираз (38) і провівши необхідні перетворення, отримуємо параметричну залежність вихідної резонансної частоти параметричного сенсора магнітного поля від зміни індукції магнітного поля, а також від параметрів магніточутливого польового транзистора і параметрів автогенератора

$$F_0 = \frac{1}{2\pi} \left[\frac{\frac{U_-^2 L_{кан}}{2\eta t Z \mu_n C_0 L (U_3 - U_{нор})^2 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right) U_{св}} - U^4 L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 Z^2 R_g^2 \mu_n^2 C_0^2 (U_3 - U_{нор})^4 \left(1 - \frac{\mu_n^2 B^2}{2}\right)^2 U_{св}^2} \right]^{1/2} \quad (39)$$

Вираз (39) є аналітичним описом функції перетворення автогенераторного параметричного сенсора індукції магнітного поля. На рис. 5 представлено експериментальну та розрахункову залежності функції перетворення пристрою від дії індукції магнітного поля. Відносна похибка між експериментом та розрахунком складає не більше 3 % при вимірюванні індукції магнітного поля в діапазоні від 0 мТ до 120 мТ.

Як видно з графіка (рис. 5), вихідна частота автогенераторного параметричного сенсора індукції магнітного поля змінюється від 471,500 МГц до 472,650 МГц при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

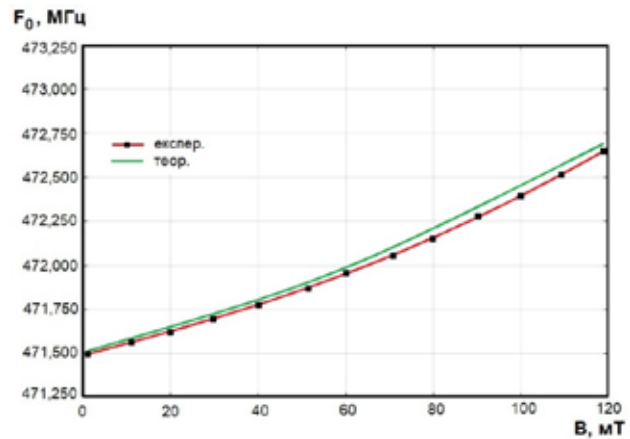


Рис. 5. Залежність функції перетворення автогенераторного параметричного сенсора від зміни магнітної індукції

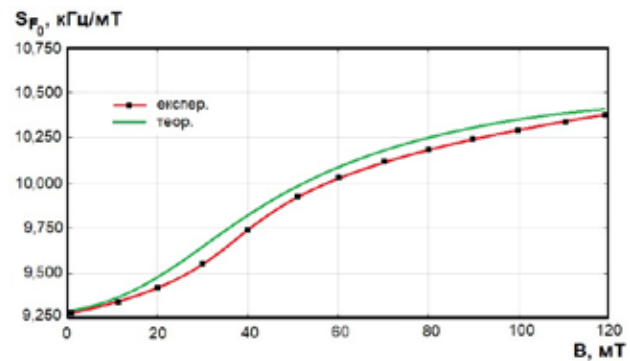


Рис. 6. Залежності функції чутливості параметричного сенсора від зміни магнітної індукції

Функція чутливості визначається на основі виразу (36), при цьому вважається, що рухливість електронів і вихідна напруга також залежить від індукції магнітного поля. Таким чином, функція чутливості описується виразом

$$S_{F_0} = \frac{1}{4\pi} \left[U^2(B) \mu_n^{-1}(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-1} a_7 - U^4(B) \mu_n^{-2}(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} a_8 \right]^{-1/2} \times$$

$$\times a_7 \left[2U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \mu_n^{-1}(B) - \mu_n^{-2}(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} U^2(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-1} - \right.$$

$$\left. - \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} \left(-\mu_n(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} B^2 - 2B \mu_n^2(B) (U^2(B) \mu_n^{-1}(B)) \right) \right] \quad (40)$$

$$- a_8 \left[4U_-(B) \frac{dU_-(B)}{dB} \mu_n^{-2}(B) - 2\mu_n^{-1}(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} U^4(B) \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-2} - \right.$$

$$\left. - 2 \left(1 - \frac{\mu_n^2(B) B^2}{2}\right)^{-3} \left(-\mu_n(B) \frac{d\mu_n(B)}{dB} B^2 - B \mu_n^2(B) (U^4(B) \mu_n^{-2}(B)) \right) \right] \square$$

де $a_7 = \frac{L_{кан}}{2\eta t Z C_0 L (U_3 - U_{нор})^2 U_{св}}, \quad (41)$

$$a_8 = \frac{L_{кан}^2}{4\eta^2 t^2 Z^2 R_g^2 C_0^2 (U_3 - U_{нор})^4 U_{св}^2}. \quad (42)$$

На рис. 6 подано розрахункову та експериментальну залежності функції чутливості параметричного сенсора магнітного поля від зміни індукції магнітного поля.

Як видно з графіка (рис. 6), чутливість параметричного сенсора магнітного поля змінювалась від 9,255 кГц/мТ до 10,350 кГц/мТ в діапазоні зміни індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

На рис. 7, рис. 8 та рис. 9 представлені скріншоти з програми SDRSharp з приймачем на основі скануючого приймача HackRF One V3. Частота дискретизації (ширина смуги приймача) вибрана на рівні 2,75 МГц. Чим більше її значення, тим ширше ми будемо бачити смугу на

аналізаторі спектру. Вибір ширини смуги пропускання ґрунтується, як правило, на продуктивності комп'ютера. Чим ширша смуга пропускання, тим більше ресурсів необхідно задіяти для програми. Наприклад, ширина пропускання на комп'ютері з процесором Core i5 з оперативною пам'яттю в 16 гігабайт складає 2.75 MSPS.

Як видно з рис. 7, ширина спектру передачі автогенераторних сенсорів магнітного поля без зміни індукції магнітного поля складає 10 кГц в діапазоні

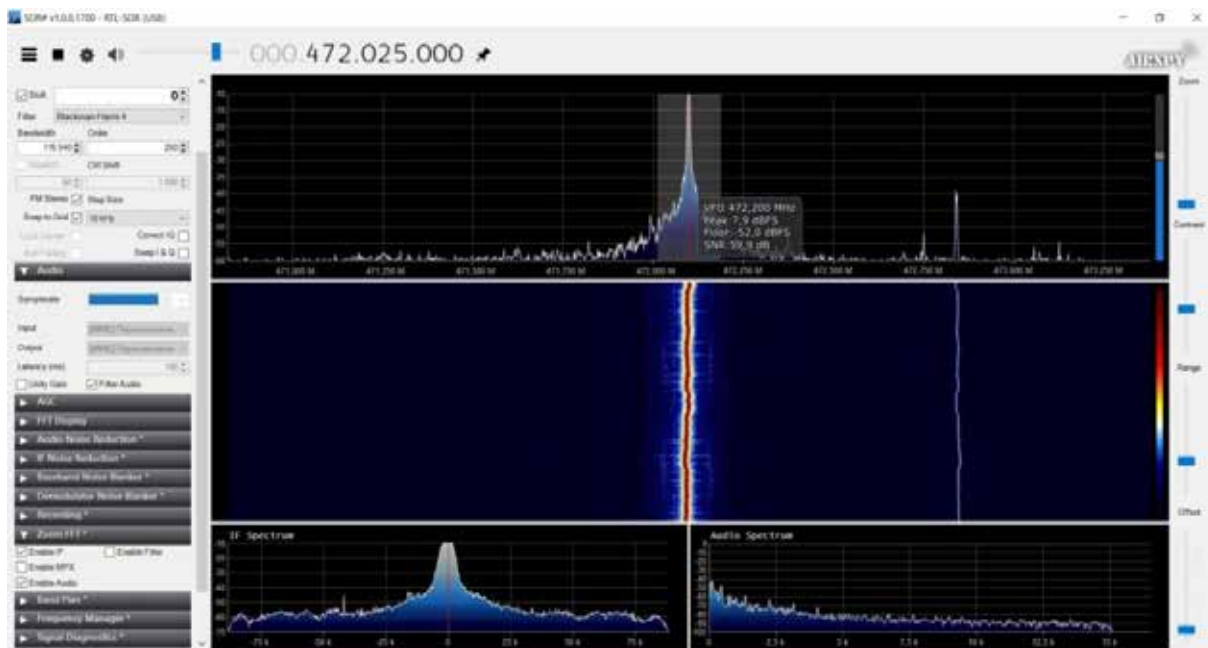


Рис. 7. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля без зміни індукції магнітного поля

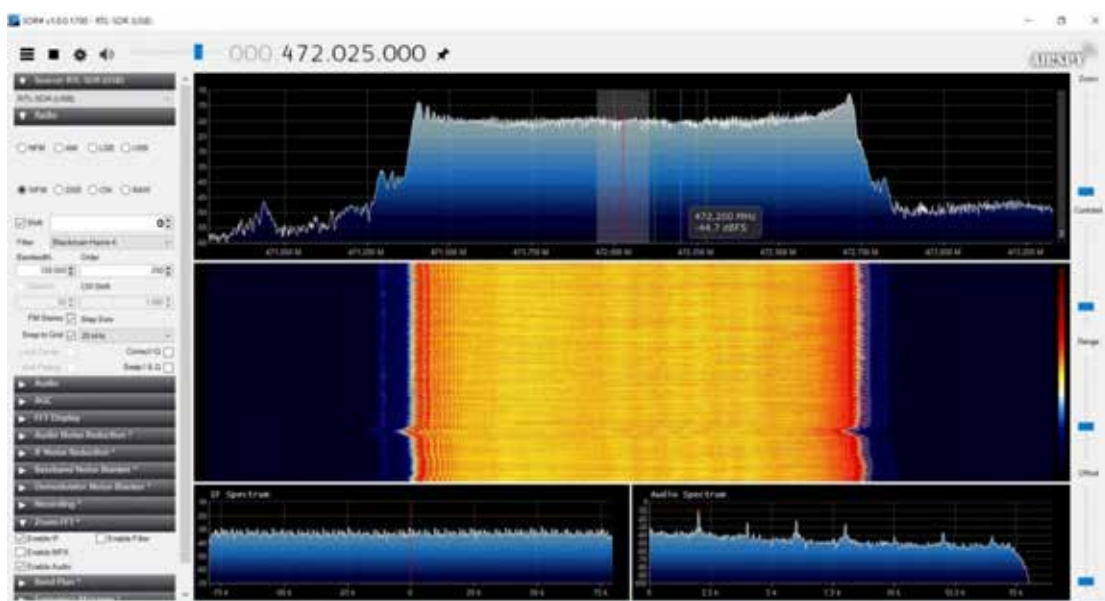


Рис. 8. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ

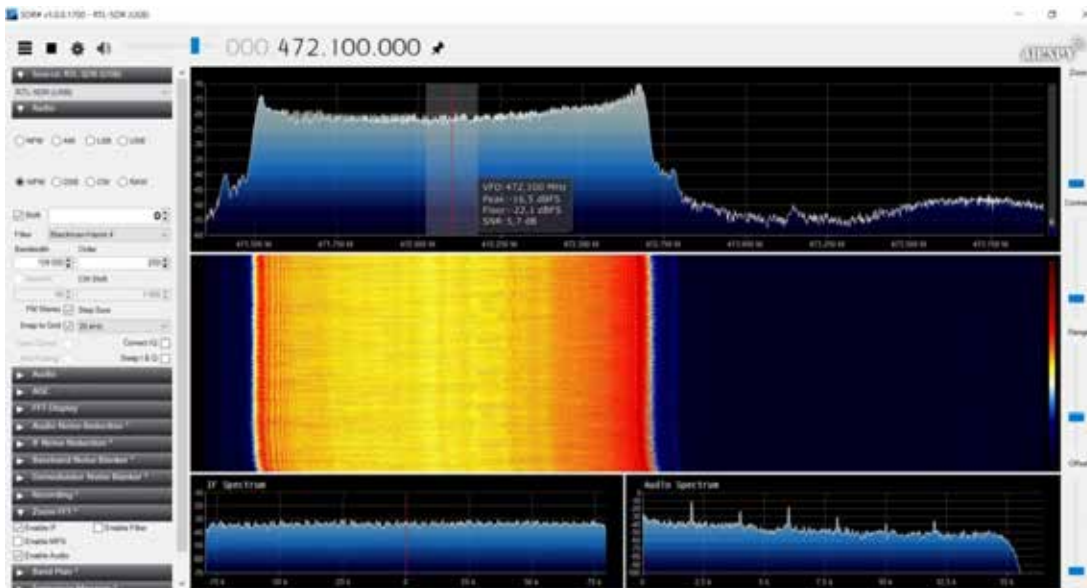


Рис. 9. Спектр передачі автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі двох польових транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ

WH711C (426 МГц – 473 МГц) на вибраному каналі (472,025 МГц) при напрузі живлення 5 В. На рис. 8 представлено спектр автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі біполярного та польового транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ на частоті 472,025 МГц. Як видно з рис. 8, при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ ширина спектру передачі збільшується до 1400 кГц. На рис. 9 представлено спектр автогенераторного мікроелектронного сенсора магнітного поля на основі двох польових транзисторів при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ на частоті 472,100 МГц. З рис. 9 видно, що при зміні індукції магнітного поля від 0 до 120 мТ ширина спектру передачі збільшується до 1150 кГц. Даний частотний метод модуляції дозволяє збільшити завадостійкість в 4,5 рази та збільшити дальність передачі при мінімальній потужності передачі.

Висновки

1. У даній роботі представлено дослідження запропонованих автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля на основі транзисторних мікроелектронних структур з диференціальним від'ємним опором та чутливими до магнітного поля елементами на базі біполярного і польового транзисторів, причому чутливі до магнітного поля елементи є також активними елементами схем автогенераторних перетворювачів, що значно спрощує конструктивне рішення параметричних сенсорів індукції магнітного поля.

2. На основі розгляду фізичних процесів у чутливих до магнітного поля елементах та автоге-

нераторах розроблено математичні моделі параметричних сенсорів індукції магнітного поля, на основі яких отримано основні характеристики автогенераторних сенсорів магнітного поля, таких як параметрична залежність функції перетворення та параметрична залежність чутливості від зміни індукції магнітного поля. На основі досліджень показано, що основний внесок у зміну функції перетворення та функції чутливості вносить зміна індукції магнітного поля. Зміна величини індукції магнітного поля викликає зміну еквівалентної ємності транзисторної структури та диференційного від'ємного опору у коливальній системі автогенераторних параметричних сенсорів магнітного поля, що, у свою чергу, змінює вихідну частоту розроблених вимірювальних пристроїв. Чутливість розроблених автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля змінюється від 9,255 кГц/мТ до 12,400 кГц/мТ при зміні індукції магнітного поля від 0 мТ до 120 мТ.

3. Отримані аналітичні вирази які описують параметричні залежності функцій перетворення автогенераторних параметричних сенсорів індукції магнітного поля показують можливість значно простіше розраховувати основні характеристики параметричних сенсорів магнітного поля і наочно показують вплив кожного параметра первинних перетворювачів і параметрів автогенераторних сенсорів індукції магнітного поля на вихідну частоту вимірювальних пристроїв у порівнянні з розрахунками функцій перетворення та рівняння чутливості з нелінійних еквівалентних схем пристроїв. У автогенераторних

параметричних сенсорах індукції магнітного поля з частотним вихідним сигналом не потрібні АЦП та прецизійні підсилювачі при обробці інформаційних вимірювальних сигналів, що значно здешевлює

вимірювальні системи, а також за допомогою таких пристроїв можлива передача вимірювальної інформації на великі відстані при роботі перетворювачів у надвисоких частотах.

Список літератури:

1. Большакова І.А., Гладун М.Р., Голяка Р. Л., Готра З. Ю., Лопатинський І. С. Мікроелектронні сенсорні пристрої магнітного поля / Національний ун-т Львівська політехніка / З. Ю. Готра (ред.). – Львів: Вид-во Національного університету Львівська політехніка, 2001. –412с.
2. Інтелектуальні вимірювальні системи на основі мікроелектронних датчиків нового покоління / Я. І. Лепіх, Ю. О. Гордієнко, С. В. Дзядевич [та ін.] ; за ред. Я. І. Лепіха, В. О. Романова. – Одеса : Астропринт, 2011. – 352 с.
3. Дж. Фрайден. Современные датчики. Справочник. – М.: Техносфера, 2005. –592 с.
4. Датчики: Справочное пособие / Под общ. ред. В.М. Шарапова, Е.С. Полищука. –М.: Техносфера, 2012. –624с.
5. Невлюдов І.Ш., Токарева О.В. Автоматичне управління технологічними об'єктами. – К.: НАУ, 2018. – 200 с.
6. Готра З. Ю. Сенсорні пристрої магнітного поля на структурах інтегральних магнітотранзисторів / З. Ю. Готра, Р. Л. Голяка, І. М. Годинюк, Т. А. Марусенкова, В. Ю. Ільканич // Науковий вісник Чернівецького університету. Фізика, електроніка. - 2011. - Т. 1, Вип. 2. - С. 19-26.
7. Jonas Homrighausen, Ludwig Horsthemke, Jens Pogorzelski, Sarah Trinschek, Peter Glösekötter. Edge-Machine-Learning-Assisted Robust Magnetometer Based on Randomly Oriented NV-Ensembles in Diamond // Sensors 2023, 23(3), 1119.
8. Wei-Ren Chen, Yao-Chuan Tsai, Po-Jen Shih, Cheng-Chih Hsu and Ching-Liang Dai. Magnetic Micro Sensors with Two Magnetic Field Effect Transistors Fabricated Using the Commercial Complementary Metal Oxide Semiconductor Process // Sensors 2020, 20, 4731.
9. Lenz James, Edelstein Alan. Magnetic Sensors and Their Applications // Sensors Journal, IEEE. 2006, N.6. –P.631 - 649. DOI:10.1109/JSEN.2006.874493.
10. Nakai, T. A Uniform Magnetic Field Generator Combined with a Thin-Film Magneto-Impedance Sensor Capable of Human Body Scans. Sensors 2022, 22, 3120.
11. Osadchuk Oleksandr, Vladimir Osadchuk, Andriy Semenov, Iaroslav Osadchuk, Olena Semenova, Serhii Baraban, Maksym Prytula. Radiomeasuring Optical-Frequency Converters Based on Reactive Properties of Transistor Structures with Negative Differential Resistance. Chapter 12. In: Radivilova T., Ageyev D., Kryvinska N. (eds) Data-Centric Business and Applications. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol. 48, Springer, Cham. 21 June 2020, pp. 229-261.
12. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Мікроелектронні сенсори магнітного поля з частотним виходом. – Вінниця: «Універсум-Вінниця», 2013. – 264 с.
13. Осадчук В.С., Осадчук О.В. Реактивные свойства транзисторов и транзисторных схем. –Вінниця: «Універсум-Вінниця», 1999. –275с.
14. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Mathematical Model of a Frequency Pressure Transducer Based on a Resonant Tunneling Diode // Physics and chemistry of solid state V. 23, No. 2 (2022) pp. 277-284.
15. Osadchuk A.V., Osadchuk V.S., Osadchuk I.A. Research on a magnetic field sensor with a frequency output signal based on a tunnel-resonance diode // Informatyka, Automatyka, Pomiaru w Gospodarce i Ochronie Środowiska. IAPGOS, 4/2020, –P.51–56.
16. Осадчук О.В., Осадчук В.С., Осадчук Я.О. Дослідження реактивних властивостей тунельно-резонансного діода // Вісник Хмельницького національного університету, №4 (287), 2020. –С.160-167.
17. Осадчук Я.О., Осадчук О.В., Осадчук В.С. Автогенераторні параметричні сенсори магнітного поля з елементом Холла і двоколекторним біполярним магнітотранзистором // Вісник Хмельницького національного університету, №2, 2022 (307) – С.114-122.
18. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Potential of Modern Science. Chapters. Microelectronic frequency transducers of the magnetic field based on semiconductor structures with negative differential resistance. Volume 3. LP22772, 20-22. London, United Kingdom, 2019. – P. 212-237.
19. Osadchuk A.V., Osadchuk I.O., Semenov A.O. The Mathematical Model of Radio-measuring Frequency Transducer of Optical Radiation Based on MOS Transistor Structures with Negative Differential Resistance // Journal of Nano- and Electronic Physics. Scientific journal. 2021. Vol. 13 No 4, 04001(6 pp)
20. Lien H.L., Chang J.Y. Magnetic Reference Mark in a Linear Positioning System Generated by a Single Wiegand Pulse. Sensors 2022, 22, 3185.

21. Osadchuk O.V., Osadchuk V.S. Radiomeasuring Microelectronic Transducers of Physical Quantities // Proceedings of the International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2015. Omsk. 978-1-4799-7103-9/15.

22. Викулин И.М., Стафеев В.И. Физика полупроводниковых приборов. – Москва: Радио и связь, 1990. – 264 с.

23. Osadchuk V.S., Osadchuk O.V., Osadchuk I.O. The Generator of Superhigh Frequencies on the Basis Silicon Germanium Heterojunction Bipolar Transistors // Proceedings of the XIIIth International Conference TCSET'2016. " Modern problems of radio engineering, telecommunications, and computer science". Lviv-Slavsko, Ukraine, February 23 – 26, 2016. –P.336-338.

Osadchuk I.O. SELF-OSCILLATING MICROELECTRONIC MAGNETIC FIELD SENSORS WITH BIPOLAR AND FIELD MAGNETIC-SENSITIVE TRANSISTORS

The paper considers self-oscillating parametric magnetic field induction sensors based on transistor structures with differential negative resistance and magnetically sensitive elements based on bipolar and field-effect transistors, and the elements sensitive to the magnetic field are also active elements of self-oscillating transducer circuits, which greatly simplifies the measurement of magnetic field induction

Based on the consideration of physical processes in magnetic field-sensitive elements and self-oscillators, mathematical models of parametric sensors of magnetic field induction were developed, on the basis of which the main characteristics of self-oscillating magnetic field sensors, such as the parametric dependence of the conversion function and parametric sensitivity on changes in magnetic field induction, were obtained. On the basis of research, it is shown that the main contribution to the change in the conversion function and sensitivity is made by a change in the magnetic field induction. A change in the value of the magnetic field induction causes a change in the equivalent capacitance of the transistor structure and differential negative resistance in the oscillatory system of self-oscillating parametric magnetic field sensors, which in turn changes the output frequency of the developed measuring devices. The sensitivity of the developed self-oscillating magnetic field induction sensors varies from 9.255 kHz/mT to 12.400 kHz/mT when the magnetic field induction changes from 0 to 120 mT.

The obtained analytical expressions describing the parametric dependences of the transformation functions of self-oscillating parametric sensors of magnetic field induction show the possibility of much easier calculation of the main characteristics of parametric magnetic field sensors and clearly show the influence of each parameter of primary converters and parameters of self-oscillating sensors of magnetic field induction on the output frequency of measuring devices. conversion functions and sensitivity equations for non-linear equivalent circuits of devices.

Key words: sensor, magnetic field, differential negative resistance, self-oscillator, magnetotransistor.

Відомості про авторів

Антоненко Н.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії

Бараннік В.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри штучного інтелекту та програмного забезпечення Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна

Баранюк О.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Баховський П.Ф. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроніки та телекомунікації Луцького національного технічного університету

Бібік В.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Біленький П.С. – магістрант 2 курсу групи АЮ-2М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Білоус М.В. – аспірант кафедри міжнародних перевезень і митного контролю Національного транспортного університету

Боса О.А. – лаборант кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Босий М.В. – викладач кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва Центральноукраїнського національного технічного університету

Богнарєнко В.О. – студент 1 курсу групи ПМ-22-1 кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва механіко-технологічного факультету Центральноукраїнського національного технічного університету

Булишин Н.А. – магістрантка кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Бунько В.Я. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри енергетики і автоматики Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Бурик І.П. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, старший викладач кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Бурик М.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри теоретичної електротехніки Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Вербинець В.М. – начальник цеху мереж та підстанцій ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

Вернік М.О. – магістрант кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Віноградов В.М. – магістрант 2 курсу групи АЮ-2М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Воробйов М.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»; старший науковий співробітник Інституту теплоенергетичних технологій Національної академії наук України

Габовда О.В. – старший викладач кафедри інженерії, технологій та професійної освіти Мукачівського державного університету

Гайдукевич С.В. – старший викладач кафедри «Електротехнологій та експлуатації енергообладнання» Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Герасименко І.О. – студент 2 курсу групи ПМ-22мб-1 кафедри матеріалознавства та ливарного виробництва механіко-технологічного факультету Центральноукраїнського національного технічного університету

Гнатчук Є.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Головіна О.В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автомобільного транспорту та транспортних технологій Філії Класичного приватного університету у місті Кременчук

Гоменюк С.І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету

Гордієнко К.Ю. – аспірант кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Горпинченко А.С. – аспірант 1 курсу групи А-АК-1-1 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій

Гричановська Т.М. – кандидат фізико-математичних наук, завідувач кафедри електронних приладів і автоматики Конотопського інституту Сумського державного університету

Гуйда О.Г. – кандидат наук з державного управління, завідувач кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Гулей О.Б. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії

Гуриненко С.О. – аспірант кафедри інформаційних, оптичних і навігаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Демчук П.В. – магістрант 2 курсу групи АЮ-2М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Добряк Д.О. – науковий співробітник сектору пожежної безпеки об'єктів та технологій науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Єнчев С.В. – доктор технічних наук, професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту Національного авіаційного університету

Єфімова В.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізичної хімії Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Жерновникова О.А. – доктор педагогічних наук, професор, завідувачка кафедри математики Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди

Журба В.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

Заїка Н.В. – науковий співробітник відділу сертифікації Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Запорожець О.В. – магістрант 2 курсу групи ТР-1М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Засорнова І.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Золотарьова О.В. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Іваненко О.І. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Ігнат'єв О.О. – студент четвертого курсу групи КІУКІ19-7 кафедри автоматизації проектування обчислювальної техніки факультет комп'ютерної інженерії і управління Харківського національного університету радіоелектроніки

Казаков В.В. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри «Хімічна технології неорганічних речовин, каталізу та екології» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Карп Г.В. – аспірант кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Кирисов І.Г. – старший викладач кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

Киричек Г.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Кириченко О.С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електрообладнання та автоматики водного транспорту Київського інституту водного транспорту імені гетьмана Петра Конашевича-Сагайдачного Державного університету інфраструктури та технологій

Киричук Ю.В. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кисельов В.Б. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Кишенько В.Д. – кандидат технічних наук, професор, професор кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління Національного університету харчових технологій

Ківа І.Л. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Коваленко Л.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри проектування доріг, геодезії і землеустрою Харківського національного автомобільно-дорожнього університету

Козинка О.С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Козуб В.Ю. – асистент кафедри фізико-технічних систем та інформатики Луганського національного університету імені Тараса Шевченка

Колесник Ю.О. – аспірант кафедри міжнародних перевезень і митного контролю Національного транспортного університету

Кравченко С.М. – старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Крисенко Т.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Крищенко Д.О. – аспірант 3 курсу групи А-АК-3-2 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій

Кулінченко Г.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

Кушні А.І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри комп'ютерних систем та мереж Криворізького національного університету

Кутовий Д.С. – аспірант кафедри «Хімічна технологія неорганічних речовин, каталізу та екології» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Кутовий О.П. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник Центру воєнно-стратегічних досліджень Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського

Латишев А.В. – магістр факультету комп'ютерних наук та технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Лебідь Є.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного права та логістики Національного транспортного університету

Лебідь І.Г. – кандидат технічних наук, доцент, професор кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Левкін Д.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики та математики Державного біотехнологічного університету

Левченко А.Ю. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інженерії програмного забезпечення Державного університету «Житомирська політехніка»

Лежньов І.Я. – магістрант Державного університету «Житомирська політехніка»

Лисенко О.І. – доктор технічних наук, професор кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Лісняк А.О. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, завідувач кафедри програмної інженерії Запорізького національного університету

Лісовець С.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Ловська А.О. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Лосенко Є.В. – здобувач вищої освіти кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

Лужанська Н.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міжнародних перевезень та митного контролю Національного транспортного університету

Марчук Д.К. – старший викладач кафедри комп'ютерних наук Державного університету «Житомирська політехніка»

Мельник Л.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічної технології композиційних матеріалів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Михайлов Б.К. – здобувач вищої освіти кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

Мурасов Р.К. – кандидат технічних наук, докторант Національного університету оборони України імені Івана Черняхівського

Наритник Т.М. – кандидат технічних наук, професор, Академік Української академії наук, директор Спільного підприємства «Інститут електроніки та зв'язку Української академії наук національного прогресу»

Ніжник В.В. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, начальник науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Новіков В.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інформаційно-комунікаційних технологій та систем Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Олещенко Л.М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри програмного забезпечення комп'ютерних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Онищенко Р.С. – аспірант першого курсу кафедри інформаційно-мережевої інженерії факультету інфокомунікацій Харківського національного університету радіоелектроніки

Осадчук М.В. – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Осадчук Ю.Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету

Осадчук Я.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Панич А.О. – асистент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

Пантелєєва І.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики Української інженерно-педагогічної академії

Півторак Г.В. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Поліщук Р.В. – аспірант кафедри міжнародних перевезень і митного контролю Національного транспортного університету

Польова О.А. – магістрант 2 курсу групи АЮ-2М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Попель В.А. – начальник відділу сертифікації Державного науково-дослідного інституту технологій кібербезпеки та захисту інформації

Присяжнюк В.В. – начальник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Прокопенко О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, метрології та енергоефективних технологій Української інженерно-педагогічної академії

Радовенчик Я.В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Рей К.С. – аспірант кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Римар Т.Е. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри хімічної інженерії та екології Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля

Романовський Д.С. – магістрант 2 курсу групи ТР-1М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Романюк В.А. – кандидат технічних наук, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

Ромащук О.М. – аспірант 4 курсу групи А-АК-4-4 кафедри автоматизації та комп'ютерних технологій систем управління факультету автоматизації і комп'ютерних систем Національного університету харчових технологій

Рудасьов В.Б. – кандидат технічних наук, доцент ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки» Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Рябцун Р.В. – аспірант кафедри атомної енергетики Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Савицький О.І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри автоматизації, комп'ютерних наук та технологій Криворізького національного університету

Савченко О.В. – науковий співробітник відділу досліджень, статистики пожеж та надзвичайних ситуацій Науково-дослідного центру протипожежного захисту Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Сайко В.Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Семенова Н.П. – старший викладач кафедри «Електротехнологій та експлуатації енергообладнання» Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Бережанський агротехнічний інститут»

Семичасвський С.В. – старший науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Сібрук Л.В. – доктор технічних наук, професор кафедри електроніки, робототехніки і технологій моніторингу та інтернету речей Національного авіаційного університету

Сільванська Г.Н. – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Сільченко С.А. – провідний інженер управління головного енергетика ПрАТ «Північний гірничо-збагачувальний комбінат»

Слободян О.П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри авіоніки Національного авіаційного університету

Соколов С.В. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютеризованих систем управління Сумського державного університету

Соколова О.Є. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Стародубцев С.О. – кандидат військових наук, доцент кафедри тактико-спеціальної підготовки Національної академії Національної гвардії України

Тачиніна О.М. – доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри аерокосмічних систем керування факультету аеронавігації, електроніки та телекомунікацій Національного авіаційного університету

Тягунова М.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного університету «Запорізька політехніка»

Фалькевич В.Г. – аспірант Запорізького національного університету

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, професор кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Фуртат І.Е. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри теплової та альтернативної енергетики Навчально-наукового інституту енергозбереження та енергоменеджменту Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Фуртат О.В. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Фуртат С.О. – старший викладач кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського

Фуртат Ю.О. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник відділу моделювання енергетичних процесів і систем Інституту проблем моделювання в енергетиці імені Г.Є. Пухова Національної академії наук України

Хазанович Ю.Ю. – аспірант кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Цикало Д.Ю. – магістрант 2 курсу групи АЮ-2М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Чердніченко К.В. – аспірант, асистент кафедри організації авіаційних перевезень Національного авіаційного університету

Черепанська І.Ю. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри автоматизації та систем неруйнівного контролю Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Черненко П.В. – старший викладач кафедри автобронетанкової техніки Національної академії Національної гвардії України

Чумаченко С.М. – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, лауреат Державної премії в галузі науки і техніки, Голова громадської організації «Асоціація фахівців цивільного захисту», професор кафедри інформаційних технологій, штучного інтелекту і кібербезпеки Національного університету харчових технологій

Чупайленко О.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри міжнародних перевезень і митного контролю Національного транспортного університету

Шерстньов Ю.В. – аспірант 1 курсу групи ЕЕМ-22-1а кафедри автоматизованих електромеханічних систем у промисловості та транспорті Криворізького національного університету

Шматько Н.М. – доктор економічних наук, професор, професор кафедри менеджменту Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Штонда О.Г. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри математики Харківського національного педагогічного університету імені Г.С. Сковороди

Шульгін С.С. – кандидат технічних наук, докторант 2 курсу кафедри інформаційно-мережевої інженерії факультету інфокомунікацій Харківського національного університету радіоелектроніки

Шульженко В.В. – магістрант 2 курсу групи ЗТР-1М кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції факультету готельно-ресторанного бізнесу ім. професора В.Ф. Доценка Національного університету харчових технологій

Ющенко Н.М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри технології ресторанної і аюрведичної продукції Національного університету харчових технологій

Якіменко М.Л. – науковий співробітник відділу пожежно-рятувальної техніки та обладнання науково-випробувального центру Інституту державного управління та наукових досліджень з цивільного захисту

Якубовський О.М. – кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, консультант ВСП «Дніпровський фаховий коледж інженерії та педагогіки» Державного вищого навчального закладу «Український державний хіміко-технологічний університет»

Науковий журнал

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

Серія: Технічні науки

Том 34 (73) № 1 2023

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Н. Кузнєцова*

Адреса редакції:

Таврійський національний університет імені В.І. Вернадського

м. Київ, вул. Джона Маккейна, 33

Електронна пошта: editor@tech.vernadskyjournals.in.ua

Сторінка журналу: www.tech.vernadskyjournals.in.ua

Формат 60×84/8. Гарнітура Times New Roman.

Папір офсетний. Цифровий друк. Обл.-вид. арк. 34,67. Ум. друк. арк. 43,01. Зам. № 0323/167

Підписано до друку 23.03.2023. Наклад 150 прим.

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»

65101, м. Одеса, вул. Інглезі, 6/1

Телефони: +38 (095) 934 48 28, +38 (097) 723 06 08

E-mail: mailbox@helvetica.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи

ДК № 7623 від 22.06.2022 р.