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 36 (75) № 2 2025
Частина 1

Видавничий дім
«Гельветика»
2025

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 загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Дубко Валерій Олексійович – доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри вищої математики Київського національного університету технології та дизайну;
Єремєєв Ігор Семенович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри автоматизованого управління технологічними процесами Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Лисенко Олександр Іванович – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Огородник Станіслав Станіславович – доктор технічних наук, старший науковий співробітник, професор кафедри загальноінженерних дисциплін та теплоенергетики Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського;
Сегай Олександр Михайлович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри 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 № 9 від 16 травня 2025 року)

Науковий журнал «Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки»
зареєстровано відповідно до Рішення Національної ради України
з питань телебачення і радіомовлення № 1136 від 11.04.2024 року.

Ідентифікатор медіа: R30-04000.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Таврійський національний університет імені В. І. Вернадського (просп. Берестейський, 10, м. Київ, 01135, e-mail: crimea.tnu@gmail.com, тел.: +38 (044) 529-05-16).

Мови видання: українська, англійська, польська, німецька,
французька, словацька, румунська, італійська.

Періодичність: 6 разів на рік.

Журнал включено до Переліку наукових фахових видань України (категорія «Б») з технічних наук (спеціальності: G1 Хімічні технології та інженерія; G4 Енерговиробництво (за спеціалізацією); G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка) відповідно до Наказу МОН України від 17.03.2020 № 409 (додаток 1), F2 Інженерія програмного забезпечення; F6 Інформаційні системи і технології; F7 Комп'ютерна інженерія; G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка; D3 Менеджмент; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт 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, 2025

ЗМІСТ

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

Kurdiuk S.V., Maslii O.M., Melnyk O.M., Onishchenko O.A., Checha O.P.
PHYSICO-TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF ELECTRO-SPARK MACHINING OF RECONDITIONED PARTS MADE OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS.....1

Лавінський Д.В., Аніщенко Г.О., Конохов В.І.
ТЕРМОПРУЖНІСТЬ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ.....9

Петров О.Д., Корбут Є.В.
ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ ЙОГО РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ.....15

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

Радіонов О.В., Ву Джимінг, Тарельник Н.В.
ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОРІДИННИХ ГЕРМЕТИЗУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ.....24

Фомін О.В., Козинка О.С., Грицай С.В., Зеленський О.В., Лісничий В.С.
ІННОВАЦІЙНИЙ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АСПЕКТИ ПОЛІМЕРНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ.....31

Fomin O.V., Burlutskyi O.V., Krasulin A.S., Tarasenko A.V., Gunko I.V.
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE SHRINKAGE FUNCTION FOR DETERMINING DEFORMATIONS OF MECHANICAL ENGINEERING STRUCTURES.....36

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

Голощапов С.С., Іванов А.А., Дощенко Г.Г., Наговський Д.А.
ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЧАСТОТНОМУ КЕРУВАННІ.....42

Хлопенко М.Я.
МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АДАПТИВНІЙ ЧАСТОТНО КЕРОВАНІЙ СИСТЕМІ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУДНОВОГО ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ.....48

ПРИЛАДИ

Криницький П.К.
СУЧАСНІ РІШЕННЯ В ВІДНОВЛЕННІ ФУНКЦІЇ КОЛІННОГО СУГЛОБУ У ЛЮДЕЙ З ТРАНСФЕМОРАЛЬНОЮ АМПУТАЦІЄЮ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ.....56

Кузнєцов С.І., Венгер О.О., Безпальченко В.М., Семенченко О.О., Івкіна Є.С.
ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ.....62

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

Bobyk Yu.V., Shpur O.M.
DESIGNING THE COMPLEX MONITORING IN DISTRIBUTED INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS.....68

Волошин В.О., Мадінов М.Л., Бойко О.В., Мацкевич В.Л., Паламарчук В.О.
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК У СУПУТНИКОВО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПЕРЕДАЧ ДАНИХ.....78

Карнаух Д.М., Тягунова М.Ю., Киричек Г.Г.
МЕТОДИ ТА МОЖЛИВОСТІ ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ «IOT».....84

Кочмала В. Б., Пінаєв Б. О., Шпирко О. А.
АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ
ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ І ЯКОСТІ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА.....91
Лактіонов О. І., Боряк Б. Р., Янко А. С., Михайліченко О. В.
ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОТОТИПУ КРІПЛЕННЯ ВІДЕОКАМЕРИ
ТА ДОДАТКОВОГО ОБЛАДНАННЯ.....98
Левченко Д. С., Баранов Є. О., Гаврилюк А. О., Малий О. Ю.
АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ ТА СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПІЛОТНИХ
ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ.....104
Михалевський Д. В., Василишин В. І., Макогон В. І., Макогон О. С.
АНАЛІЗ ТРАФІКУ У БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛАХ СТАНДАРТУ WI-FI НА БАЗІ ЦИКЛІВ
ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ.....110
Пивовар О. С., Кучерук О. Я., Кисіль Т. М.
НЕЧІТКИЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ
ДЛЯ ВИБОРУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ.....116
Приймак С. О., Кравчук С. О.
МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ VOIP-СИСТЕМ.....123
Сайко В. Г., Зінченко М. О., Комаров В. О., Солодовник В. І., Криволапов Я. В., Криволапов Г. Я.
МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО МЕРЕЖЕВОГО КОМПЛЕКСУ ЗВ'ЯЗКУ
З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРІШЕННЯ
ЦІЛЬОВИХ ЗАВДАНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....130
Сайко В. Г., Комаров В. О., Гетьман А. В., Мусієнко В. А., Колодійчук Л. В., Станілога О. О.
МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТРУКТУРИ ЦІЛЬОВОГО СИГНАЛУ ВИЯВЛЕННЯ
ЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ
СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ.....139
Semenov A. O., Khloba A. A.
REVIEW OF CIRCUIT SOLUTIONS LEADING TO DETERMINISTIC CHAOS
IN OSCILLATORS BASED ON THE VAN DER POL EQUATION.....149
Сколець С. С., Кравчук С. О.
ВІРТУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖНИХ ФУНКЦІЙ У 5G: ПІДХОДИ, АРХІТЕКТУРА ТА ПЕРСПЕКТИВИ
РОЗВИТКУ.....158
Шпур О. М., Гаврилів Т. М.
ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ
IOT МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛЕГКИХ ML-МОДЕЛЕЙ.....166
Юсипів Т. В., Курилко О. Б.
ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОЇ СТІЙКОСТІ ГРАНИЧНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ
ТИПУ РЕАКЦІЇ-ДИФУЗІЇ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ СИГНАЛУ.....173

МЕТАЛУРГІЯ

Саєнко О. Ф., Черкашин Д. В., Губський С. О., Чухліб В. Л.
ВПЛИВ МІЖКЛІТЬОВОЇ ВІДСТАНІ НА ПРОЦЕС ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ
КОРИТНОГО ПРОФІЛЮ.....178

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

Будник Н. В., Ремізова Н. Л., Кайнаш А. П., Калашник О. В., Назаренко В. О., Мороз С. Е.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБАГАЧЕНИХ СУХИХ МОЛОЧНИХ СУМІШЕЙ
ДЛЯ ДИТЯЧОГО ХАРЧУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ.....188
Маринін А. І., Шевченко О. Ю., Пасічний В. М., Святненко Р. С., Гармаш Д. В., Бортнічук О. В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОГО ПАКУВАННЯ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ
БІЛОГО М'ЯСА КУРЧАТ-БРОЙЛЕРІВ.....195

ТРАНСПОРТ

Бех Я. П.
ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТРІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ.....200

Бойко С. М., Тарасенко О. В., Лебідь Г. О., Грибанова С. А., Журід В. І., Хебда А. С.
ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТУ ІЗ АЕРОПОРТОВОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ В АСПЕКТІ ІНКЛЮЗІЇ.....205

Бойко С. М., Бойко О. С., Реута А. В., Васін І. І., Дєрябіна І. О., Самохліб О. О.
ПРИНЦИПИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ.....210

Ботяков А. В.
ВИКЛИКИ ТА РІШЕННЯ В ЛОГІСТИЦІ ХОЛОДОВОГО ЛАНЦЮГА ДЛЯ ВАКЦИН ЯК ЧУТЛИВИХ ДО ТЕМПЕРАТУРИ ГУМАНІТАРНИХ ПОСТАВОК.....216

Вишневський Д. О.
ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ВАРТІСТЬ МОРСЬКОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ.....222

Ienina I. I., Chornohor N. O.
ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES WITH IOT FOR THE MAINTENANCE OF AVIATION EQUIPMENT.....228

Кириллова О. В., Ларіна І. М.
ДУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО РОЗМЕЖУВАННЯ ПОГЛЯДІВ НА СУЧАСНИЙ ПОРТ І ПОРТОВИЙ ТЕРМІНАЛ З ПОЗИЦІЙ ТРАНСПОРТНОЇ НАУКИ І ЛОГІСТИКИ.....234

Ловська А. О., Мурад'ян А. О., Рибін А. В., Демидюков О. В.
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЗЕРНОВИХ ПРИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ.....242

Ловська А. О., Павлюченков М. В., Равлюк В. Г., Скуріхін Д. І., Рибін А. В., Федоришин В. С.
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КАРКАСА УНІВЕРСАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ.....248

Окороков А. М., Бех П. В., Лашков О. В.
ЦИФРОВІЗАЦІЯ МИТНИХ ПРОЦЕДУР В ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСАХ.....254

Онищенко С. П., Берестенко В. В.
ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ ТА СКЛАДУ ПЕРЕВІЗНИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ.....259

Павлова І. О., Куць Н. Г., Дубицький О. С.
АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНЖЕНЕРНИХ ІННОВАЦІЙ НА СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ.....266

Постранський Т. М., Тюрдьо Н. О.
ШВИДКІСТЬ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ЯК ЧИННИК ВПЛИВУ НА ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ВОДІЯ.....274

Семичаєвський С. В., Присяжнюк В. В., Якіменко М. Л., Осадчук М. В., Свірський В. В., Сидоренко В. Л.
ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ТА МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗАХИСНОГО СПОРЯДЖЕННЯ ПОЖЕЖНИКА.....280

Семичаєвський С. В., Присяжнюк В. В., Якіменко М. Л., Осадчук М. В., Свірський В. В., Бєлікова К. Г.
ПРО ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ТА МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ РУЧНИХ ПОЖЕЖНИХ ДРАБИН.....286

Софронов А. І., Судник Н. В.
АЛГОРИТМ ВИБОРУ НАПРЯМКУ РОБОТИ СУДНА В УМОВАХ ВОЛАТИЛЬНОСТІ ФРАХТОВОГО РИНКУ.....292

Степанов О. В., Волобуєва Т. В.
ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТАНУ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ.....300

Шапенко Є. М., Котова С. О., Білоног О. В.
СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ СИСТЕМИ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ.....306

ЕЛЕКТРОНІКА

Барило Г. І., Брич М. В., Шлюсар Ю. А., Живицький І. Б., Бойкачов Г. В., Пришляк С. О.
МАКРОМОДЕЛЬ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З РОЗШИРЕНОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЮ 311

Лук'янюк С. В.
ЕКОДИЗАЙН ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ 319

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

Булгаков М. П., Мельник О. М., Пуляєв І. О., Волошин Д. А.
ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ І ШЛЯХІВ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У СУДНОПЛАВСТВІ 328

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ 336

CONTENTS

MATERIAL PROCESSING IN MECHANICAL ENGINEERING

Kurdiuk S. V., Maslii O. M., Melnyk O. M., Onishchenko O. A., Checha O. P.
PHYSICO-TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF ELECTRO-SPARK MACHINING OF RECONDITIONED PARTS MADE OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS.....1

Lavinsky D. V., Anischenko G. O., Konokhov V. I.
THERMOELASTICITY OF COMPOSITE MOLDS FOR PRESSING HEATED POWDER MATERIALS.....9

Petrov O. D., Korbut E. V.
INCREASING THE PERFORMANCE OF A CUTTING TOOL BY MODIFYING ITS WORKING SURFACES.....15

INDUSTRIAL ENGINEERING

Radionov O. V., Wu Jiming, Tarelnik N. V.
APPLICATION OF MAGNETOFLUID SEALING COMPLEXES TO IMPROVE RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS.....24

Fomin O. V., Kozynka O. S., Hrytsai S. V., Zelenskyi O. V., Lisnychyi V. S.
INNOVATIVE AND CONCEPTUAL ASPECTS OF POLYMER MECHANICAL ENGINEERING.....31

Fomin O. V., Burlutskyi O. V., Krasulin A. S., Tarasenko A. V., Gunko I. V.
MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE SHRINKAGE FUNCTION FOR DETERMINING DEFORMATIONS OF MECHANICAL ENGINEERING STRUCTURES.....36

ELECTRICAL ENGINEERING

Goloschapov S. S., Ivanov A. A., Doshchenko G. G., Nagovskiy D. A.
OPTIMIZATION OF THE FORM OF THE SUPPLY VOLTAGE OF AN INDUCTION MOTOR WITH FREQUENCY CONTROL.....42

Khlopenko N. J.
MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN AN ADAPTIVE FREQUENCY-CONTROLLED SYSTEM WITH AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A SHIP'S THRUSTER.....48

EQUIPMENT

Krynytskyi P. K.
MODERN SOLUTIONS IN THE RESTORATION OF KNEE JOINT FUNCTION IN PEOPLE WITH TRANSFEMORAL AMPUTATION AND DIRECTIONS FOR THEIR OPTIMIZATION.....56

Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina Ye. S.
ELECTROSTATIC FILTER FOR CLEANING GASES FROM DUST.....62

RADIO ENGINEERING AND TELECOMMUNICATIONS

Bobyk Yu. V., Shpur O. M.
DESIGNING THE COMPLEX MONITORING IN DISTRIBUTED INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS.....68

Voloshyn V. O., Madinov M. L., Boyko O. V., Matskevych V. L., Palamarchuk V. O.
INTELLIGENT ERROR CORRECTION ALGORITHMS IN SATELLITE-OPTICAL NETWORKS FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSIONS.....78

Karnaukh D. M., Tiahunova M. Yu., Kyrychek H. H.
METHODS AND CAPABILITIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA NETWORKS FOR IOT SYSTEMS.....84

Kochmala V. B., Pinaev B. O., Shpirko O. A.
ANALYSIS OF THE USE OF MICROELECTRONIC DEVICES FOR DETERMINING THE TYPE AND QUALITY OF DIESEL FUEL..... 91
Laktionov O. I., Boryak B. R., Yanko A. S., Mykhailichenko O. V.
DESIGN OF A FUNCTIONAL PROTOTYPE FOR VIDEO CAMERA AND AUXILIARY EQUIPMENT MOUNTING..... 98
Levchenko D. S., Baranov Ye. O., Gavryliuk A. O., Malyi O. Yu.
AUTONOMOUS NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN LIMITED CONNECTIVITY CONDITIONS..... 104
Mikhalevsky D. V., Vasylyshyn V. I., Makogon O. S., Makogon V. I.
ANALYSIS OF TRAFFIC IN WIRELESS CHANNELS OF THE WI-FI STANDARD..... 110
Pyvovar O. S., Kucheruk O. Ya., Kysil T. M.
A FUZZY MULTIPLE-CRITERIA DECISION-MAKING APPROACH TO SELECTING TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT..... 116
Priymak S. O., Kravchuk S. O.
METHOD OF INCREASING THE AVAILABILITY OF VOIP SYSTEMS..... 123
Saiko V. G., Zinchenko M. O., Komarov V. O., Solodovnyk V. I., Kryvolapov Ya. V., Kryvolapov H. Ya.
MODEL OF AN INTEGRATED NETWORK COMMUNICATION COMPLEX USING UAVS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SOLVING SPECIAL PURPOSE TARGETED TASKS..... 130
Saiko V. G., Komarov V. O., Hetman A. V., Musiienko V. A., Kolodiichuk L. V., Staniloha O. O.
MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURE OF THE TARGET SIGNAL FOR DETECTION OF FREQUENCY CHANNELS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS FOR SPECIAL PURPOSES..... 139
Semenov A. O., Khloba A. A.
REVIEW OF CIRCUIT SOLUTIONS LEADING TO DETERMINISTIC CHAOS IN OSCILLATORS BASED ON THE VAN DER POL EQUATION..... 149
Skolets S. S., Kravchuk S. O.
5G NETWORK FUNCTIONS VIRTUALIZATION: APPROACHES, ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT PROSPECTS..... 158
Shpur O. M., Havryliv T. M.
HYBRID APPROACH TO ANOMALY DETECTION IN TELECOMMUNICATION IOT NETWORKS USING LIGHTWEIGHT ML MODELS..... 166
Yusypiv T. V., Kurylko O. B.
INVESTIGATION OF ROBUST STABILITY OF LIMIT REGIMES IN REACTION-DIFFUSION SYSTEMS WITH DISTRIBUTED SIGNAL TRANSMISSION..... 173

METALLURGY

Sayenko O. F., Cherkashin D. V., Hubskyi S. O., Chukhlib V. L.
INFLUENCE OF THE INTER-CAGE DISTANCE ON THE ROLL-FORMING PROCESS OF A TRAY PROFILE..... 178

TECHNOLOGY OF FOOD PROCESSING AND CONSUMER GOODS INDUSTRY

Budnyk N. V., Remizova N. L., Kainash A. P., Kalashnyk O. V., Nazarenko V. O., Moroz S. E.
RESEARCH ON ENRICHED DRY MILK MIXTURES FOR BABY NUTRITION OF ADVANCED TECHNOLOGY..... 188
Marynin A. I., Shevchenko O. Yu., Pasichnyi V. M., Svyatnenko R. S., Harmash D. V., Bortnichuk O. V.
RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF ACTIVE PACKAGING FOR THE STORAGE OF BROILER CHICKENS WHITE MEAT..... 195

TRANSPORT

Bekh Ya. P.
USE OF SOLAR ENERGY TO POWER RAILWAY ELECTRICAL DEVICES..... 200

Boiko S. M., Tarasenko O. V., Lebid H. O., Grybanova S. A., Zhurid V. I., Hebda A. S.
FEATURES OF THE INTERACTION OF TRANSPORT WITH AIRPORT INFRASTRUCTURE IN THE ASPECT OF INCLUSION.....205
Boiko S. M., Boiko O. S., Reuta A. V., Vasin I. I., Deryabina I. O., Samokhlib O. O.
PRINCIPLES OF OPERATION OF MODERN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS.....210
Botiakov A. V.
COLD CHAIN LOGISTICS CHALENGES & SOLUTIONS FOR TEMPERATURE-SENSITIVE HUMANITARIAN SUPPLIES – VACCINES.....216
Vyshnevskyi D. O.
FACTORS INFLUENCING THE COST OF MARITIME TRANSPORTATION.....222
Ienina I. I., Chornohor N. O.
ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES WITH IOT. FOR THE MAINTENANCE OF AVIATION EQUIPMENT.....228
Kyryllova O. V., Larina I. M.
DUAL APPROACH TO THE DISTINCTION OF VIEWS ON THE MODERN PORT AND PORT TERMINAL FROM THE STANDPOINT OF TRANSPORT SCIENCE AND LOGISTICS.....234
Lovska A. O., Muradian A. O., Rybin A. V., Demydiakov O. V.
RESEARCH OF LONGITUDINAL LOADING OF A GRAIN CONTAINER IN RAILWAY TRANSPORT.....242
Lovska A. O., Pavliuchenkov M. V., Ravlyuk V. G., Skurikhin D. I., Rybin A. V., Fedorishin V. S.
RESEARCH OF THE LONGITUDINAL LOADING OF THE FRAME OF AN UNIVERSAL CONTAINER OF AN IMPROVED DESIGN.....248
Okorokov A. M., Bekh P. V., Lashkov A. V.
DIGITALIZATION OF CUSTOMS PROCEDURES IN TRANSPORT PROCESSES.....254
Onyshchenko S. P., Berestenko V. V.
OPTIMIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORTATION SCHEME AND CARRIERS COMPOSITION.....259
Pavlova I. O., Kuts N. H., Dubytskyi O. S.
ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENGINEERING INNOVATIONS ON THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE.....266
Postranskyy T. M., Tiurdo N. O.
VEHICLE SPEED AS A FACTOR INFLUENCING THE DRIVER'S FUNCTIONAL STATE.....274
Semychayevsky S. V., Prisyajnyuk V. V., Yakimenko M. L., Osadchuk M. V., Svirskyi V. V., Sydorenko V. L.
ON THE NECESSITY OF SUBSTANTIATING TECHNICAL REQUIREMENTS AND TESTING METHODS FOR FIRE FIGHTER PROTECTIVE EQUIPMENT.....280
Semychayevsky S. V., Prisyajnyuk V. V., Yakimenko M. L., Osadchuk M. V., Svirskyi V. V., Bielikova K. G.
ON SUBSTANTIATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS AND TEST METHODS FOR MANUAL FIRE LADDER.....286
Sofronov A. I., Sudnik N. V.
ALGORITHM OF SELECTION OF VESSEL'S VOYAGE CONSIDERING FREIGHT MARKET VOLATILITY.....292
Stepanov O. V., Volobuyeva T. V.
DIAGNOSTIC MODEL OF CONDITION ASSESSMENT OF FREIGHT TRANSPORT.....300
Shapenko Ye. M., Kotova S. O., Bilonoh O. V.
CURRENT TRENDS AND PROSPECTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE URBAN PASSENGER TRANSPORT SYSTEM.....306

ELECTRONICS

Barylo H. I., Brych M. V., Shliusar Yu. A., Zhyvytskyi I. B., Boikachov H. V., Pryshliak S. O.
MACROMODEL OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH EXTENDED FUNCTIONALITY.....311
Lukyanuk S. V.
ECODESIGN AS THE BASIS OF MODERN ENGINEERING DESIGN.....319

SHIPBUILDING

Bulgakov M. P., Melnyk O. M., Puliaiev I. O., Voloshyn D. A.
OVERVIEW OF CURRENT CHALLENGES AND WAYS TO MINIMISE ENVIRONMENTAL RISKS IN SHIPPING.....328

INFORMATION ABOUT AUTHORS.....336

ОБРОБКА МАТЕРІАЛІВ У МАШИНОБУДУВАННІ

UDC 621.793:621.9.048.7
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/01

Kurdiuk S. V.
National University "Odesa Maritime Academy"

Maslii O. M.
Military Academy (Odesa)

Melnyk O. M.
Odesa National Maritime University

Onishchenko O. A.
National University "Odesa Maritime Academy"

Checha O. P.
Odesa National Maritime University

PHYSICO-TECHNOLOGICAL ANALYSIS OF ELECTRO-SPARK MACHINING OF RECONDITIONED PARTS MADE OF STRUCTURAL AND TOOL STEELS

The reliability and durability of friction units in modern weapons and military equipment largely depend on the physical and mechanical properties of the materials of the parts and the quality of their surface treatment. One of the promising methods for improving the performance characteristics of weapons and military equipment is electrospark alloying (ESA), which allows the creation of hardened coatings with high wear resistance. The article deals with the physical processes occurring during ESA, particularly electrical erosion, polar material transfer, and structural and phase transformations of the surface layer. It is shown that using electrodes with nanostructured modifiers to form ultra-strong coatings with specified functional characteristics is promising. Further improvement of the design of installations for mechanized coating formation, which ensures process stability and high productivity, is significant. The process modes, electrode parameters, and their influence on the formation of coatings are analyzed. The formation mechanism of surface layers and features of their crystallization are presented. It was found that using ESA promotes the formation of white layers with a fine-grained structure, characterized by high mechanical properties and corrosion resistance. A further analysis of the technological parameters of ESA demonstrated a significant effect of the electrode material on the composition and characteristics of the obtained coatings. The influence of pulse discharge modes on the depth of penetration of alloying elements into the surface layer of the part was determined. It is shown that special attention should be paid to the influence of the gas environment of the interelectrode gap on the kinetics of the material transfer process. In practical terms, the research results demonstrate the effectiveness of using ESA for the restoration and strengthening of parts operating under difficult operating conditions, in particular in the friction units of the vehicle. The authors' experiments have confirmed the possibility of adjusting the microhardness and thickness of coatings by optimizing the processing modes and composition of the electrode material. As a result, it was concluded that electric spark alloying is an effective method of strengthening the surfaces of parts, ensuring their durability and operational reliability, and surpassing traditional technologies in several key parameters.

Key words: *electric spark alloying, structural steels, machine parts, equipment components, wear-resistant coatings, electrical erosion, phase transformations, microhardness, technological parameters.*

Relevance of the work. The reliability and durability of most modern and highly complex weapons and military equipment largely depend on the performance and service life of numerous friction units (tribosystems) and their various systems, mechanisms, individual machines, and assemblies.

In most cases, the failure of parts in mechanisms and machines begins at the surface areas. The surfaces of these parts are susceptible to wear, corrosion, fatigue, and other forms of damage. The reliability of tribosystems is primarily determined by the wear resistance of the moving and mating parts, which is influenced by the physical and mechanical properties of the materials used and the quality of the mating surfaces. The properties of tribosystem materials, like all structural materials, depend on their chemical composition and structure. For friction unit parts, the structure and properties of the surface layers are critical for the reliability and durability of the tribosystem. In today's environment of intensive operation for weapons and military equipment, the performance requirements for these products are becoming increasingly stringent. Enhancing newly manufactured components and worn parts is essential while extending their service life; this is a highly pressing task. One method of improving the performance of individual weapons and military equipment parts is to introduce new low-density materials that satisfy both technological and mechanical requirements.

The study aims to analyze how improving the equipment components for electric spark alloying can increase the durability and wear resistance of restored worn surfaces.

To achieve this goal, it is necessary to solve several problems: to analyze the physical processes of electric spark treatment (EST) and its effect on structural and phase transformations; to analyze the EST modes, alloying electrode materials on the phase composition of coatings; to substantiate the technologies for restoring worn surfaces of parts by electric spark alloying; to determine the effect of electric spark alloying modes on the microhardness and thickness of the formed coatings. Of course, within the framework of a single article, it is possible only partially to disclose individual tasks.

The object of the research is the physical processes of the restoration of parts by electrospark alloying. The subject of the study is the principles and technologies of restoration, as well as the features of obtaining wear-resistant coatings of individual parts by electrospark alloying. The practical significance of the results obtained is to provide the physical and mechanical properties, durability, and wear resistance of the restored worn surfaces of individual elements of the weapons and military equipment.

Analysis of recent research and publications. Article [1] provides an overview of modern thermal spraying technologies used in modern industry to strengthen machine parts. Particular attention is paid to analyzing coatings' microstructure, mechanical characteristics, and adhesive properties. The advantages and disadvantages of various spraying methods, such as cold spraying, plasma spraying, and high-speed oxy-fuel flame (HVOF) spraying, are discussed. The article contains the results of studies of the influence of sputtering parameters on the wear resistance and corrosion resistance of coatings.

Study [2] is devoted to characterizing coatings obtained by cold spraying. The authors consider the peculiarities of coating microstructure formation, their hardness, adhesion to the base material, and the effect of sputtering modes on mechanical properties. They analyze the applications of cold spraying, including the aviation, automotive, and energy industries. A comparative analysis of the efficiency of cold spraying compared to traditional coating methods is presented.

Paper [3] presents an overview of the mechanical properties of coatings obtained by high-speed oxy-fuel flame (HVOF) spraying. The influence of process parameters on coatings' hardness, shear strength, and wear resistance is discussed. Experimental data on structural changes in coatings depending on the composition of powder materials and application temperature are presented. Particular attention is paid to analyzing the use of HVOF coatings to strengthen parts operating under intense friction and high temperatures.

Paper [4] investigates the mechanical characteristics of thermal barrier coatings based on zirconium dioxide stabilized with yttrium oxide obtained by plasma spraying. It analyzes the coatings' microstructure, strength, hardness, and adhesive properties to the substrate. Particular attention is paid to the effect of porosity on heat resistance and resistance to thermal stress, which makes these coatings promising for the aviation and energy industries. Article [5] studies the relationship between the microstructure and mechanical properties of coatings applied by thermal spraying. The paper discusses the peculiarities of coating formation using various methods, including HVOF and plasma sputtering. The authors investigate the effect of powder particle size, sputtering temperature, and other process parameters on the formation of microcracks, adhesion, and the hardness of the resulting coatings.

Study [6] focuses on the wear and corrosion resistance of tungsten carbide (WC) coatings obtained by HVOF sputtering. Experimental results demonstrating the improvement of the mechanical characteristics of parts using such coatings are presented. Particular emphasis is placed on the influence of coating thickness and sputtering process parameters on performance properties and on their application in aggressive environments, particularly in the oil and gas industry. Article [7] investigates the mechanical and tribological properties of coatings produced by plasma sputtering. Particular attention is paid to the coatings' wear resistance and friction coefficient during operation under high loads. The influence of the coatings' structure on their wear resistance and durability is analyzed, which makes them promising for use in the mechanical engineering and aviation industries.

The review article [8] analyzes modern thermal spraying methods, including cold, plasma, and HVOF spraying. The authors consider the main features of each technique, their application in industry, and the advantages and disadvantages of improving the mechanical characteristics of parts. They also discuss prospects for developing spraying technologies, including their combination with other surface treatment methods. Article [9] analyzes the current state of cold gas-dynamic spraying technology. It considers the main technical and economic advantages of this method, such as the absence of thermal changes in the substrate material and the possibility of coating temperature-sensitive materials. The author discusses the possibilities of using cold spraying in the aerospace, automotive, and medical fields. Article [10] discusses innovative functional coatings obtained by thermal spraying. Special attention is paid to "smart" coatings that change their properties depending on operating conditions. The author analyzes current trends in developing coatings with high wear, oxidation, and corrosion resistance and their potential application in aviation and biomedical engineering.

Study [11] evaluates the properties of coatings obtained by thermal spraying, which resist high-temperature oxidation and corrosion. It considers the influence of coating composition and sputtering parameters on their performance. The results of tests of coatings in aggressive environments are presented, confirming their effectiveness for use in the energy and chemical industries.

Article [12] studies detonation-sprayed coatings based on titanium and chromium borides alloyed with nickel-aluminum-chromium alloy. It analyzes the microstructure, hardness, and wear resistance of such coatings, as well as their resistance to thermal stress. The work demonstrates the advantages of detonation spraying in creating high-strength and corrosion-resistant coatings for use in the aviation and defense industries.

The generalization of works [13–16] shows that using electrodes with nanostructured modifiers to form ultra-strong coatings with specified functional characteristics is extremely promising. Further improvement of the designs of installations for mechanized coating formation, which ensure process stability and high productivity, is significant and in demand.

Material and research results. Steel properties can be changed by changing its chemical composition or structure under the influence of external energy impact by various methods (mechanical, thermal, energy, or their combinations), including electric spark treatment (EST).

Electrospark alloying of metal surfaces is a phenomenon of electrical erosion and polar transfer of anode material to the cathode during pulsed discharges in a gas environment. The EIL process begins when the anode approaches the cathode and, at a distance between them equal to the breakdown value, the development of a spark discharge begins, which in many cases continues and ends after the electrodes come into contact [4–7]. After the breakdown of the interelectrode gap, localized foci of melting and evaporation develop on the surface of the electrodes, which cause electrical erosion of the electrodes. The eroded anode material is mainly transferred to the cathode. This ensures the formation of a surface layer on the cathode with the specified performance characteristics and physical and chemical properties. Since the anode material transfer process takes place in a gas environment, chemical compounds may be formed. As a result, the particles separated from the anode may not look like the anode material (Fig. 1).

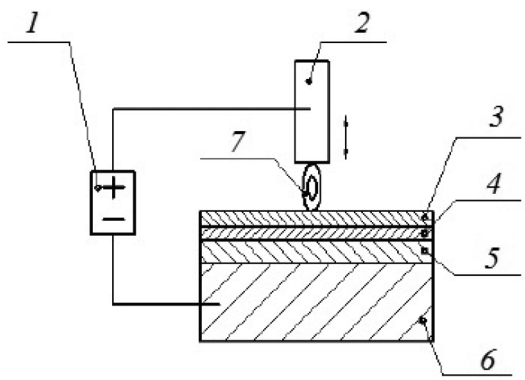


Fig. 1. Generalized diagram of the EIA process: 1 – pulse generator; 2 – alloying electrode (anode); 3 – coating layer; 4 – modified (hardened) layer; 5 – thermal impact zone; 6 – part (cathode); 7 – spark

Then, the anode (electrode) moves away from the cathode, and a layer of anode material remains on the latter's surface, which is firmly connected to the cathode [5].

In turn, the value of the changed characteristics is determined by the technological parameters of electrospark alloying (ESA), and specific physical and chemical properties will depend on the composition and properties of the electrode materials. Similarly, papers [5–7, 12, 13] consider the interaction of the anode with the cathode in contact under vibration. In compact materials used as the anode, the most common processing option is switching the anode with the cathode by vibration. In this case, the ESA process also begins with the anode approaching the cathode and the breakdown of the interelectrode gap. According to Townsend's theory of interelectrode gap breakdown, the minimum breakdown voltage in air at normal atmospheric pressure, depending on the electrode material, is 250–300 V [13].

Whereas when working with compact materials, the process under vibration conditions usually occurs at voltages U_p = 15...200 V, which are below the minimum of the Paschen curve and at distances equal to 0.01...10 μm, and the anode vibration frequency is usually in the range of 50...300 Hz. Based on these data, by the Paschen curve, the breakdown of the interelectrode gap at ESA can occur only when the electrodes are in contact. However, the studies obtained by [2, 5, 13, 14–16] and other scientists indicate that breakdown at such voltages occurs before physical contact of the electrodes.

At the onset of breakdown, an electric explosion of the contact bridge is reproduced at the initial stage, which provides preliminary surface cleaning and further formation of the interelectrode space for developing a plasma discharge. After the breakdown and the beginning of the spark discharge formation in 10^{-7}...10^{-8} s, the gas-discharge plasma of the channel, interacting with local areas of the anode and cathode, causes their electrical erosion. As a result, the electrode material is ejected into the interelectrode gap in the form of vapor and liquid droplet phases, and vapor evaporation and liquid phase ejection begin. At the moment of brittle fracture of the electrode material, a solid phase can enter the gap with steam and liquid during electrical erosion.

Electrical erosion, which occurs in gases and liquids due to the interaction of the spark discharge plasma with the electrode surface, is a complex process. Intense chemical interactions of materials, adhesion, and transfer of the anode material to the cathode also accompany mechanical contacts between the anode and cathode. A certain amount of energy, which in turn is carried by steam and liquid flows, depends on the thermophysical properties of the electrode material and the discharge parameters. Since these phenomena occur in a relatively small interelectrode gap, which gradually decreases, favorable conditions are created for the transfer of energy from the flows to the opposite electrodes. At the electrodes, in places of energy release under the influence of the electron-ion component of the gas-discharge plasma and flows of vapors and liquids, characteristic areas in the form of craters and molten erosion products are formed on the cathode surface in the form of a hole (a trace on the treated surface obtained as a result of the impact of electric discharges) and around it [11–17]. Therefore, during ESA, the surface of the workpiece (cathode) has the form of faces and depressions, the geometric dimensions and frequency of which determine the roughness and continuity of the treated surface. The emission of vapors and liquid droplets from the melt surface can occur as the pulse discharge develops. The emission of vapors and liquids and the reduction of the gap gradually lead to a significant increase in pressure in the electrode gap.

Several forces act on the converging liquid volumes of the cathode and anode: hydrodynamic pressure from the flares, gas kinetic pressure from the channel, electric field force, electrodynamic force, and reactive pressure.

As a result, the volume of liquid metal ejected from the hole is deformed under the influence of the resultant of these forces. Because this occurs practically in contact, the possibility of merging the liquid phases of the electrode materials and their intense hydrodynamic mixing is not excluded [8, 11].

Due to the polar effect of erosion and some of the previously mentioned factors, the transfer of eroded anode material to the cathode in the process of electrospark alloying forms surface layers on the cathode, which is the result of the interaction of electrode materials and the environment of the interelectrode gap. During polar transfer, the amount of liquid phase on the anode exceeds the cathode erosion, and subsequently, the surface layer formed on the cathode should mainly consist of anode material. However, hydrodynamic mixing can contribute to the fact that in this layer, it is possible to obtain a coating over the entire volume up to the surface not only of the anode material but, in some cases, also of cathode materials.

The crystallization and interaction of the liquid phases of the electrode material during electrospark alloying occur mainly on the surface of the cathode.

According to the authors of [7–11, 13], the melts of the electrode (anode) material, interacting with the environment and the cathode material, remain on its surface. As a result, the physical and chemical properties of the anode and cathode surfaces change.

The presence of the cathode material in the anode surface layer occurs both due to the flow of the vapor-droplet mixture and the mixing of the liquid phases, as well as because the electrode materials are prone to setting. The authors' experiments confirm that the properties of the surface layer change significantly during ESA. The surface layer is formed by the molten metal that remains on the hole's surface, and the adjacent metal layer is subjected to structural changes due to the rapid heating and cooling of the metal. However, the properties of this layer are not fully defined. Therefore, it is divided into zones to study the layer's properties, as shown in Fig. 2.

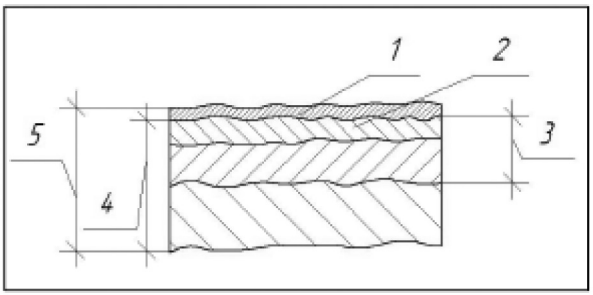


Fig. 2. Surface layer obtained after ESA: 1 – zone of deposition of the electrode (anode) material; 2 – "white" layer formed from the molten material of the workpiece; 3 – zone of thermal influence; 4 – zone of plastic deformation; 5 – changed surface layer

These zones have no clear distinction and overlap. Nevertheless, all central parts of the zones have characteristics that affect the properties of the entire surface and determine the possibility of further exploitation. Reputable researchers, particularly specialists from the Institute of General Energy of the National Academy of Sciences of Ukraine (Academician V. P. Babak and his scientific school), divide it into a white layer, a transition layer, and unchanged workpiece material (Fig. 3).

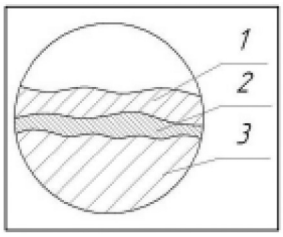


Fig. 3. Altered cathode surface layer obtained after ESA. 1 – "white" layer; 2 – transition layer; 3 – unchanged workpiece material

It is now believed that chemical and thermal transformations are observed in the «white» layer, a transition layer that includes a thermal impact zone and a diffusion zone under which there is an unchanged product material (cathode). The authors of [7–10, 12–14] believe that the distribution of zones depends on the base material and modes of electric spark alloying. The "white" layer has a fine-grained structure with high chemical resistance, making it difficult to detect by etching.

The formation of a «white» layer during electric spark alloying is associated with the effect of the transfer of electrode (anode) material to the cathode. The increased heat removal rate causes the temperature within the small layer to drop to the melting point and the corresponding phase transformations. Therefore, the crystallization and phase transformations accompanying the ESA process subsequently form nonequilibrium fine-grained structures. This layer looks like white stripes on a microscope, so it got its name. The «white» layer is poorly etched because it is in contact with the high-speed, high-temperature tempering zone, which has a more positive electrochemical potential. To eliminate the influence of this zone, the "white layer" is treated with reagents. Upon completion of the spark discharge and crystallization of the materials, the electrospark alloying phase begins on the anode and cathode surfaces – a dense physical contact occurs.

The last phase of the ESA process begins with reducing mechanical pressure between the electrodes, which is associated with removing the alloying electrode from the cathode (workpiece). It ends with the breakdown of the electrical circuit with the removal of the anode from the workpiece to a distance significantly exceeding the breakdown distance. In cases where specialized pulse generators (RC type) are used, a short arc may appear in the last phase of the process, which is a break in the contact system. Studies show that in ESA modes, the arc is absent when the Up voltage is in the range of 15–50 V. This is because during the contact break, due to transients, the voltage across the capacitor connected in parallel with the spark gap does not reach the maximum value of the short arc ignition potential. Higher voltage values do not significantly change the process of short arc formation since electrode erosion, in this case, can be neglected.

Compact electrodes represent the dynamics of the electro-spark alloying process and can have several options related to the characteristics of the electrode material, pulse parameters, kinematics of electrode movement, etc.

The process of electrospark alloying with compact electrodes includes the following cycles: formation of electrical contact between the anode (electrode) and the cathode (part), after the electrodes approach and breakdown between the electrode gap; electrical erosion of the electrodes; polar transfer and formation of a surface layer on the surface of the cathode (part or tool); breakdown of electrical contact between the anode and the cathode, at the moment of electrode divergence.

In addition, the processes at the anode and cathode are considered elementary, caused by the flow of a single discharge (erosion, interaction of material transfer), and accumulative, which are associated with the repeated action of pulsed discharges (creation of residual stresses, phases). Electrical erosion of electrodes is the destruction of the electrode surface, which is accompanied by metal removal at the moment of passing electric discharges between the electrodes. Electrical erosion of electrodes is a process that occurs at the interface between the discharge channel, on the one hand, and the cathode or anode, on the other. In general, electrical erosion is a physical phenomenon consisting of the directed ejection of electrode material under the influence of an independent electric discharge. In the case of electrodes surrounded by a gas environment, the described phenomenon is accompanied by the deposition of the ejected material on the opposite electrode, which, in turn, changes the discharge conditions. Erosion of the electrode alloying and transfer of the anode material to the cathode surface (part) occurs due to the asymmetry of heat in the "hot spot" of the communication bridges formed when the electrodes are closed. Thermophysical and thermoelectric effects mainly determine the contact-bridge transfer of matter. In this case, the energy that passes through the current bridges is used to melt the materials, and as the electrodes continue to pass between them, a molten bridge appears. The bridge breaks off at the alloying electrode's base because the molten metal's cooling rate on the surface is much higher. Thus, material transfer is directed towards the electrode, which is further away from the most heated point, often the cathode (part). Lesser erosion of the anode (electrode) compared to the cathode (part) erosion is due to the intense impact of the cooling media used (compressed air). The following phenomena accompany ESA:

– during the electrical erosion of the anode and cathode, the polarity effect is observed, namely, the erosion of one electrode increases over the other;

– electrical erosion of metals depends on the chemical composition of the materials of the electrodes, the part, the environment, etc;

– The amount of material ejected from the anode during the spark mode of a short circuit is no more than 10 %, but when the required modes are provided, it is about 100 % of the total charge of the capacitors.

The impact of an electric spark on the anode consists of melting and evaporation of metal, and on the cathode – as a microexplosion, accompanied by mechanical damage in the form of a hole with edges raised above the surface. The model of transferring material from the anode to the cathode will differ for each metal. When materials with low erosion resistance (tin, zinc) are applied to aluminum, the amount of metal ejected by a single pulse from the anode is significant. From the cathode, it is so negligible that it is neglected. Suppose the electro-erosion resistance of the cathode material is higher than that of the anode material. In that case, a coating is formed on the surface; if it is lower, holes are formed on the cathode surface. No coating is formed since the amount of material deposited on the cathode is less than the material ejected from the cathode surface.

Electric spark alloying changes the dimensions, relief (roughness), and physical, chemical, and mechanical properties of the workpiece's surface layer, producing working surfaces with the required performance characteristics. To strengthen and increase the wear resistance of the parts' surface, obtaining them with a minimum roughness ($Ra \approx 10$ μm) and sufficient thickness ($t \sim 0.5$ mm) is desirable.

Conclusions. The analysis of literature sources on surface hardening of parts to improve the mechanical and tribotechnical properties of these parts shows the continuous development of methods. At the same time, the existing surface hardening methods do not fully meet the current requirements for the efficiency of the processes of restoration of weapons and military equipment, for the simplicity of operation, and for the versatility and efficiency of technological restoration processes. Increasing requirements for surface strength and wear resistance of parts of friction units of complex mechanisms and machines of weapons and military equipment leads to the need to improve the known and develop new highly efficient technological methods of surface hardening of structural materials. Methods of surface modification of parts of mechanisms and machines (especially parts of tribosystems) with highly concentrated energy flows have great

potential. One of the most promising is the method of electrospark treatment, in which streams of high-energy-density particles are formed and used under pulsed impact on the workpiece, which allows creating surface structures with increased mechanical and tribotechnical properties with considerable simplicity of technological equipment and process efficiency.

Bibliography:

1. Rai S. K., Kumar A. A critical review on thermal spray based manufacturing technologies. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. P. 2257–2266. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503
2. Sova A., Grigoriev S., Okunkova A., Bertrand P. Cold-sprayed coatings: Microstructure, mechanical properties, and applications. *Progress in Materials Science*. 2021. Vol. 117. Article ID 100752. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2020.100752.
3. Lugscheider E., Bobzin K. Mechanical properties of HVOF coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 1998. Vol. 7, No. 2. P. 357–364. DOI: https://doi.org/10.1361/105996398770350276
4. Zhu D., Miller R.A., Chen Y. Mechanical properties of plasma-sprayed ZrO_2–8 wt% Y_2O_3 thermal barrier coatings. *NASA Technical Reports*. 2004. URL: https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20040191421/downloads/20040191421.pdf
5. Kumar R., Kumar S. Mechanical and microstructural properties of thermally sprayed coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30, No. 6. P. 1451–1467. DOI: https://doi.org/10.1007/s11666-021-01191-3
6. Javed M.A., Ang A. S. M., Berndt C. C., Wang J. Corrosion and mechanical performance of HVOF WC-based coatings with alloyed nickel binder for use in marine hydraulic applications. *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 418. Article ID 127202. DOI: https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2021.127202
7. Kumar R., Kumar S., Sharma A.K. Mechanical and tribological properties evaluation of plasma sprayed coatings. *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 853. Article ID 157007. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2020.157007
8. Kumar R., Kumar S. A review on coatings through thermal spraying. *Materials Today: Proceedings*. 2022. Vol. 56. P. 2257–2266. DOI: https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.03.503
9. Sun W., Chu X., Huang G., Liao H. Current implementation status of cold spray technology: A short review. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2022. Vol. 31, No. 5. P. 923–955. DOI: https://doi.org/10.1007/s11666-022-01382-4
10. Fauchais P., Vardelle M., Vardelle A. Beyond traditional coatings: A review on thermal-sprayed functional and smart coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2019. Vol. 28, No. 5–6. P. 598–644. DOI: https://doi.org/10.1007/s11666-019-00857-1.
11. Zhang Y., Li C., Wang Y. Thermal spray coatings on high-temperature oxidation and corrosion resistance. *Materials Today Sustainability*. 2023. Vol. 21. Article ID 100263. DOI: https://doi.org/10.1016/j.mtsust.2023.100263
12. Khorasani M., Ghomashchi R. Detonation-sprayed coatings of (Ti, Cr)B_2-NiAlCr: Structure and properties. *Journal of Thermal Spray Technology*. 2021. Vol. 30, No. 8. P. 2034–2049. DOI: https://doi.org/10.1007/s11666-021-01221-0
13. Gitlevich A.E., Mikhailov V.V., Parkansky N.Ya., Revutsky V.M. *Electrospark alloying of metallic surfaces*. Kishinev : Shtiintsa, 1985.
14. Ageev E.V., Ageeva E.V., Karpenko V.Yu., Osminina A.S. Studying tungsten-containing electroerosion powders and alloys synthesized from them. *Journal of Nano- and Electronic Physics*. 2014. Vol. 6, No. 3. P. 03049-1–03049-3.
15. Nikolenko S.V., Kuz'menko A.P., Timakov D.I., Abakumov P.V. Nanostructuring a steel surface by electrospark treatment with new electrode materials based on tungsten carbide. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. Vol. 47, No. 3. P. 217–224. DOI: https://doi.org/10.3103/S1068375511030101
16. Shchepetov V.V., Kharchenko O.V., Kharchenko S.D. *Wear-resistant protective coatings: Monograph* / ed. by V.P.Babak. Kyiv : Nash format, 2020.

Курдюк С.В., Маслій О.М., Мельник О.М., Онищенко О.А., Чеча О.П.

ФІЗИКО-ТЕХНОЛОГІЧНИЙ АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОІСКРОВОЇ ОБРОБКИ ВІДНОВЛЮВАНИХ ДЕТАЛЕЙ ІЗ КОНСТРУКЦІЙНИХ І ІНСТРУМЕНТАЛЬНИХ СТАЛЕЙ

Надійність і довговічність вузлів тертя в сучасному озброєнні та військовій техніці (ОВТ) значною мірою залежать від фізико-механічних властивостей матеріалів деталей та якості їхньої поверхневої обробки. Одним із перспективних методів підвищення експлуатаційних характеристик ОВТ є електроіскрове легування (ЕІЛ), що дозволяє створювати зміцнені покриття з високою зносостійкістю. У статті розглянуто фізичні процеси, що відбуваються під час ЕІЛ, зокрема

електричну ерозію, полярний перенос матеріалу та структурно-фазові перетворення поверхневого шару. Показано, що перспективним є використання електродів із наноструктурними модифікаторами для формування надміцних покриттів із заданими функціональними характеристиками, що подальше удосконалення конструкцій установок для механізованого формування покриттів, що забезпечують стабільність процесу та високу продуктивність є вкрай актуальним. Проведено аналіз режимів процесу, параметрів електродів та їхнього впливу на формування покриттів. Наведено механізм утворення поверхневих шарів та особливості їхньої кристалізації. Встановлено, що застосування ЕІЛ сприяє утворенню білих шарів із дрібнозернистою структурою, які характеризуються високими механічними властивостями та корозійною стійкістю. Подальший аналіз технологічних параметрів ЕІЛ продемонстрував значний вплив матеріалу електрода на склад і характеристики отриманих покриттів. Визначено вплив режимів імпульсного розряду на глибину проникнення легуючих елементів у поверхневий шар деталі. Показано, що необхідно особливу увагу приділяти впливу газового середовища міжелектродного проміжку на кінетику процесу перенесення матеріалу. У практичному аспекті результати досліджень демонструють ефективність застосування ЕІЛ для відновлення та зміцнення деталей, що працюють у складних умовах експлуатації, зокрема у вузлах тертя ОВТ. Проведені експерименти авторів підтвердили можливість регулювання мікротвердості та товщини покриттів шляхом оптимізації режимів обробки та складу електродного матеріалу. У підсумку зроблено висновок про те, що електроіскрове легування є ефективним методом зміцнення поверхонь деталей, що забезпечує їхню довговічність і експлуатаційну надійність, перевершуючи традиційні технології за рядом ключових параметрів.

Ключові слова: *електроіскрове легування, конструкційні сталі, деталі машин, компоненти обладнання, зносостійкі покриття, електрична ерозія, фазові перетворення, мікротвердість, технологічні параметри.*

УДК 539.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/02

Лавінський Д. В.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Аніщенко Г. О.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Конохов В. І.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ТЕРМОПРУЖНІСТЬ СКЛАДЕНИХ ПРЕС-ФОРМ ДЛЯ ПРЕСУВАННЯ НАГРІТИХ ПОРОШКОВИХ МАТЕРІАЛІВ

В роботі розглядається аналіз термопружного деформування складених циліндричних матриць з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів, призначених для ізостатичного пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів. У теперішній час велику популярність набули технологічні процеси виготовлення деталей та елементів конструкцій із порошкових матеріалів. Одним з напрямів є ізостатичне пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів у складених матрицях з вуглець-вуглецевих композитних матеріалів. Інтенсифікація виробничих технологічних процесів призводить до підвищення механічних та температурних навантажень на обладнання. Розрахункове дослідження деформування обладнання разом із заготовкою дозволяє зробити рекомендації стосовно раціональних значень конструкційних та експлуатаційних параметрів, за яких, по-перше, обладнання залишається працездатним, а, по-друге, досягається мета технологічної операції. У статті розглянуто розрахункові дослідження термопружного деформування системи «складена матриця – заготовка» за умов ізостатичного пресування нагрітих порошків надміцних матеріалів. Розрахунковий аналіз базується на послідовному розв'язанні двох задач: задачі нестаціонарної теплопровідності та задачі термопружного деформування з урахуванням особливостей контактної взаємодії поміж складових елементів конструкції. Розв'язано задачу нестаціонарної теплопровідності та зв'язану із нею задачу термопружності, на базі чого визначені небезпечні режими нагріву з точки зору навантаженості матриці. В якості чисельного метода розв'язання використовується метод скінчених елементів. Базовим обрано вісесиметричний чотирьох вузловий ізопараметричний скінченний елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень. Контактна взаємодію моделюється шляхом введення шарів спеціальних контактних скінченних елементів. Наведено результати розрахунків, що ілюструють розподіл температури та основних характеристик напружено-деформованого стану у різні моменти часу упродовж технологічного циклу пресування.

Ключові слова: *термопружність, нестаціонарна теплопровідність, пресування порошкових матеріалів, контактна взаємодія, метод скінченних елементів.*

Постановка проблеми. У даний час розвиток обробних технологій у машинобудуванні йде шляхом втілення нових інноваційних процесів, до яких слід віднести й пресування (компактування) порошкових матеріалів. Використання порошкових матеріалів дозволяє з меншими технологічними затратами одержувати вироби необхідної форми, також в даному випадку є можливість на етапі створення коригувати фізико-механічні властивості готових виробів. Широке застосування знаходить використання технологій пресування порошків у разі необхідності обробки надміцних тугоплавких матеріалів типу карбіду вольфраму, кобальту, нікелю. Доволі часто супровідним чинником процесів пресування порошків є підвищена температура заготовки. В рамках подібних технологічних процесів інтенсивному навантаженню піддається обладнання прес-форми. Можуть виникнути такі умови, що призведуть до втрати працездатності та руйнування прес-форми.

Розрахункові дослідження процесу деформування технологічної системи «прес-форма – заготовка» дозволяють з невеликими матеріальними затратами визначати раціональні експлуатаційні

та конструкційні параметри, за яких елементи прес-форми залишаються працездатними та, при цьому, досягається мета технологічної операції, тобто отримується готовий виріб із необхідними фізико-механічними властивостями. Зрозуміло, що адекватний розрахунковий аналіз повинен містити усі необхідні супутні аспекти, наприклад, дослідження стосовно розподілу температурного поля та подальший аналіз термодеформування.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Слід відзначити, що на даний момент є достатньо інформаційних джерел, у яких докладно висвітлені принципи та сучасні тенденції розвитку технологічних операцій пресування порошкових матеріалів. Наприклад, можна відзначити роботи [1–5]. Існують різні способи передачі навантаження на заготовку. Найбільш поширеним є схеми осьового та радіального пресування. Разом із цим для підвищення щільності виробів, які одержуються, може застосовуватись технологія ізостатичного пресування у холодному та гарячому варіантах [6, 7]. У другому варіанті заготовка попередньо піддається нагріву. Температура заготовки при цьому може спричиняти значний нагрів елементів прес-форми, що, в свою чергу, призводить до додаткового механічного навантаження.

Складні умови експлуатації прес-форм вимагають використання матеріалів з підвищеними характеристиками міцності. При рівнях тиску 40–100 МПа та температурах заготовки до 1800 °С можна використовувати для елементів прес-форми вуглець-вуглецевий композитний матеріал (ВВКМ), який має високі механічні властивості при підвищених температурах [8, 9].

Взагалі, ВВКМ у даний час все більше використовуються у різних галузях машинобудування та обробки матеріалів. Завдяки своїй високій міцності, стійкості до високих температур і низькому коефіцієнту теплового розширення ВВКМ використовуються в різних сферах. Вони використовуються у аерокосмічній галузі, у медицині (протезування), а також для ізоляції печей і обладнання для високотемпературної обробки.

Незважаючи на достатню кількість інформаційних джерел стосовно технологічних процесів пресування порошкових матеріалів, деякі питання залишаються недостатньо опрацьованими. Це може відноситись, у тому числі й до питань розрахунків на міцність елементів прес-форм з урахуванням усіх можливих чинників навантаження. Таким чином, тема роботи є актуальною у науковому і практичному сенсі.

Постановка завдання. На рис. 1 наведено модель складеної прес-форми, яка призначена для ізостатичного пресування нагрітих порошків високоактивних надміцних сполук. Прес-форма містить наступні елементи: зовнішню матрицю та пуансони (з ВВКМ) та графітовий вкладиш. Вкладиш разом із готовим виробом виймається з заготовки, матриця та пуансони повинні витримувати декілька циклів пресування. Загальна висота прес-форми складає 540 мм, зовнішній діаметр – 340 мм, висота виробу (заготовки) обрана як 0,55 висоти прес-форми. Діаметр заготовки дорівнює 120 мм, співвідношення поміж зовнішнім діаметром графітового вкладиша та зовнішнім діаметром дорівнює 0,850.

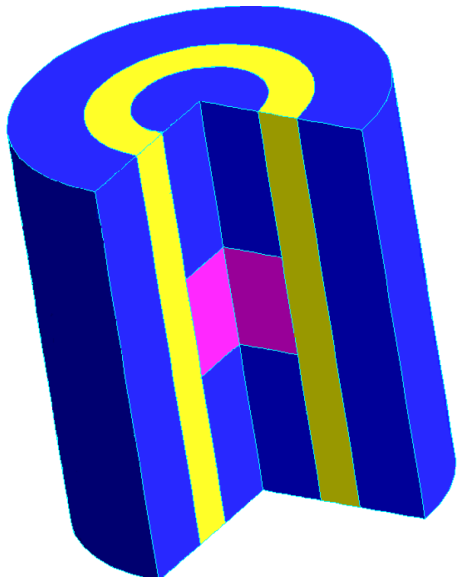


Рис. 1. Геометрична модель складеної прес-форми: сині – матриця та пуансони з ВВКМ; жовтий – вкладиш з графіту; бузковий – компактована заготовка

У таблиці 1 приведені фізико-механічні характеристики матеріалів елементів прес-форми, які використовувалися у подальших розрахунках.

Таблиця 1

Фізико-механічні характеристики матеріалу елементів прес-форми

	Пуансони (ВВКМ)	Матриця (ВВКМ)	Вкладиш (графіт АРВ-1)
E, ГПа	18	18	10,5
ν	0,19	0,19	0,2
$(\sigma_+)_B$, МПа	100	100	15
$(\sigma_-)_B$, МПа	110	110	51,5
α_T, 1/°С	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$	$3{,}5 \cdot 10^{-6}$	$6 \cdot 10^{-6}$
ρ, кг/м^3	1500	1500	1600
λ, Вт/(м · К)	130	130	120
c, Дж/(кг · К)	1700	1700	1700

Ціллю роботи є оцінка впливу режимів температурного навантаження на деформування елементів прес-форми.

Виклад основного матеріалу. Поставлене завдання потребує розв'язання двох задач: задачі нестаціонарної теплопровідності та задачі термодеформування. Дослідження поширення температури і подальшого термодеформування тіл складної конфігурації в рамках єдиної постановки можливо тільки із застосуванням чисельних методів аналізу, найбільш ефективним з яких є метод скінченних елементів (МСЕ).

Умови навантаження, закріплення і розподілу температури в реальній прес-формі практично не залежать від окружної координати, що дозволяє розглядати задачу в вісесиметричній постановці. У даному випадку нестаціонарний розподіл температури у елементах прес-форми розглядався із граничними умовами конвекційного теплообміну. Розподіл основних характеристик процесу деформування розглядався у рамках термопружної постановки. Базовим скінченним елементом обрано ізопараметричний чотирьох вузловий елемент із білінійною апроксимацією температури та переміщень.

Окремі питання стосувались урахуванню контактної взаємодії – для цього на межах контакту вводились спеціальні контактні шари. Вони були дискретизовані за допомогою спеціальних контактних скінчених елементів, властивості яких задавалися відповідно до рекомендацій, наведених у роботі [10]. Відзначимо, що коефіцієнт тертя на межах розділу пуансон – вкладиш, і вкладиш – матриця задавався рівним 0,18; на межах розділу вкладиш – заготовка рівним 0,22.

Схематизований режим зміни температури заготовки в процесі пресування можна представити наступним чином: пресування заготовки відбувається протягом 100 с, коли температура заготовки постійна і становить 1800 °С. Далі протягом 25 с в реальності заготовка відсутня в прес-формі, проте елементи прес-форми практично не встигають охолоджуватись, далі – наступне пресування. Таким чином, можна розглядати задачу нестаціонарної теплопровідності за умови, що у часовому інтервалі від 0 до 1175 с (10 пресувань) у прес-формі знаходиться заготовка нагріта до 1800 °С. При розв'язанні задачі нестаціонарної теплопровідності варіювався крок за часом: Δt = 0,5 с; 0,25 с; 0,1 с; 0,05 с. Виявилося, що при зміні кроку від 0,1 до 0,05 с максимальна різниця в розподілі температури не перевищує 2 %.

На рис. 2 та 3 представлені розподіли температур, що встановилися в прес-формах на 100 с (наприкінці 1-го пресування) та сталий розподіл. Найбільш нагрітими елементами прес-форми є вкладиш, центральний стержень і пуансони.

Наприкінці 1-го пресування (100 с) більша частина зовнішньої матриці є практично не нагрітою.

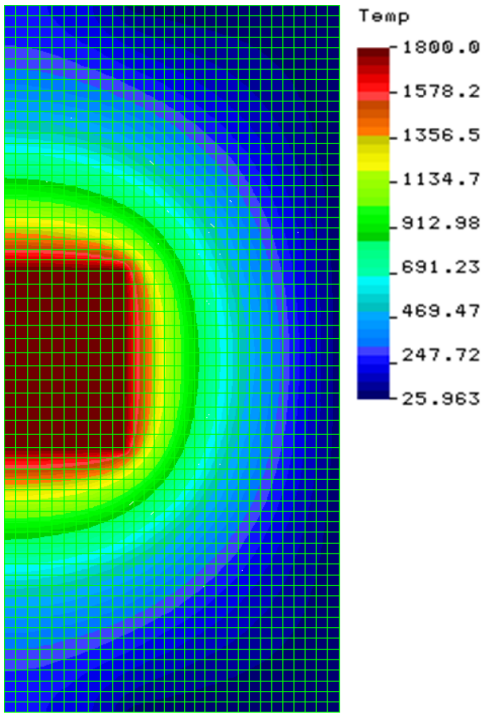


Рис. 2. Розподіл температури на 100 с

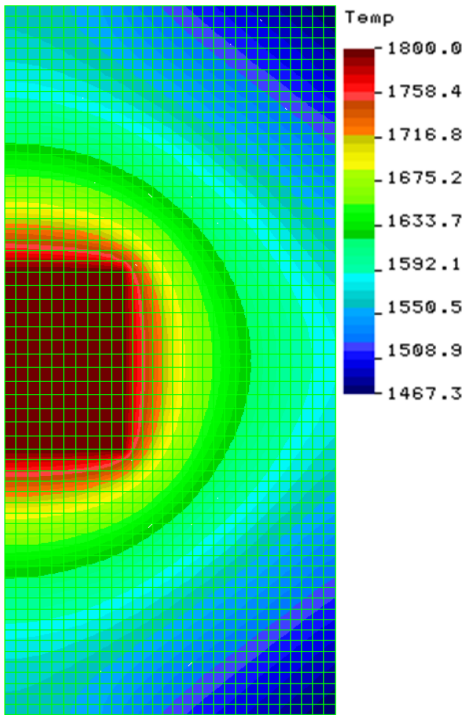


Рис. 3. Сталий розподіл температури

У даному випадку має місце значний перепад температури по товщині прес-форми: у точках, які належать середині висоти прес-форми температура змінюється від 1000 °С до температури зовнішнього середовища – 30 °С.

У випадку сталого розподілу температури перепад по товщині прес-форми є менш значним у порівнянні із моментом часу 100 с: максимальна температура встановлюється така ж, як і у нагрітій заготовці – 1800 °С, мінімальна на рівні приблизно 1550 °С. Найменш нагрітими є області прес-форми найбільш віддалені від заготовки, проте на сталому режимі і тут температура стає значною – порядку 1470 °С.

На рис. 4 представлені графіки залежності від часу температури в різних точках прес-форми. Наведені графіки показують, що сталий режим навіть в найвіддаленіших точках від джерела тепловиділення досягається приблизно за 300 с (крива 4), що відповідає вже третьому пресуванню, таким чином, при всіх наступних пресуваннях елементи прес-форми будуть знаходитися в сталому температурному режимі і розгляд даного режиму є обґрунтованим в даному випадку.

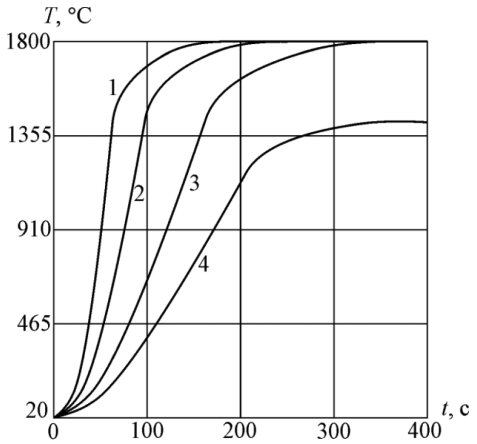


Рис. 4. Залежність від часу температури в різних точках прес-форми: 1 – внутрішня межа вкладиша; 2 – внутрішня межа матриці; 3 – зовнішня межа вкладишу; 4 – зовнішня межа матриці

Для точок, що належать внутрішній поверхні вкладиша і торцям пуансонів, які стикаються з нагрітою заготовкою, температура досягає 1800 °С вже при першому пресуванні в момент часу приблизно рівному 85 с. В цілому, слід зазначити, що швидше за все нагріваються ті області елементів прес-форми, які розташовуються в безпосередній близькості від нагрітої заготовки.

Температурне поле було визначено для різних розмірів пресованої заготовки і для різних співвідношень «товстостінності» вкладиша і матриці. Відзначимо, що якісно розподіли температури в кожному випадку є ідентичними. При більшій товщині вкладиша температура матриці виявляється нижче, але при цьому різниця не перевищує 20 °С.

Перейдемо до аналізу НДС складеної прес-форми, яка піддається силовому і температурному впливу. Розглянемо два граничних режиму температурного впливу на елементи прес-форми: режим першого пресування, коли прес-форма не нагріта та сталий режим розподілу температури (заготовка вважається нагрітою рівномірно).

Очевидно, що в цих двох випадках елементи прес-форми будуть навантажені по-різному, найбільший інтерес представляє випадок максимального навантаження елементів прес-форми, особливо зовнішньої матриці і пуансонів, які повинні витримувати кілька циклів пресування. Для оцінки ступеня впливу режиму температури на навантаженість елементів прес-форми був проведений аналіз НДС системи, яка моделює прес-форму для виготовлення виробів з порошкових матеріалів. Разом із температурним навантаженням враховувався також й тиск пресування: 30 МПа.

Для визначення НДС компонентів прес-форми використовувались дані розв’язання задачі стаціонарної та нестаціонарної теплопровідності (для режиму першого пресування у момент часу 100 с). На рис. 5 та 6 наведені результати із розподілу інтенсивності напружень у елементах прес-форми при двох режимах температурного навантаження.

Відзначимо, що значних якісних відмінностей в розподілі компонент НДС при режимі першого пресування та при сталому розподілі температури не спостерігається: і матриця, і пуансони є навантаженими практично однаково. Проте у кількісному вимірі матриця є найбільш навантаженою саме при сталому режимі. Максимальна інтенсивність напружень у матриці при сталому розподілі температури складає 38 МПа проти 20 МПа у момент часу 100 с. Також у достатньо високому ступеню є навантаженими пуансони.

Висновки. В роботі розглянуті питання розрахункового аналізу розподілу нестаціонарного температурного поля та процесу термодеформування складених прес-форм, які використовуються для виготовлення шляхом гарячого ізостатичного пресування виробів з порошків надміцних тугоплавких сполук. Розглянуто варіант виконання прес-форми, яка містить зовнішню матрицю

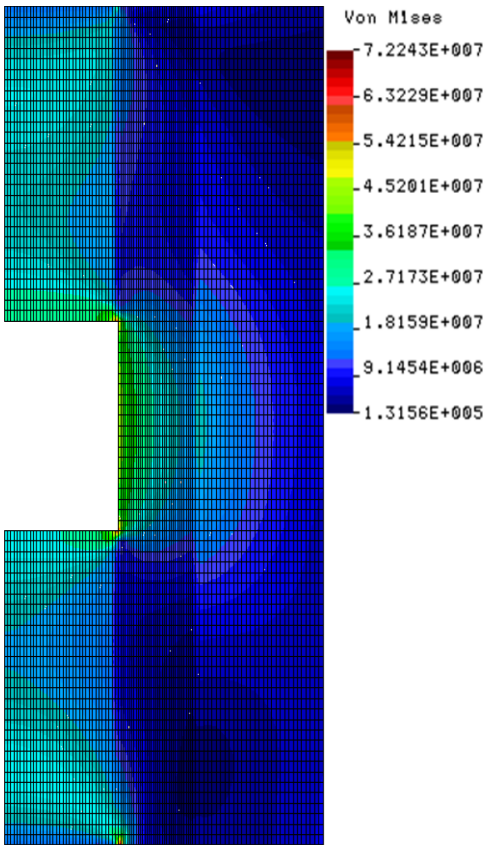


Рис. 5. Інтенсивність напружень у момент часу 100 с

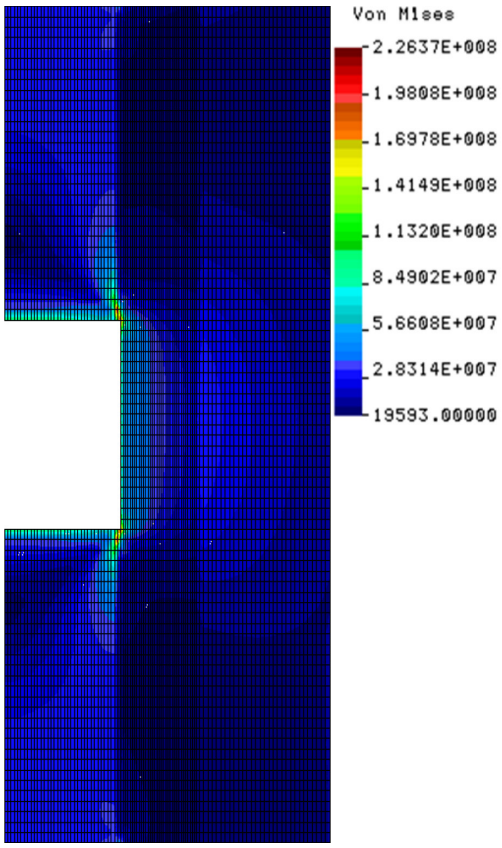


Рис. 6. Інтенсивність напружень за умов сталого розподілу температури

(ВВКМ), пуансони (ВВКМ) та вкладиш (графіт). Чисельні дослідження виконані із застосуванням методу скінченних елементів, поміж складових перс-форми враховані умови контактної взаємодії. Розв'язано задачу нестаціонарної теплопровідності та, на її основі – задачу термодеформування. Визначено, що з умови сталого розподілу температури елементи прес-форми стають найбільш навантаженими.

Подальші дослідження стосуються міцності елементів прес-форми із застосуванням відповідних критеріїв та врахування у розрахункових процедурах залежності фізико-механічних властивостей від температури.

Список літератури:

1. Mamalis A.G., Manolakos D.E., Kladas A.G., Koumoutsos A.K. Electro-magnetic tooling for metal forming and powder compaction: numerical simulation. *High Speed Forming*: Proceedings of the 1 st International Conference. 2004. P. 143–154.

2. Thümmler F., Oberacker R. An introduction to powder metallurgy. CRC Press., 2024. 325 p.

3. Angelo P.C., Subramanian R., Ravisankar B. Powder metallurgy: science, technology and applications. PHI Learning Pvt. Ltd., 2022. 323 p.

4. Rodriguez-Contreras A., Punset M., Calero J.A., Gil F.J., Ruperez E., Manero J.M. Powder metallurgy with space holder for porous titanium implants: A review. *Journal of Materials Science & Technology*. 2021. Vol. 76. P. 129–149.

5. Гогаєв К.О., Радченко О.К., Нгуен К.К., Радченко Л.О. Одержання біметалів методами порошкової металургії (Огляд). *Сучасні проблеми фізичного матеріалознавства*. Київ : ІПМ НАН України. 2011. Вип. 20. С. 101–107.

6. Шеремет В.І., Втерковський М.Я., Тесля С.Ю., Соловйова Т.О. Оптимізація процесу холодного ізостатичного пресування порошків магнію та його сплавів. *Наукові нотатки*. Луцьк : ЛНТУ. 2024. Том 1. Вип. 79–80. С. 65–69.

7. Atkinson H.V., Davies S. Fundamental aspects of hot isostatic pressing: An overview. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2000. Vol. 31. No. 12. P. 2981–3000.

8. Devi G.R., Rao K.R. Carbon-Carbon Composites – An Overview. *Def. Sci. J.* 1993. Vol. 43. P. 369–383.

9. Anilas K., Surendranathan A. O. Carbon-Carbon composites – A review. *UPI Journal of Engineering and Technology*. 2018. Vol. 1. No. 1. P. 8–19.

10. Lavinskii D. V., Bondar' S. V. Study of thermoelastoplastic contact deformation of production tooling mixed structures. *Strength of materials*. 2011. Vol. 43. No. 4. P. 447–454.

Lavinsky D. V., Anischenko G. O., Konokhov V. I. THERMOELASTICITY OF COMPOSITE MOLDS FOR PRESSING HEATED POWDER MATERIALS

The paper considers the analysis of thermoelastic deformation of folded cylindrical molds made of carbon-carbon composite materials intended for isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials. At present, technological processes for the manufacture of parts and structural elements from powder materials have become very popular. One of the directions is isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials in folded molds of carbon-carbon composite materials. Intensification of production technological processes leads to an increase in mechanical and temperature loads on equipment. The computational study of the deformation of the equipment together with the workpiece allows us to make recommendations regarding the rational values of design and operational parameters, under which, firstly, the equipment remains operational, and, secondly, the goal of the technological operation is achieved. The paper considers the computational studies of thermoelastic deformation of the system "folded mold – workpiece" under the conditions of isostatic pressing of heated powders of heavy-duty materials. The computational analysis is based on the sequential solution of two problems: the problem of non-stationary transient heat transferring and the problem of thermoelastic deformation, taking into account the peculiarities of contact interaction between the constituent elements of the structure. The problem of non-stationary transient heat transferring and the related problem of thermoel asticity are solved, on the basis of which dangerous heating modes in terms of matrix load are determined. The method of finite elements is used as a numerical method of solution. An axisymmetric four-node isoparametric finite element with a bilinear approximation of temperature and displacements was chosen as the baseline. Contact interaction is simulated by introducing layers of special contact finite elements. The results of calculations illustrating the distribution of temperature and the main characteristics of the stress-strain state at different points of time during the technological cycle of pressing are presented.

Key words: *thermoelasticity, non-stationary transient heat transferring, pressing of powder materials, contact interaction, finite element method.*

УДК 621.891
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/03

Петров О. Д.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Корбут Є. В.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ПІДВИЩЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ РІЗАЛЬНОГО ІНСТРУМЕНТА ШЛЯХОМ МОДИФІКАЦІЇ ЙОГО РОБОЧИХ ПОВЕРХОНЬ

У статті розглянуто методи підвищення працездатності різального інструменту шляхом нанесення зносостійких покриттів на робочі поверхні. Протягом останніх десятиліть розроблено різні методи підвищення зносостійкості ріжучого інструменту(РІ). З'ясовано, що найбільшої актуальності набувають технології отримання на робочій поверхні ріжучого інструменту зносостійких та зміцнених покриттів високоенергетичною обробкою. Кожен із відомих в даний час методів мають свої переваги та недоліки, що обмежують сферу їх застосування. Визначено, що розробка ефективного, досить простого для освоєння в промисловому виробництві та економічного методу підвищення зносостійкості РІ залишається актуальним науковим та практичним завданням. Розглянуто процеси руйнування РІ у переважній більшості випадків починаються з робочих поверхневих зон. Робочі поверхні РІ зазнають інтенсивного зношування, втомного та інших видів руйнування. З'ясовано, що надійність РІ визначається головним чином зносостійкістю, яка залежить від фізико-механічних властивостей матеріалів та якості обробки сполучених поверхонь. Властивості інструментальних матеріалів, які використовують для виготовлення РІ, залежить від хімічного складу та їх структури. При цьому визначальним для надійності та довговічності РІ є структура та властивості поверхневих шарів. В даний час поширеним методом поверхневого зміцнення є створення функціональних тонких покриттів (плівок) на робочій поверхні РІ. Покриття, що формується на поверхні, утворюється за рахунок хімічних реакцій та дифузійних процесів між структурними елементами матеріалу, парогазових сумішей, або струмопровідного середовища та електричного поля. У цьому випадку структура внутрішніх шарів матеріалу залишається незмінною. Покриття можуть формуватися при електроосадженні (хромування, нікелювання, оксидування та інші) та напиленні (газополуменевим, плазмовим, детонаційним та інших) частинок матеріалів. Отже, підвищення зносостійкості РІ, як частини трибосистеми є актуальним науково-технічним завданням сучасного машинобудування. Це завдання належить до найбільш складних у науці та техніці, оскільки вимагає аналізу складних взаємопов'язаних процесів у зоні тертя, які можна вивчити і описати тільки на основі фундаментальних положень фізики, хімії, матеріалознавства.

Ключові слова: *зносостійке покриття, ріжучій інструмент(РІ), процес різання, PVD метод фізичного осадження, CVD метод хімічного осадження, дискретні покриття, композитні матеріали (КМ), полімерні композитні матеріали (ПКМ), покриття дискретної структури, якість поверхні, дефектний шар.*

Постановка завдання. На сьогоднішній день різальний інструмент(РІ) виготовляється з різних інструментальних матеріалів, таких як інструментальні сталі, тверді сплави, кераміка та інше. Кожен інструмент має свою середню стійкість – це час, після якого необхідно зупинити верстат, зняти зношений різальний інструмент і поставити інший. Стійкість інструменту, крім режимів різання, складається з багатьох так званих «інструментальних» факторів, у тому числі тип інструментального матеріалу, технологія виготовлення інструменту, характер заточування, властивості пари «оброблюваний матеріал – інструментальний матеріал» та інших. При обробці нових сучасних матеріалів стійкість інструментального матеріалу часто не задовольняє виробничим вимогам, тому інженери шукають способи підвищення стійкості різального інструменту різними методами. Найбільш продуктивний спосіб зміцнення різального інструменту, методами нанесення покриттів, завдяки якому стійкість інструменту зростає 1,5, …, 4 рази [2]. Поверхня різального

інструменту піддається найбільшому зносу через безперервний контакт з іншими щільними структурами в тому числі абразивом. Питання використання різального інструменту з модифікованими робочими поверхнями у вигляді дискретних ділянок для обробки деталей із полімерних композиційних матеріалів (ПКМ) на сьогодні недостатньо вивчене [3]. Проведений аналіз існуючих рішень та методів обробки для підвищення та забезпечення якості оброблюваної поверхні показав, що одним із перспективних напрямків вирішення проблеми є дослідження, що до модифікування робочої поверхні свердла, шляхом нанесення на нього покриття дискретного типу є актуальним. Використання в машинобудуванні, авіабудуванні композитних матеріалів (КМ) для дедалі більшої кількості деталей, виробів та вузлів вимагають вирішення питання про надійність з'єднань таких деталей та вузлів. Як наслідок, необхідність отримання якісних поверхонь після механічної обробки КМ. Якість поверхневого шару – важлива експлуатаційна характеристика, що впливає на якість спряжених поверхонь, їхню герметичність, довговічність та інше. Зменшення, після механічної обробки дефектів озитивним чином позначиться на надійності з'єднань. На сьогодні багато досліджень проводяться з пошуку нових за складом покриттів, які дозволять підвищити зносостійкість інструменту для обробки деталей з ПКМ і завдяки цьому – підвищити ефективність (технологічно та економічно) обробки без зниження якості отриманих виробів. Проте існуючі роботи проводились з покриттями суцільного типу [4], дослідження з дискретними поверхнями покриттів та впливу розміщення по тілу РІ даних дискретних покриттів на якість обробленої поверхні деталей з ПКМ не проводились і потребують подальших досліджень. Для забезпечення експлуатаційних характеристик виробу з ПКМ необхідно створити такі умови різання, при яких товщина дефектного шару була б мінімальна при його обробці. РІ з дискретними поверхнями покриттів має забезпечити рішення цієї задачі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У сучасному машинобудуванні все частіше використовують композиційні матеріали з причини їх високій ефективності через полегшену вагу та чудову стабільність у порівнянні зі стандартними матеріалами [1]. Ця тенденція визначає створення виробниками різального інструменту нових лінійок інструментальних матеріалів, сплавів, покриттів та геометричних форм, що відповідають задачі з обробки композиційних матеріалів. Ці матеріали повинні мати підвищену поверхневу зносостійкість і відносно високу міцність і в'язкість. До таких матеріалів відносяться, в першу чергу, матеріали, на які нанесено спеціальні високотверді і зносостійкі покриття. Покриття доцільно розглядати як своєрідне проміжне середовище, яке з одного боку може суттєво впливати і змінювати поверхневі властивості інструментального матеріалу, а з іншого – впливати на контактні процеси, деформації, сили і температури різання, спрямованість теплових потоків, термодинамічний стан різальної частини інструменту і т. ін. Керуючи властивостями покриттів шляхом варіювання його хімічним складом і будовою, можна змінювати основні характеристики процесу різання. Так покриття може сприяти зниженню тертя в зонах фрикційного контакту на передній і задній поверхнях інструменту і зменшенню потужності фрикційних джерел тепла, зниженню активності дифузійних процесів, що сприяє меншому зношуванню. Все це дозволяє, зрештою, керувати найважливішими вихідними параметрами процесу різання – зносом інструменту та якістю поверхневого шару оброблюваних деталей. Нанесення зносостійких покриттів на інструментальні матеріали дозволяє наблизитися до вирішення завдання створення «ідеального» інструментального матеріалу, що має високу зносостійкість у поєднанні з достатньою міцністю і в'язкістю.

Зазначені умови можна розглядати з трьох різних позицій: 1. З позиції експлуатаційної стійкості: покриття повинне бути стійким проти корозії та окислення; покриття повинне зберігати свої властивості при підвищених температурах; покриття не повинно мати різних дефектів, таких як пори, сторонні включення і т. ін.; покриття повинне мати високу межу витривалості. 2. З точки зору спеціальних характеристик по відношенню до оброблюваного матеріалу: твердість покриття повинна бути більш, ніж в 1,5–2 рази вище твердості оброблюваного матеріалу; матеріал покриття повинен мати низьку схильність до адгезії з оброблюваним матеріалом; матеріал покриття повинен мати мінімальну здатність до дифузійного розчинення в оброблюваному матеріалі; матеріал покриття повинен мати максимальну відмінність у кристалохімічній будові у порівнянні з оброблюваним матеріалом. 3. З точки зору спеціальних характеристик по відношенню до інструментального матеріалу, що визначаються умовами нанесення на інструментальний матеріал: матеріал покриття повинен бути максимально подібний з точки зору кристалохімічної будови з інструмен-

тальним матеріалом; матеріал покриття повинен мати мінімальні відмінності у фізико-механічних і теплофізичних властивостях з інструментальним матеріалом; мати мінімальну ймовірність для проходження твердофазних дифузійних реакцій з матеріалом інструменту при підвищених температурах різання.

Для забезпечення виконання зазначених позицій при розробленні та застосуванні методів нанесення і формування самих покриттів необхідно одночасно домагатися виконання наступних задач: 1. Мінімальної адгезійної взаємодії між оброблюваним матеріалом і покриттям; 2. Максимальної адгезійної взаємодії між інструментальним матеріалом і покриттям; 3. Забезпечити формування оптимальної товщини, співвідношення шарів для багатошарових покриттів, їх фазового складу, структури та фізико-механічних властивостей. Найбільш ефективно властивостями багатошарових і композиційних покриттів можна управляти за рахунок варіювання: хімічним складом; структурою окремих шарів; типом зв'язку з інструментальним матеріалом. У свою чергу зазначені властивості великою мірою залежать від методу нанесення покриттів і умов їх формування та стану матеріалу, на який наносять покриття. Зокрема, сильний вплив на структуру і дефектність покриттів, тип зв'язки з інструментальним матеріалом може надавати: субструктура поверхневого шару інструментального матеріалу, обумовлена попереднім обробленням, ступенем його деформування, спотвореннями кристалічної решітки, пов'язаної з наявністю вакансій, атомів впровадження та заміщення; забрудненість і газонасиченість поверхні інструментального матеріалу; напружений стан поверхневого шару інструменту; наявність в поверхневому шарі лінійних дефектів – дислокацій. Нанесення зносостійких покриттів змінює контактні характеристики процесу різання, впливає на тепловий та напружений стан ріжучого клину інструменту, що зрештою підвищує його працездатність. Нанесення покриттів суттєво змінює характеристики стружкоутворення та контактних процесів: зменшуються сили різання, коефіцієнт укорочення стружки та довжина контакту стружки з передньою поверхнею ріжучого інструменту.

Постановка завдання. Метою цієї статті є проаналізувати існуючи методи нанесення дискретних покриттів на тіло РІ та вплив використання цієї технології на якість механічної обробки деталей з КМ. Завданням дослідження є пошук шляхів забезпечення зносостійкості та зменшення абразивного зносу ріжучої поверхні РІ використовуваного для механічної обробки деталей, вузлів та виробів з КМ таким чином, щоб товщина дефектного шару була б мінімальна.

Виклад основного матеріалу. Зносостійке покриття – шар матеріалу на поверхні інструментальної основи, який відрізняється за своїм кристалохімічним, фізико-механічним та теплофізичним властивостям від відповідних властивостей основи (тіла РІ). Основне призначення зносостійкого покриття – це підвищення періоду стійкості РІ шляхом збільшення мікротвердості, корозійної стійкості та термодинамічної стійкості поверхневого шару, а також зниження фрикційної взаємодії (коефіцієнта тертя) різального інструменту та оброблюваного матеріалу. Підвищення стійкості РІ веде к збільшенню продуктивності за рахунок можливості роботи з високими швидкостями різання. Такі покриття використовуються як на твердих сплавах, так і на швидкорізальних, що розширяє технологічні можливості РІ [7].

Використання зносостійкого покриття дозволяє: 1. Значно підвищити період стійкості та надійність РІ; 2. Збільшити продуктивність процесів обробки різанням; 3. Скоротити питому витрату дорогих інструментальних матеріалів та дефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їх виготовлення.

Зносостійкі покриття, нанесене на РІ, повинно відповідати цілій низці вимог [8] як саме: покриття повинно мати твердість, що в 1,5–2 рази перевищує твердість інструментального матеріалу; покриття, як правило, має нижчий коефіцієнт тертя проти інструментальним матеріалом; низьку схильність до адгезії з оброблюваним матеріалом і мінімальну схильність до дифузійного розчинення в оброблюваному матеріалі; бути стійким проти корозії та окислення; зберігати властивості при високих температурах. Кристалохімічні та фізико-механічні властивості покриття інструментального матеріалу повинні бути досить близькими і сумісними [9].

Всі покриття, що використовуються для нанесення на РІ [10], умовно можна класифікувати за складом (одноелементні та багатоелементні), за будовою (одношарові та багатошарові) і по типу зв'язку (адгезійні, дифузійні та адгезійно-дифузійні). Одноелементні покриття – це покриття на основі з'єднання одного тугоплавкого металу (наприклад, TiC, TiN, ZrN). Багатоелементні – на основі з'єднання двох і більше тугоплавких металів (наприклад, (Ti, Zr) N, (Ti, Cr) N, (Ti, Zr, Cr) N). Одношарові характеризуються постійним

складом, структурою та властивостями за обсягом покриття. Багатошарові – змінним складом, структурою та властивостями за обсягом покриття. Адгезійні характеризуються відсутністю перехідної зони між покриттям та інструментальною основою. Дифузійні – наявністю перехідної зони між покриттям та інструментальною основою, порівнянною з розмірів із товщиною покриття. Адгезійно-дифузійні перехідна зона між покриттям та інструментальною основою менше розміром, ніж товщина покриття.

Склад та властивості зносостійких покриттів значною мірою залежать від технології їх нанесення. Існує два основних метода нанесення зносостійкого покриття на PI [11]: Chemical Vapour Deposition (CVD) – метод хімічного осадження із газової фази ; Physical Vapour Deposition (PVD) – метод фізичного осадження із газової фази. Також існує комбінація цих двох методів.

Як випливає з назви використовуваних процесів (PVD та CVD), вони ґрунтуються на різних по суті явищах. Кінцевий результат це – осадження з газової фази матеріалу покриття на підкладку.

Покриття методом CVD [12] широко використовуються для нанесення покриттів на тверді сплави. У цьому методі використовується осадження покриття при високій температурі (900…1100 °C) з газової фази. Такі температури виключають можливість застосування цього методу для інструменту з швидкорізальної сталі. Метод хімічного осадження (CVD) практично не має обмежень щодо хімічного складу покриттів. Усі присутні частинки можуть бути осаджені на поверхню матеріалу. Склад покриття залежить від парціального тиску газу та швидкості осадження покриття. При використанні CVD-методу хімічні реакції відбуваються в безпосередній близькості або на поверхні оброблюваного матеріалу. Переваги нанесення покриттів методами CVD: можна наносити покриття практично будь-якого хімічного складу; немає необхідності обертання деталей, що покриваються, покриття наноситься на всю поверхню виробу; однакова товщина покриття; товстий шар зносостійкого покриття; через високі температури процесу нанесення покриттів матеріал покриття частково дифундує з матеріалом основи. Недоліками методів CVD є значна вартість процесу; слабка адгезія покриття із основним інструментальним матеріалом; непридатні при гостро заточеному ріжучому інструменті, оскільки скругляють ріжучу кромку; інструменти з такими покриттями схильні до крихкого характеру зносу (викрашування, сколювання ріжучої кромки і так далі).

Методи фізичного осадження покриттів (PVD) [13] універсальні з точки зору одержання гами одношарових і багатошарових покриттів практично будь-якого складу, у тому числі з алмазоподібною і нанорозмірною структурою. Нанесення покриттів методом PVD відбувається за невисокої температури (зазвичай до 500 °C), що не призводить до практичних обмежень за матеріалами (дозволяє зміцнювати інструменти з швидкорізальних сталей), однак, при цьому присутня невелика товщина (1,5–6 мкм). Покриття PVD методом мають більш високу тріщиностійкість і краще пристосовані для роботи з ударними навантаженнями

Таким чином, переваги нанесення покриттів PVD методами: міцніші адгезійні зв'язки покриття з основою; нижча температура нанесення, на відміну методів CVD; можливість отримання гострозаточених ріжучих кромок; відсутність впливу покриття на міцність матеріалу основи; у поверхневому шарі покриття виникають корисні напруження стиснення. Недоліком PVD покриттів є його досить мала товщина (товщина покриттів, що наносяться методами CVD може досягати 50 мкм). Всі методи (PVD) засновані [14] на отриманні в середовищі вакууму пара осаджуваного матеріалу в результаті впливу на виготовлений з цього матеріалу катод (мішень) різних джерел енергії – потужних високотемпературних нагрівачів, лазерного променя, електронних та іонних пучків.

Порівняльній аналіз методів [15]: 1. На противагу методу PVD, при якому тверді матеріали покриття переводяться в газоподібну фазу випаровуванням або розпорошенням, при CVD-методу в камеру для нанесення покриття подається суміш газів, причому для протікання необхідних хімічних реакцій потрібна температура до 1200 °C. Ця умова істотно обмежує кількість інструментальних матеріалів, на які можна нанести CVD-покриття. Якщо тверді сплави витримують такий нагрівання практично без наслідків, то термооброблені швидкорізальні сталі втрачають в результаті, відпуску свої властивості. 2. Процеси CVD відбуваються за тисків 100–1000 Па. Покриття наноситься на всю поверхню виробу. Відпадає необхідність обертання виробу як за методом PVD. Це одна з переваг CVD. Для отримання однакових властивостей всього покриття обсягом робочої камери (особливо великий) необхідно забезпечити оптимальні потоки газу. 3. Установки CVD, як правило, мають досить великі габарити. Для запобігання небезпеч-

ним викидам газів в атмосферу використовується спеціальна система фільтрів. 4. Завдяки високій температурі нанесення, що забезпечує часткову дифузію матеріалу, що наноситься в основу, покриття CVD характеризуються, кращою адгезією (зчеплюваністю).

Таким чином, область застосування двох основних методів нанесення покриттів визначається їх зазначеними вище властивостями. PVD- та CVD-методи також відрізняються за видом внутрішніх напружень у шарі покриття, що наноситься. При методі PVD мають місце стискаючі напруги, а при методі CVD – розтягуючи. Напруження розтягу покращують адгезію покриття та основи. Необхідно також приймати до уваги та обставина, що методи CVD менш чутливі до якості підготовки матеріалу перед нанесенням на його покриття, у той час як при методі PVD матеріал повинен піддаватися тривалому багатоступінчастому очищенню, інакше не можна гарантувати властивості покриття. Але не зважаючи на переваги методу CVD (простота завантаження, відсутність тривалої підготовки та необхідності повороту виробів у технологічному процесі) фізичне осадження PVD – популярніший за рахунок відносної дешевизни. Покриття в цьому випадку наноситься за рахунок випаровування або розпилення. Тобто вихідні тверді матеріали переводять у газову фазу. Потім за допомогою електромагнітного поля транспортуються до ріжучого інструменту, нагрітого до температури, що не перевищує 500 °C, де іонізований матеріал стикається і рівномірно конденсується на ріжучому інструменті. PVD покриття утворюється за рахунок конденсації металевої пари на поверхні пластини.

Також, використання CVD метода обмежено матеріалами інструментів на які вони наносяться. Так інструменти зі швидкорізальної сталі за вказаними причин обробляються лише методом PVD. Для інших інструментальних матеріалів частка покриття методом CVD становить близько 40 %. У табл. 1 для порівняння наведено основні характеристики методів PVD та CVD.

Поверхня різального інструменту піддається найбільшому зносу через часті контакти з іншими щільними структурами. Вибір покриття – дуже важливе питання, яке потребує комплексного підходу до його вирішення, оскільки обране покриття визначає умови роботи, впливає на сили тертя і хімічні процеси, що відбуваються в зоні різання, в результаті контакту оброблюваної поверхні та передньої поверхні інструменту. У зв'язку з цим науковим завданням є підібрати

Таблиця 1

Порівняння параметрів методів CVD та PVD

Параметри	PVD	CVD
Параметри технології		
Тиск, Па	$<10^2$	$>10^2$
Температура основи, ° C	<500	>500
Швидкість осадження	низька	висока
Адгезія	гірша	краще
Пори/тріщини	рідко	можливі
Залишкові напруження у нанесеному покритті	високі стискаючі	розтягуючи
Термічна обробка покриття після нанесення	потрібна термообробка для зняття напруги	не потрібно
Параметри виробництва		
Розмір партії	маленький	великий
Вимоги до обладнання	високі	низькі
Вартість	висока	низька

не тільки інструментальний матеріал для виготовлення інструменту, але й знайти оптимальне покриття – за твердістю, щільністю, зносостійкістю та іншими параметрами. Склад покриття слід обирати виходячи з аналізу навантажень, що діють на ріжучий інструмент у процесі різання, та властивостей оброблюваного матеріалу. Одне й те саме покриття в одних умовах експлуатації інструменту може забезпечити суттєве збільшення його стійкості, а інших – навіть показати негативний ефект.

Для деталей, які працюють у важких умовах, пропонується застосовувати захисні покриття дискретного типу і створювати на їх основі композиційні структури з мінімальним зносом [17]. Цілеспрямована заміна суцільного шару покриття переривчастим (фрагментованим) шаром [18] становить ідею принципу формування покриттів дискретного типу. Принцип створення дискретної топографії можна досить успішно реалізувати для PVD-покриттів (рис. 1), зокрема для покриттів, отриманих методом катодно-іонного бомбардування (КІБ) [19]. На рисунку 1. вказано параметри покриттів, які підлягають регулюванню.

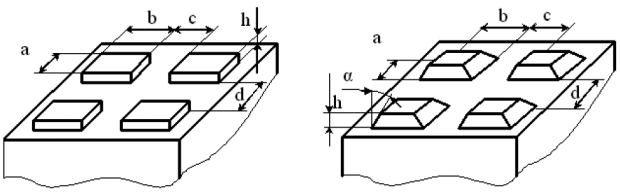


Рис. 1. Схеми дискретних покриттів

Дискретизація дозволяє зберегти екрануючу функцію суцільних покриттів та уникнути таких

недоліків покриттів суцільного типу, як когезійне розтріскування та адгезійне відшарування. Застосування покриттів дискретного типу показало їх високу ефективність на різальному інструменті. При обробці високоміцних сталей металорізальний інструмент з дискретними нітридтитановими покриттями показав значне підвищення зносостійкості порівняно з суцільними покриттями [18]. На основі аналізу результатів чисельного моделювання напруженого стану різального інструменту з суцільним та дискретним покриттям TiN автори [19] роблять висновки про вплив типу покриття та його геометричних параметрів на розподіл напружень на робочих поверхнях інструменту та обґрунтовують підвищення міцності та зносостійкості дискретного покриття порівняно із суцільним в 3…5 разів для передньої грані та в 1,1…2 рази – для задньої грані інструменту. Дискретне РЕП – покриття, що складається з нітридної фази ε – Ti_2N, на різцях із швидкорізальної сталі, за даними [21], дозволяє на 46 % підвищити стійкість та на декілька відсотків знизити силу різання порівняно з інструментом із суцільним покриттям. Деякі варіанти схем з спеціальними покриттями (дискретного типу), які формуються на базі так званих функціонально-орієнтованих технологій, які забезпечують нові локальні властивості виробу з покриттям, пропонуються в роботі [20]. Пропонуються, зокрема, покриття з ділянками різної форми та товщини, які мають забезпечити, наприклад, різні схеми припрацювання поверхонь пари тертя, а також нетрадиційні характеристики при експлуатації різноманітних елементів машин. Однак, в роботі не наведено критеріїв, за якими мають створюватися такі покриття. Авторами [18, 19, 20] запропоновано новий принцип створення PVD-покриттів дискретного типу у вигляді каркасу або сітки з регулярними заглибленнями. Формування таких поверхонь реалізується за допомогою активних екрануючих паст. Незважаючи на бурхливий технологічний та практичний розвиток конструктивних схем переривчастої топографії, підходи щодо визначення параметрів таких схем, які б відповідали максимальному опору руйнуванню робочих поверхонь, розвинені недостатньо. При виборі технології модифікації робочих поверхонь одним з головних критеріїв є можливість на етапі проектування покриття, підготовки поверхні під його нанесення та формування покриття створювати конструктивні схеми із заздалегідь заданими геометричними параметрами, такими як: товщина, кількість шарів, розміри, форма та відстань між окремими ділянками покриття, а також гнучкість технології формування покриттів. Було обрано наступні методи нанесення покриттів: різновид методу PVD – метод катодно-іонного бомбардування (КІБ); метод електроіскрового легування (ЕІЛ); методи, що ґрунтуються на обробці поверхні висококонцентрованими енергетичними джерелами (наприклад,плазмовим струменем).

Метод PVD КІБ (конденсації речовини з плазмової фази в вакуумі з попереднім іонним бомбардуванням) набув широко розповсюджених методів формування покриттів на інструментальних матеріалах завдяки своїй універсальності, низьким температурам нанесення (нижче температури теплостійкості сталі), екологічній чистоті, можливості легко керувати режимами нанесення. Цей метод розроблено в Україні, і розповсюдженість устаткування типу «Булат» обумовлює його доступність. Технологія КІБ реалізується за допомогою прискорювачів плазми, які використовують вакуумну дугу – сильноточний низьковольтний розряд, який реалізується в глибокому вакуумі і розвивається в парах матеріалу катода. Ефективність метода КІБ обумовлена його унікальними особливостями: широким діапазоном питомих потужностей впливу на поверхню (від 0,1 до 10^{16} Вт/см^2), високою керованістю, малою інерційністю процесу, швидкістю перебудови. Суттєвою особливістю методу КІБ є те, що за його допомогою створюють покриття дискретного типу різної геометрії, також створюють багатошарові покриття з функціональними шарами, покриття на основі дуплексних технологій, які дозволяють поєднувати нанесення вакуум-плазмового покриття з попереднім азотуванням сталевої поверхні на сталях та твердих сплавах. Для того, щоб залучити до досліджень всю сферу покриттів дискретного типу, поряд з штучно створюваними покриттями дискретного типу методом КІБ, розглянуто також такі, які є дискретними за своєю природою і можуть бути сформовані як включення в основу з іншого матеріалу, наприклад, методом електроіскрового легування (ЕІЛ), так і як зони, що утворилися внаслідок модифікації окремих ділянок основного матеріалу, наприклад, при обробці поверхні висококонцентрованими енергетичними джерелами (ВЕД). В якості попередньої обробки поверхні розглядалась механічна обробка (чорнове та чистове шліфування, полірування) та іонне азотування сталевої основи. Різноманітність запропонованих методів дозволила створювати системи «основа-покриття» з суцільними вакуум-плазмовими покриттями (одно- та

багатошаровими), дуплексні системи на основі поєднання іонного азотування (ІА) поверхні та методу КІБ, системи «основа – вакуум-плазмове покриття дискретного типу», а також системи з шарами, дискретно модифікованими методами ЕІЛ та ВЕД. Це обумовлює можливість зміцнювати деталі та інструмент з таких різних матеріалів як сталі, чавуни, тверді сплави, різальна кераміка, полікристалічні надтверді матеріали на основі кубічного нітриду бору, які мають різні розміри: від різальних пластин до великогабаритного валкового інструменту (табл. 2).

Таблиця 2

Матеріали та методи модифікації поверхонь та досліджуваних деталей

Матеріали основ	Матеріали покриття	Технологія нанесення	Деталі
Сталь Р6М5	TiN, (Ti, Al)N, TiCN, ВК8	PVD, IA+ PVD, ЕІЛ	різальний інструмент
Сталь У10А	ВК6	ЕІЛ	штампи
Тверді сплави	TiN, (Ti, Al)N, TiCN	PVD	різальний інструмент
ПНТМ на основі cBN	Al_2O_3-NbN	PVD	різальний інструмент

Зносостійкі покриття на інструментальних матеріалах (швидкорізальній сталі, твердосплавних пластинах) формували шляхом конденсації матеріалу покриття в вакуумі іонним бомбардуванням на модернізованому устаткуванні ННВ-6,6-И1.

Як вже зазначалось, тверді тонкі вакуум-плазмові покриття характеризуються високим рівнем залишкових напружень. Це свідчить, що, навіть за відсутності експлуатаційного навантаження, покриття і приповерхневі зони основи знаходяться в напружено-деформованому стані внаслідок невідповідності між покриттям та основою. Виділяють два механізми виникнення залишкових напружень: структурний та температурний. Структурні напруження в PVD-покриттях пов'язують з дефектністю при формуванні конденсату, вони є чутливими до мікроструктури покриття і залежать від умов конденсації, а також від часу нанесення, тобто від товщини покриття [15]. Температурна складова напружень обумовлена різницею коефіцієнтів температурного розширення матеріалів покриття та основи. PVD-покриттям, як правило, притаманні залишкові напруження стиску, які, в залежності від товщини покриття та матеріалу основи, можуть переходити в слаборозтягуючі. Високий рівень залишкових напружень стиску багато в чому обумовлює підвищення тріщиностійкості та зносостійкості поверхонь, модифікованих вакуум-плазмовими покриттями, а також позитивно впливає на такі характеристики, як границя витривалості та границя текучості. Разом з тим, значні за величиною залишкові напруження стиску роблять покриття більш крихким, можуть призводити до його спонтанного відшарування ще до початку експлуатації або до порушення зчеплення основи з покриттям в процесі експлуатації. Тому необхідність поглиблення уявлень про природу залишкових напружень в покриттях, а також визначення можливостей по керуванню їх рівнем з метою покращення характеристик та підвищення прогнозованості адаптаційних процесів в системі «основа-покриття» за рахунок удосконалення технології нанесення покриттів та створення відповідної конструкції поверхневого шару є очевидною.

Висновки. Оскільки CVD (хімічне осадження) покриття потребує складного обладнання, має високу вартість процесу, обмеження для інструментальних матеріалів, непридатне при гостро заточеному ріжучому інструменті, оскільки округляють ріжучу кромку, що є недопустимим при обробці ПКМ, тому більш технологічним виглядає метод PVD (фізичне осадження). Для методу PVD може бути використані як інструментальні сталі так і тверді сплави. Також, для зниження собівартості виготовлення інструменту з збільшеною зносостійкістю обираємо такий матеріал як швидкорізальну сталь Р6М5. Найбільш розповсюджене покриття отримане методом PVD, для матеріалу Р6М5 є TiN, (Ti, Al)N, TiCN, ВК8. Отже підготовлена теоретична база для проведення досліду та подальшої механічної обробки з отриманням якісних поверхонь, що відповідає вимогам оброблення ПКМ з використанням дискретного покриття на свердлі з швидкорізальної сталі Р6М5, отриманого методом PVD.

Використання зносостійкого покриття PI дозволяє: значно підвищити період стійкості та надійність ріжучого інструменту; збільшити продуктивність процесів обробки різанням, скоротити питому витрату дорогих інструментальних матеріалів та дефіцитних елементів (вольфрам, молібден, тантал, кобальт) для їх виготовлення; розширити область використання швидкорізальних сталей, які б не уступали твердим сплавам за рахунок нанесення дискретних покриттів; підвищити якість поверхневого шару і точність розмірів оброблених деталей.

Зміна контактних характеристик процесу різання відбивається на тепловому стані ріжучого клина інструменту. Нанесення покриттів призводить до зниження інтенсивності теплових джерел деформації та тертя передньої поверхні, в результаті чого зменшується інтенсивність теплового потоку в ріжучий клин інструменту з боку передньої поверхні. Зменшення кількості теплоти, що надходить до інструменту з покриттям, внаслідок зниження довжини контакту та інтенсивності теплового потоку на передній поверхні, веде до зменшення інтенсивності теплового потоку через задню поверхню в заготовку. Дискретні поверхні дозволяють забезпечити необхідну надійність РІ в екстремальних умовах експлуатації, де суцільні захисні покриття втрачають свою працездатність.

Список літератури:

1. Лабунець В. Ф., Корбут Є. В., Адаменко Ю. І. Перспективи використання композиційних матеріалів в авіакосмічній галузі. *Проблеми тертя та зношування*. 2011. № 56. С. 89–96.
2. Уварова І. В., Лабунець В. Ф, Корбут Є. В., та інші. Дослідження зносостійкості композиційних електролітичних покриттів на основі нікелю. *Порошкова металургія*. Київ. 2018. № 1.
3. Лабунець В. Ф., Медюк Р. М., Корбут Є. В, Загребельний В. В. Застосування подвійного дибориду титану-хрому для отримання захисних покриттів на нікелевий основі. *Порошкова металургія*. 2018. № 03\04. С. 117–124.
4. M. Kindrachuk, O. Dukhota, O. Tisov, E. Korbut, A. Yurchuk. Improving the wear resistance of heavy-duty elements in tribomechanical systems by a combined laser-thermochemical processing method. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. P. 6–13. ISSN 1729-3774 3/12 (111)
5. Wetzing K., Edelmann J., Gille G., et al. Structure, mechanical and stability behavior of hard material layers on steel substrates. *High-Purity Materials Sciences and Technologies*. 1985. P. 444–445.
6. Ляшенко Б. А., Мірненко В. І., Скуратовський А. К. Формування зносостійких поверхневих шарів газотермічним іонним азотуванням. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». Машинобудування*. 2007. № 5. С. 139–146.
7. Кіндрачук М. В., Яхья М. С., Гераимова О. В. Напружено-деформований стан дискретно оброблених лазером сталей під час контактної взаємодії. *Науково-технічний збірник. Київ : Видавництво Національного авіаційного університету «НАУ друк»*. 2006. № 46. С. 29–39.
8. Безрукавий А. М., Мірненко В. І., Ляшенко Б. А. Оптимізація технологічного процесу нанесення дискретних покриттів електроіскровим легуванням за триботехнічними критеріями. *Проблеми тертя та зношування: Науково-технічний збірник. Київ : Видавництво Національного авіаційного університету НАУ*. 2007. № 47. С. 132–141.
9. Антонюк В. С., Сорока О. Б., Рутковський А. В., Мірненко В. І. Залишкові напруження в вакуум-плазмових покриттях TiN, (TiAl)N, (TiC)N/B. *Вісник Східноукраїнського національного університету ім. Володимира Даля*. Луганськ. 2004. № 7(77). Ч. 2. С. 206–210.
10. Bemporad E., Sebastiani M., Pecchio C. High thickness Ti/TiN multilayer thin coatings for wear resistant applications. *Surface & Coatings Technology*. 2006. Vol. 201. № 6. P. 2155–2165.
11. Антонюк В. С., Сорока О. Б., Ляшенко Б. А. Дискретні покриття на різальному інструменті. *Проблеми міцності*. 2007. № 1. С. 138–143.
12. Сорока Є. Б. Ensuring stability of PVD coatings by producing a discrete topography with preset parameters. *Journal of Superhard Materials*. 2009. Vol. 31. № 5. P. 347–353.
13. Сорока О. Б. Вибір параметрів дискретно-модифікованих зносостійких поверхонь. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування. Київ: НТУУ «КПІ»*. 2007. № 33. С. 119–126.
14. Ляшенко Б. А., Антонюк В. С., Сорока О. Б. Розробка нових зносостійких покриттів для підвищення експлуатаційних характеристик деталей механізмів. *Вісник Тернопільського державного технічного університету ім. Івана Палюя. – Тернопіль : ТДТУ ім. І. Палюя*. 2005. Т. 10. № 1.С. 54–59.
15. Tool coating AIDS titanium cutting. *Metalwork PROD*. 1991. Vol. 135. № 12. P. 28.
16. Bunshah R. F. Handbook of Hard Coatings. Deposition Technologies, Properties and Applications. *University of California, Los Angeles*. USA. 2001. P. 538.
17. Gille G. Investigations of mechanical behavior of brittle wear-resistant coatings.*Thin Solid Films*. 1984. Vol. 111. №. 3. P. 201–218.
18. Ляшенко Б. А., Єрмолаєв В. В., Мірненко В. І. Відновлення бронзових деталей диференційними дискретними покриттями по епюрі нерівномірного зносу. *Современные процессы механической обработки и качество поверхностей деталей машин: Збірник наук. праць Ін-ту надтвердих матеріалів НАН України. Київ : Ін-т надтвердих матеріалів НАН України*. 1998. С. 53–56.

19. Hua M., Tam H.Y., Ma H.Y., Mok C.K. Patterned PVD TiN spot coatings on M2 steel: Tribological behaviors under different sliding speeds. *Wear*. 2006. Vol. 260. № 11–12. P. 1153–1165.

20. Сорока О.Б. Напружено-деформований стан твердосплавної різальної пластини з покриттям дискретного типу. *Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут»: Приладобудування. Київ : НТУУ «КПІ»*. 2008. №. 35. С. 91–96.

21. Сорока О.Б., Антонюк В.С., Рутковський А.В. Інструмент для важкооброблюваних матеріалів в виробництві ГТД. *Надійність і довговічність машин і споруд*. Київ. 2008. № 31. С. 157–161.

Petrov O.D., Korbut E.V. INCREASING THE PERFORMANCE OF A CUTTING TOOL BY MODIFYING ITS WORKING SURFACES

The article considers methods for increasing the efficiency of cutting tools by applying wear-resistant coatings to working surfaces. Over the past decades, various methods have been developed to increase the wear resistance of cutting tools (CT). It has been found that the most relevant technologies are those for obtaining wear-resistant and hardened coatings on the working surface of cutting tools by high-energy processing. Each of the currently known methods has its own advantages and disadvantages, which limit the scope of their application. It has been determined that the development of an effective, fairly simple to master in industrial production and economical method for increasing the wear resistance of CT remains an urgent scientific and practical task. The processes of CT destruction in the vast majority of cases begin with the working surface zones. The working surfaces of CT are subject to intensive wear, fatigue and other types of destruction. It was found that the reliability of the CT is determined mainly by wear resistance, which depends on the physical and mechanical properties of the materials and the quality of the processing of the mating surfaces. The properties of the tool materials used for the manufacture of CT depend on the chemical composition and their structure. At the same time, the structure and properties of the surface layers are decisive for the reliability and durability of the CT. Currently, a common method of surface strengthening is the creation of functional thin coatings (films) on the working surface of the CT. The coating formed on the surface is formed due to chemical reactions and diffusion processes between the structural elements of the material, vapor-gas mixtures, or a conductive medium and an electric field. In this case, the structure of the internal layers of the material remains unchanged. Coatings can be formed by electrodeposition (chromium plating, nickel plating, oxidation, etc.) and spraying (gas-flame, plasma, detonation, etc.) of material particles. Therefore, increasing the wear resistance of CT, as part of the tribosystem, is an urgent scientific and technical task of modern mechanical engineering. This task is one of the most difficult in science and technology, since it requires the analysis of complex interrelated processes in the friction zone, which can be studied and described only on the basis of fundamental principles of physics, chemistry, and materials science.

Key words: *Wear-resistant coating, cutting tool (CT), cutting process, PVD physical deposition method, CVD chemical deposition method, discrete coatings, composite materials (CM), polymer composite materials (PCM), discrete structure coating, surface quality, defective layer.*

ГАЛУЗЕВЕ МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 537.84
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/04

Радіонов О. В.
Сумський національний аграрний університет

Ву Джимінг
Zhejiang Special Motor Co., Ltd

Тарельник Н. В.
Сумський національний аграрний університет

ЗАСТОСУВАННЯ МАГНІТОРІДИННИХ ГЕРМЕТИЗУЮЧИХ КОМПЛЕКСІВ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ТА ЕКОЛОГІЧНОЇ БЕЗПЕКИ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ

Розглянуто умови роботи технологічного обладнання атомних електростанцій (АЕС), підприємств хімічної, нафтопереробної, гірничодобувної промисловостей. Обґрунтовано застосування магніторідинних герметизуючих комплексів для підвищення екологічної безпеки та надійності даних підприємств.

Метою даної роботи є підвищення надійності та довговічності технологічного обладнання, що експлуатується на атомних електростанціях (насоси, компресори, вентилятори, електродвигуни) шляхом розробки та впровадження нових технічних рішень із застосуванням магніторідинних герметизаторів (МРГ).

Магніторідинний герметизуючий комплекс дозволяє підвищити надійність герметизуючої системи шляхом паралельного з'єднання її елементів. Основним елементом комплексу служить магніторідинний герметизатор, який вирішує основне завдання – забезпечення повної герметичності. Спільно з ним працює одне або декілька допоміжних ущільнень, призначених для розвантаження основного від підвищеного перепаду тисків, зменшенню плями контакту магнітної рідини з ущільнюючим середовищем та ін.

Проаналізовано екологічні наслідки аварій та катастроф на атомних електростанціях. Показано, що ризик виникнення аварійних ситуацій на АЕС взаємопов'язаний із технічним станом технологічного обладнання. Методом системного аналізу проаналізовано вплив насосного обладнання на забезпечення надійності та ядерної безпеки. Для виконання підвищених вимог до експлуатаційної надійності та ресурсу насосного обладнання обґрунтовано необхідність проведення модернізації під час планових ремонтів для впровадження останніх науково-технічних досягнень. Доведено, що підвищення рівня екологічної безпеки корелюється із досягненням практично повної герметичності. Проведений аналіз показав, що з допомогою традиційних ущільнень цю проблему неможливо вирішити. Запропоновано створення магніторідинних герметизуючих комплексів (МРГК), до складу яких спільно з МРГ включаються допоміжні ущільнення, призначені для розвантаження основного. Проаналізовано конструкцію МРГК та досвід її експлуатації на шахті «Тернівська».

Ключові слова: *насоси, атомні електростанції, герметичність, надійність, магніторідинний герметизуючий комплекс.*

Постановка проблеми. Тяжкі аварії на АЕС відрізняються від звичайних промислових аварій глобальним радіаційним впливом, незрівнянною тривалістю наслідків та сильним психологічним стресом для суспільства.

Тому період експлуатації АЕС (найвідповідальніший період життєвого циклу будь-якої станції) характеризується специфічними цілями та завданнями забезпечення безпеки, оскільки саме при експлуатації станції здійснюється ланцюгова реакція, у реакторі утворюються радіоактивні речовини, що є безпосереднім ризиком.

Цілями забезпечення безпеки при експлуатації є [1]:

– захист персоналу, населення та навколишнього середовища;

– зведення до мінімуму радіоактивних викидів;

– запобігання виникненню інцидентів та аварій.

Відповідно, із зазначених цілей випливають основні завдання щодо забезпечення безпеки під час експлуатації. З наведених у [1, 2] завдань виділимо ту, рішенню якої присвячується дана стаття – запобігання аваріям та аварійним ситуаціям на АЕС шляхом створення умов, які забезпечують надійну роботу систем та обладнання.

Забезпечення безпеки АЕС щільно пов'язане з вирішенням основних виробничих та економічних завдань та ніяк не суперечить поточній роботі станції. Заходи, які вживають на АЕС щодо запобігання аваріям та відмовам спрямовані одночасно на підвищення коефіцієнта використання встановленої потужності та економічної ефективності станції.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Атомні електростанції є потенційно найбільш небезпечними через масштабність впливів на населення і навколишнє середовище у разі виникнення аварій з викидами радіоактивних речовин. Про це свідчать наслідки аварій на Чорнобильській станції та на станції Фукусіма. Серед відомих аварій на діючих АЕС – Три-Майл-Айленд, Чорнобильській та Фукусіма перша та третя були викликані аварійними ситуаціями у системах охолодження реакторів. Якщо на станції Три-Майл-Айленд персонал вчасно не зреагував на те, що засувки лінії аварійного постачання води зачинені, то на станції Фукусіма ситуація інша. Потрапляння води у електропривод насосів, який прокачує теплоносій крізь активну зону реакторів, призвело до їх перегріву й руйнуванню контурів з радіаційно-забрудненою водою та підплавлюванням тепловиділяючих елементів. Таким чином, безпосередньою причиною аварій стала ненадійна робота насосних агрегатів.

Специфікою атомних електростанцій є те, що через їх підвищену небезпеку аварійне зниження потужності реакторів або повна зупинка здійснюються автоматично внаслідок припинення навіть відбору генерованої електроенергії через вихід з ладу підвищувальних трансформаторів, аварій на відкритих розподільчих пристроях, обриву дротів ліній електропередачі внаслідок природних явищ. При цьому у активні зоні реактору через їх велику масу та інерційність фізичних процесів виділяється залишкове тепло. Це потребує інтенсивного охолодження упродовж значного часу. Тому доцільно розглянути можливості зниження ризиків аварійних ситуацій на атомних станціях, зокрема, за рахунок підвищення експлуатаційної надійності насосних та компресорних агрегатів [3].

Для України екологічна ситуація посилюється тим, що в умовах війни ймовірність пошкодження об'єктів критичної інфраструктури різко зросла, а фізичне та моральне старіння обладнання протягом останніх років значно випереджає темпи його заміни та оновлення [4]. В результаті знос основних засобів з вищевказаних галузей небезпечних виробництв характеризується не більше 50–90 % і відновлення парку діючого устаткування з економічних причин важко [5].

Насосне, компресорне та вентиляторне обладнання виконує технологічні функції, які безпосередньо пов'язані із забезпеченням ядерної та радіаційної безпеки: з одного боку, відмови деяких насосів можуть викликати великі аварії, а з іншого – насоси є найважливішими елементами систем безпеки.

Отже, під час створення насосного устаткування АЕС на першому плані висуваються вимоги надійності як у розрахункових, так і у перехідних режимах, включаючи аварійні. Ці вимоги у поєднанні з особливостями експлуатації, а також іншими вимогами, такими як радіоактивність першого контуру, виділяють насоси АЕС в самостійну галузь насособудування.

З точку зору надійності насоси відносяться до обладнання з активним принципом дії, тобто. до обладнання, яке складне за конструкцією та взаємопов'язане з іншими пристроями, від яких залежить його працездатність. Проблеми забезпечення надійності такого обладнання особливо складні та актуальні. І таке обладнання має враховувати можливість проведення модернізації під час планових ремонтів для впровадження останніх досягнень науки та техніки.

Необхідно відзначити, що за останні роки створено нові розробки та технології, які можуть дозволити істотно підвищити енерго-і матеріалоефективність промислових установок. При цьому вони не вимагають серйозних капітальних витрат при впровадженні та великих змін конструкцій. Ці зміни цілком можна провести при плановому ремонті устаткування, одночасно здійснивши і його модернізацію [6].

Така модернізація повинна забезпечити поліпшення споживчих властивостей агрегату або установки в жорстких рамках існуючої конструкції. Це повністю вписується в основну концепцію розви-

тку інфраструктури паливно-енергетичного комплекса, де пріоритетним є підвищення надійності, продуктивності і економічності обладнання при одночасному зниженні експлуатаційних витрат [7, 8].

Якщо в даний момент наднормативна зношеність основних фондів переважає у сумарній складовій всіх надзвичайних ситуацій, то, за прогнозом ряду експертів [9, 10] в довгостроковій перспективі стратегічні ризики в техногенній сфері можуть докорінно змінитися: на зміну техногенним ризикам прийдуть технологічні ризики, і основні збитки можуть виникати у зв'язку з неефективною, морально застарілою технологічною базою.

Позитивною рисою модернізації з впровадженням останніх технічних досягнень є автоматична їх апробація у важких експлуатаційних умовах, що в майбутньому дозволить закладати високоефективні наукомісткі технології в серійні зразки нової техніки.

Одним з можливих шляхів вирішення даної проблеми підвищення надійності та екологічної безпеки обладнання є застосування нового типу ущільнень – магніторідинних герметизаторів [11, 12].

Поєднання унікальних властивостей нанодисперсної магнітної рідини (МР) відкрило широкі перспективи для створення нових технічних пристроїв і технологій в різних галузях науки і техніки. У МРГ використовуються в першу чергу дві властивості МР: вона втягується в область неоднорідного магнітного поля; на немагнітне тіло, занурене в магнітну рідину, діє виштовхуюча сила, що має магнітне походження (магнітолевітаціонний ефект) [13,14].

Постановка завдання. Тому, метою даної роботи є підвищення надійності та довговічності технологічного обладнання, що експлуатується на АЕС (насоси, компресори, вентилятори, електродвигуни) шляхом розробки та впровадження нових технічних рішень із застосуванням магніторідинних герметизаторів.

Виклад основного матеріалу. Статистичні дані свідчать, що для багатьох видів устаткування (електродвигуни, редуктори, насоси, компресори, вентилятори та ін.) напрацювання на відмову найчастіше визначається надійністю підшипникових вузлів.

Згідно літературних даних, до 90 % випадків аварійних руйнувань підшипникових вузлів викликано незадовільною роботою ущільнень [15, 16].

Потенційні можливості традиційних ущільнень (манжетних, сальникових, торцевих, лабіринтових та інших типів) значною мірою вичерпали себе, і забезпечити абсолютну герметичність вони не в змозі [17].

Основними перевагами МРГ перед традиційними ущільненнями є нульові витоки герметизуючого середовища, мінімальний знос внаслідок чисто рідинного тертя, низькі енергетичні втрати, висока ремонтопридатність, простота техобслуговування, працездатність в статиці і динаміці, самовідновлення у випадку аварійного прориву ущільнюваного середовища.

Основними недоліками МРГ є проблема сумісності МР та ущільнюваного середовища. Герметизатори чудово працюють при ущільненні газів, парів, аерозолів, дрібнодисперсних сипких середовищ, однак при ущільненні рідких середовищ можливе гідродинамічне перемішування ущільнюваного середовища та МР, що буде вести до порушення працездатності герметизатора. Ці проблеми виникають при досить високих оборотах обертання валу. Тому при ущільненні рідких середовищ або повітря, що містить велику кількість рідини (наприклад, рідкого мастильного масла при ущільненні підшипникових вузлів) необхідно вжити заходи, які мінімізують контакт ущільнюваного середовища з магнітною рідиною який знаходиться в зазорі між валом і концентраторами магнітного потоку на полюсних наконечниках МРГ.

Інші недоліки МРГ визначаються порівняно невеликою областю застосування цього типу ущільнень. Вони пов'язані з обмеженістю температурного діапазону і утримуваного перепаду тиску, що випливає з властивостей магнітних рідин і рідин взагалі [18].

Одним з можливих шляхів розширення області застосування МРГ є створення комбінованих ущільнень, які об'єднують переваги традиційних і магніторідинних систем герметизації. Основною метою має бути забезпечення повної герметичності. Тут доречно за аналогією з торцевими ущільненнями ввести поняття магніторідинного герметизуючого комплексу, під яким будемо розуміти комбіновану герметизуючу систему, до складу якої входить магніторідинний герметизатор і допоміжні пристрої, що оптимізують умови його роботи [19].

МРГК дозволяє підвищити надійність герметизуючої системи шляхом паралельного з'єднання її елементів. Основним елементом комплексу служить магніторідинний герметизатор, який

вирішує основне завдання – забезпечення повної герметичності. Спільно з ним працює одне або декілька допоміжних ущільнень, призначених для розвантаження основного від підвищеного перепаду тисків, зменшенню плями контакту магнітної рідини з ущільнюючим середовищем та ін. До допоміжних елементів комплексу також необхідно віднести групу пристроїв для забезпечення нормального функціонування основного ущільнення – дозаправка магнітною рідиною, системи охолодження та ін. У разі необхідності МРГК можуть бути оснащені системами аварійного захисту, приладами контролю та ін.

Розглянемо розробку та впровадження магніторідинного герметизуючого комплексу для вентилятора ВОД – 30М. Вентилятори цього широко застосовуються на металургійних і енергетичних об'єктах. Ми проаналізуємо використання герметизаторів під час експлуатації у складі осьового шахтного вентилятора головного провітрювання ВОД – 30М. Обґрунтувати такий вибір можна тим, що умови роботи у вугільній промисловості є найважчими [20].

Конструкція осьового шахтного вентилятора головного провітрювання ВОД – 30М показана на рис. 1.

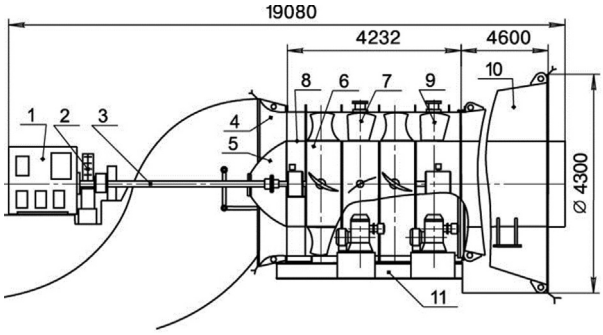


Рис. 1. Вентилятор ВОД-30М: 1 – електродвигун, 2 – гальмо, 3 – вал трансмісійний, 4 – колектор, 5 – кок, 6 – ротор, 7 – корпус з напрямним апаратом, 8 – блок опорний передній, 9 – блок опорний задній зі спрямляючим апаратом, 10 – дифузор, 11 – балка

Шахтні вентиляторні установки головного провітрювання при роботі на всмоктування переміщують шахтне повітря, що відрізняється від атмосферного наявністю в ньому різних газів, пари, кислот, значної кількості штибу, пилу, води.

Тому при експлуатації шахтних вентиляторів обов'язково відбуватиметься налипання пилу на поверхню лопаток, попадання вологи і пилу в пустотілі лопатки, що буде приводити до дисбалансу ротора, появі підвищеної вібрації підшипникових

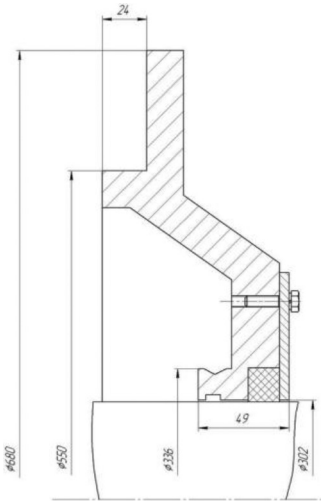


Рис. 2. Штатна кришка підшипникового вузла ВОД-30М з ущільненнями

вузлів і в результаті до необхідності зупинки вентилятора для очищення і обслуговування.

Підвищена вібрація і вигин вала з консольним навантаженням веде в свою чергу до необхідності збільшення зазорів в ущільнюючих пристроях підшипникових опор і, відповідно, до погіршення їх роботи. Крім того, конструктивно навіть нові великі підшипники гойдання матимуть значні радіальні зазори. Дійсно, для дворядних радіальних сферичних роликопідшипників з діаметром отвору 200…225 мм (3 група), що використовуються в зазначених типах вентиляторів, величина зазору складає 0,22…0,29 мм, що вносить додатковий негативний внесок в роботу ущільнюючих пристроїв.

Рекомендовані граничне биття валу і неспіввісність посадкового місця щодо осі валу для армованих манжет, що використовуються в зазначених вище вентиляторах, становлять відповідно 0,15 і 0,20 мм, що вже нижче реально існуючих.

Для підшипникових вузлів осьових вентиляторів додатковим чинником, який негативно впливає на роботу ущільнень підшипникових опор, є наявність великої кількості твердих частинок в перекачувальному повітрі. Інтенсивно потрапляючи під край ущільнення частинки викликають знос поверхні валу і зменшення герметичної здатності ущільнення, що виражається як у збільшенні протікання масла, так і в попаданні твердих частинок в мастило і в підшипники, що може привести до самих негативних наслідків [21].

Враховуючи дані фактори, доводиться констатувати, що ущільнення, які використовують в підшипникових опорах згаданих вентиляторів, працюють недостатньо ефективно.

Неефективна робота ущільнень підшипникових вузлів вентиляторів приводить як до зни-

ження надійності всієї вентиляторної установки, так і збільшення експлуатаційних витрат.

Конструкція МРГК показана на рис. 3, 4.

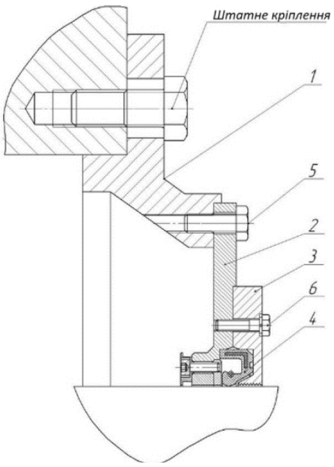


Рис. 3. МРГК підшипникового вузла: 1 – корпус великий, 2 – МРГ, 3 – кришка передня («чобіток»), 4 – манжета 300 × 340, 5 – болт М10, 6 – болт М6

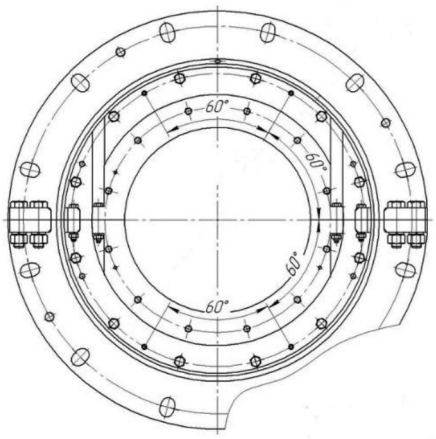


Рис. 4. МРГК підшипникового вузла, вид спереду

Як і кришка підшипникового вузла вентилятора, герметизатор виконаний роз'ємним.

Герметизуючий комплекс складається з трьох частин – корпусу великого 1, повторює зовнішню частину штатної кришки підшипникового вузла і що кріпиться за допомогою штатних болтів, власне МРГ 2, що встановлюється на торці корпусу великого, і кришки передньої («чобітка») 3. У порожнині між ними розміщується манжета 4 – гумометалева армована манжета 300 × 340, що виконує функції попередньої щаблі ущільнення. МРГ 2 закріплюється на торцевій поверхні корпусу великого 1 болтами 5.

Магніторідинний герметизатор (МРГ) складається з корпусу з фланцем і магнітної системи. Магнітна система складається з магнітів Nd–Fe–B, розташованих між корпусом МРГ і кільцевим полюсним наконечником, самого полюсного наконечника і двох немагнітних кілець, що прикривають магніти з торців. На зовнішньому немагнітному кільці виконані маслозброшувальні канавки. На торцевій поверхні фланця МРГ виконана проточка для кришки передньої поз. 3.

У даному МРГ функцію другого полюсного наконечника герметизатора виконує кришка передня («чобіток») 3, що вставляється в проточку на торцевій поверхні фланця МРГ і притискається до нього болтами 6 М6. На зверненої до поверхні валу поверхні кришки передньої («чобітка») 3 нарізані концентратори магнітного потоку – кільцеві зубці з канавками між ними. На зовнішній циліндричній поверхні фланця МРГ 2 є отвір для заправки магнітної рідини, який заглушається гвинтом М5.

Дослідна експлуатація МРГК була успішно проведена на двох вентиляторах шахти «Тернівська» (м. Павлоград) [22]. У перший рік експлуатації обслуговуючий персонал шахти щозмінно проводив контроль за роботою МРГК. Дані заносилися до спеціального журналу. За 5 років експлуатації викидів олії не спостерігалося. Магнітна рідина дозаправлялася з періодичністю один раз на пів року. Термін експлуатації в кілька разів перевищив термін ущільнень, що раніше застосовувалися.

Висновки. Проаналізовано екологічні наслідки аварій та катастроф на атомних електростанціях.

Показано, що ризик виникнення аварійних ситуацій на АЕС взаємопов'язаний із технічним станом технологічного обладнання.

Методом системного аналізу проаналізовано вплив насосного обладнання на забезпечення надійності та ядерної безпеки.

Для виконання підвищених вимог до експлуатаційної надійності та ресурсу насосного обладнання обґрунтовано необхідність проведення модернізації під час планових ремонтів для впровадження останніх науково-технічних досягнень.

Доведено, що підвищення рівня екологічної безпеки корелюється із досягненням практично повної герметичності. Проведений аналіз показав, що з допомогою традиційних ущільнень цю проблему неможливо вирішити.

Запропоновано створення магніторідинних герметизуючих комплексів, до складу яких спільно з МЖГ включаються допоміжні ущільнення, призначені для розвантаження основного.

Проаналізовано конструкцію МРГК та досвід її експлуатації на шахті «Тернівська».

Список літератури:

1. Основні засади безпеки атомних електростанцій. 75 – INSAG – 3. Rev.1. INSAG – 12: Доповідь Міжнародної консультативної групи з ядерної безпеки. МАГАТЕ. Відень, 2015. 142 с. URL: https://surl.li/ttsspk
2. Культура безпеки. 75 – INSAG – 4: Доповідь Міжнародної консультативної групи з ядерної безпеки. МАГАТЕ. Відень, 1991. 51с. URL: https://nuclear-journal.com/index.php/journal/article/view/831
3. Носовський А. В., Васильченко В. М., Ключніков А. А., Пристер Б. С. Аварія на Чорнобильській АЕС: Досвід подолання. Здобуті уроки: монографія. Київ : Техніка, 2006. 264 с.
4. Кузнєцова Т. О., Варавіна Є. П. Екологічна безпека у нафтогазовій галузі. Харків : НТУ «ХПІ», 2015. 77 с.
5. Левченко Л. О., Радіонов О. В. Модернізація електротехнічного обладнання як шлях зниження ризиків аварійних ситуацій на атомних електростанціях. *Екологічна безпека та природокористування*. 2023. № 1(45). С. 29–43.
6. Грядущий Б. А., Коваль А. М., Зданевич В. Е. Забезпечення безпеки машин і устаткування стаціонарніх установок шахт, що довгостроково експлуатуються. *Вісті Академії інженерних наук України*. 2004. № 2(22). С. 21–27.
7. Биченок М. М., Трофімчук О. М. Проблеми природно-техногенної безпеки в Україні. Київ : УІНСіР, 2002. 268 с.
8. Радіонов О. В. Оцінка техногенного ризику обладнання небезпечних виробництв системним багаторівневим аналізом. *Збірник наукових праць НУК*. 2015. № 4, С. 82−91.
9. Бетін А. В., Бондарєва Н. В., Клименко Т. С. *Теорія та конструкція систем екологічної безпеки*. Харків : Нац. аерокосм. ун-т «Харк. авіац. ін-т», 2006. 144 с.
10. Панкратова І. Д. Системний аналіз у динаміці діагностування складних технічних систем. *Системні дослідження та інформаційні технології*. 2008. № 1. С. 33–49.
11. Berkovsky B., and Bashtoboi V. (Eds). Magnetic fluids and applications, New York : Begell House, 1996. 831 p.
12. Радіонов О. В. Досвід експлуатації магніторідинних герметизаторів на нафтопереробних заводах країн СНД. *Хімічна техніка*. 2015. № 10. С. 11–17.
13. Rosensweig R. E. *Ferrohydrodynamics*. Cambridge University Press, 1985, 344 p.
14. Radionov O., Podoltcev A., and Zahorulko A. Finite – Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic – Fluid Seal for Rotational Shaft. *Procedia Engineering*. 2012. № 39. pp. 327−338.
15. Хасселфелд Р. Правильний вибір захисних ущільнень підшипників. *Хімічна техніка*. 2017. № 9. С. 16–17.
16. Тарельник В. Б., Марцинковський В. С. Модернізація та ремонт роторних машин. Суми : Козацький вал. 2005. 364 с.
17. Марцинковський В. А., Радіонов О. В., Тарельник В. Б. Екологічні аспекти систем герметизації. *Компресорне та енергетичне машинобудування*. 2019. № 2(56). С. 8–12.
18. Марцинковський В. А., Тарельник В. Б., Антошевський Б. та ін., Екологічна безпека експлуатації компрессорного та насосного обладнання: монографія. Суми : Сумський державний університет. 2014. 282 с.
19. Радіонов О. В., Подільцев А. Д. Магніторідинні герметизатори як підвищення екологічної безпеки технологічного устаткування ГЕС. *Гідроенергетика України*. 2014. № 2–3. С. 58–62.
20. Radionov A. Magnetic fluid sealing complexes for bearing assemblies of mine main ventilation fans. *Magnetohydrodynamics*. 2018. № 54(1–2). P. 109–114.
21. Хабазня О. С., Радіонов О. В., Виноградов О. М., Казакуца О. В. Особливості проектування магніторідинних герметизаторів шахтного обладнання». *Вугілля України*. 2010. № 12(648). С. 29–33.
22. Radionov O., Podoltsev A., and Peczkis G. The specific features of high-velocity magnetic fluid sealing complexes. *Open Engineering*. 2018. № 8(1). P. 539–544.

Radionov O. V., Wu Jiming, Tarelnik N. V. APPLICATION OF MAGNETOFLUID SEALING COMPLEXES TO IMPROVE RELIABILITY AND ENVIRONMENTAL SAFETY OF NUCLEAR POWER PLANTS

The operating conditions of the technological equipment for nuclear power plants (NPPs), enterprises for chemical, oil refining, and mining industries have been considered. The application of magnetofluid sealing complexes to improve environmental safety and reliability of these enterprises has been substantiated.

The purpose of this work is to increase the reliability and durability of the technological equipment operated at nuclear power plants (pumps, compressors, fans, electric motors) by developing and implementing new technical solutions using magnetofluid seals (MFS).

The magnetofluid sealing complex make it possible to increase the reliability of the sealing system by connecting its elements in parallel. The main element of the complex is a magnetofluid sealer, which solves the main problem, namely, provides for a complete tightness. Together with it, there operate auxiliary sealers designed to relieve the main one from increased pressure drop, reduce the contact spot of the magnetofluid with a sealing medium, etc.

The environmental consequences of the accidents and disasters at nuclear power plants have been analyzed. It has been shown that the risk of emergencies at nuclear power plants is interconnected with the technical condition of the technological equipment. The pumping equipment impacts on ensuring the reliability and nuclear safety have been analyzed using the method of system analysis. To meet the increased requirements for operational reliability and service life of pumping equipment, the need for modernization during scheduled repairs to implement the latest scientific and technical achievements has been substantiated. It is has been proven that increasing the level of environmental safety correlates with achieving almost complete tightness. The analysis has shown that this problem cannot be solved using traditional seals. There has been proposed the creation of the magnetofluid sealing complexes (MFCs), which together with the MFC include the auxiliary sealers designed to relieve the main one. The design of the MFC and the experience of its operation at the Ternivska mine have been analyzed.

Key words: *pumps, nuclear power plants, tightness, reliability, magnetofluid sealing complex.*

УДК 629.463.65
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/05

Фомін О. В.
Державний університет інфраструктури та технологій

Козинка О. С.
Державний університет інфраструктури та технологій

Грицай С. В.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Зеленський О. В.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Лісничий В. С.
Державний університет інфраструктури та технологій

ІННОВАЦІЙНИЙ ТА КОНЦЕПТУАЛЬНИЙ АСПЕКТИ ПОЛІМЕРНОГО МАШИНОБУДУВАННЯ

У цій статті аналізується використання кристалічних, органічних та неорганічних сполук, які утворюють довгі макромолекули завдяки послідовному з'єднанню ланок. Такі сполуки мають важливе значення в машинобудуванні, оскільки забезпечують захист конструкцій від корозії та механічних коливань, що впливають на їх міцність і довговічність. Крім того, застосування захисних покриттів сприяє покращенню техніко-економічних показників як у машинобудуванні, так і у вагонобудуванні. На сьогоднішній день пластмаси знаходять застосування у кожному автомобілі. Найчастіше вони використовуються для виробництва деталей інтер'єру салону, зокрема його передньої частини. До того ж, з пластмас виготовляють елементи двигуна, трансмісії та шасі. Використання пластмас у ковзних підшипниках дозволяє знизити трудомісткість обслуговування, оскільки такі підшипники з пластиковими вкладишами та вбудованою змазкою не потребують регулярного мастила протягом пробігу до 80–100 тисяч кілометрів. Стаття також присвячена аналізу основних переваг та недоліків полімерами конструкційних матеріалів. У машинобудуванні та виробництві комплексного промислового обладнання важливо, щоб механізми працювали надійно навіть при високих навантаженнях та тривалій експлуатації. Для цього вони мають володіти відмінними антифрикційними властивостями, високою зносостійкістю, стійкістю до критичних температур і забезпечувати ефективну теплоізоляцію. Сучасні термопласти та композитні матеріали успішно відповідають цим вимогам. Використання пластмас у машинобудуванні дає значний техніко-економічний ефект: зменшується вага машин, економляться кошти на використання кольорових металів і сталей, а також знижуються трудомісткість обслуговування та собівартість виробів. Особливо застосування пластмас у тертьових вузлах сприяє підвищенню продуктивності та довговічності машин, знижуючи витрати потужності через опір терття, а також зменшуючи загальну вартість і масу конструкцій. Крім того, використання сучасних матеріалів або обробка металевих поверхонь виступають необхідними заходами конструктивного захисту, оскільки корозія може негативно позначатися на довговічності та безпеці машинобудівних виробів.

Ключові слова: *машинобудування, транспорт, рухомий склад, полімери, пластмаси, нові матеріали, експлуатація, надійність.*

Постановка проблеми. Сучасні полімерами в залізничній галузі виступають основним чинником як технічного, так і економічного прогресу, забезпечуючи єдиний шлях до зростання конкурентоспроможності. Завдяки високій міцності та низькій щільності, вони є незамінними при виробництві сучасних конструкцій і виробів. До того ж, ці матеріали мають ряд додаткових переваг, зокрема стійкість до корозії та тривалість експлуатації. Висока технологічність їх переробки при відносно низьких температурах відкриває широкі можливості для виготовлення виробів будь-якої складності за мінімальних витрат.

Надійна робота автомобіля, його тривала експлуатація, комфорт під час поїздок та безпека на дорозі можливі лише за умови застосування

полімерних матеріалів – таких як пластмаси, гума, лаки та фарби.

Заміна металів на пластмаси при виробництві деталей складної конфігурації забезпечує значний техніко-економічний ефект, адже велика кількість пластмасових виробів може бути виготовлена на автоматизованих установках із мінімальними відходами сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Ми маємо справу з полімерами, які займають одне з лідируючих місць серед матеріалів для машинобудування. Споживання пластмас у цій сфері досягло рівня сталевого споживання за обсягом. Постійно зростає також використання лакофарбових матеріалів, синтетичних волокон, клеїв та гуми [1, с. 189].

Доцільність використання полімерів у машинобудуванні обумовлена, насамперед, можливістю зниження собівартості продукції. При цьому основні техніко-економічні показники машин також зазнають поліпшення – зменшується їх вага, підвищуються довговічність, надійність та інші експлуатаційні характеристики [2, с. 105].

Внаслідок застосування полімерних матеріалів економляться ресурси металу, а зменшення відходів при переробці призводить до значного зростання коефіцієнта використання матеріалів (середній коефіцієнт використання пластмас приблизно у двічі перевищує показники для металів) [3, с. 720].

Аналіз літературних джерел [4, с. 458; 5, с. 85] дозволяє зробити висновок, що впровадження полімерних матеріалів – це обов'язковий захід, який дозволяє якісно покращити економіко-технічні показники в машинобудуванні. Важливо правильно вибрати відповідний полімерний матеріал, який відіграватиме велику роль у концепціях залізничних вантажних вагонах у сучасному машинобудуванні. Щоб забезпечити продуктивності, міцність, надійності та безпеку рухомого складу. Це зумовлює необхідність здійснення відповідних досліджень та напрацювань у зазначеному напрямі.

Постановка завдання. Метою роботи є аналіз легких, захисних та міцних матеріалів (полімерів), які відіграють особливу роль в машинобудуванні: захист від корозії та механічних коливань, які значно впливають на міцність та довговічність конструкцій. Перспективних моделей кузова напіввагону з нових матеріалів та застосування захисних покриттів для покращення техніко-економічних показників. Для досягнення поставленої мети, треба виконати ряд завдань:

– застосування полімерів у машинобудуванні;
– основні переваги полімерних конструкційних матеріалів;
– недоліків полімерних матеріалів;
– велике підприємство з виготовлення полімерів;
– застосування полімерних композиційних матеріалів на залізниці.

Виклад основного матеріалу. Доцільність використання полімерів у машинобудуванні визначається насамперед можливістю здешевлення продукції. При цьому покращуються найважливіші техніко-економічні характеристики машин: зменшується маса, підвищуються довговічність, надійність тощо.

Полімери – це сполуки, як органічного, так і неорганічного походження, які характеризуються кристалічною структурою завдяки з'єднанню ланок у довгі макромолекули. До них відносять природні речовини, зокрема білки, полісахариди, каучук та інші.

Епоксидні смоли – це полімери або олігомери, у яких присутні активні епоксидні групи. Вони широко використовуються як заливні смоли, а також для виготовлення епоксидно-скляних ламінатів і клеїв, що застосовуються для з'єднання металів, скла та керамічних матеріалів [6, с. 138]. Вони характеризуються високою адгезією лаків до металів, а також до покриття бетонних фундаментів. Епоксидні смоли виробляють під назвами: Araldit (Швейцарія), Epidian (Польща), Bacelit epoksi resin (Англія), Beckopx (Німеччина), DER (США), Dinox (США), Epikot (США), Epilox (Німеччина), Levepox (Німеччина), ED (СНД).

Пластмаса – це композиційний матеріал, у якому полімер виконує роль зв'язуючого компонента, що поєднує різні складові, такі як наповнювачі, пластифікатори, барвники, антиоксиданти та інші добавки [7, с. 1336]. Як наповнювачі в пластмасах можуть використовуватися скловолокно, тирса, азбест, гази та інші матеріали. Пластмаси, що містять наповнювачі, називають полімерними композиційними матеріалами.

З пластмас виготовляють кузови, кабіни автомобілів і їхні великогабаритні деталі, а також різноманітні дрібногабаритні елементи конструкційного та декоративного призначення, тепло- та звукоізоляційні компоненти та інші вироби [8, с. 241].

Полімерний матеріал каучук знайшов широке застосування в автомобілебудуванні. З нього виробляють полістирол і полівінілхлорид, які мають відмінні електроізоляційні властивості. В авіабудуванні

полімери використовуються у вигляді органічного скла, такого як поліметилметакрилат (плексиглас). Однак особливо велике поширення полімери отримали в загальному машинобудуванні [9, с. 83]. З полімерів виготовляють поліамідні волокна та тканини, зокрема шовк, капрон і нейлон. З кожним роком їх використання розширюється, що сприяло розробці нових матеріалів, таких як лавсан, поліетилентерефталат і штучна шерсть.

Важливим досягненням стало використання суміші триетилалюмінію та тетрахлориду титану, відомої як каталізатор Циглера-Натта, для отримання поліетилену високої щільності. Швидке освоєння цих каталізаторів сприяло появі таких синтетичних матеріалів, як поліпропілен і поліетилен.

Використання пластмас для виготовлення кабін, кузовів та їхніх великогабаритних деталей має значні перспективи, оскільки на кузов припадає близько половини маси автомобіля та близько 40 % його вартості. Кузови, виготовлені з корозійностійких пластмас, є більш надійними та довговічними в порівнянні з металевими, адже близько 70 % автомобілів із металевими кузовами не витримують 10-річного терміну експлуатації через корозію. До того ж, ремонт пластмасових кузовів є дешевшим і простішим.

Для виробництва кабін і кузовів автомобілів найчастіше застосовуються поліефірні склопластики та багатошарові пластики на основі фенольних смол і тканин з рослинних волокон (фенотекстоліти) [10, с. 65]. Наприклад, методом гарячого пресування зі склопластику виготовляли кузов легкового автомобіля «Корвет» (США), який складався з окремо формованих панелей, а також капот і облицювання вантажного автомобіля «Форд» серії L. Крім того, склопластик використовувався для виробництва кабіни вантажного автомобіля «Фаун» і кузова спортивного автомобіля «BMC» моделі 1100 (Великобританія) методом контактного формування. Для виготовлення кузовів застосовують також сополімер АБС і жорсткі пінополіуретани. Наприклад, кузов автомобіля «Діана-6-Мексарі» (Франція) складався з 11 деталей, одержуваних вакуумформуванням кополімеру АБС.

Були розроблені дослідні зразки легкового кабріолету YAK (маса 65 кг), виготовленого з пінополіуретану. Однак згодом поліуретан було замінено на алюміній, що зробило цей автомобіль економічно неперспективним через високу вартість.

Попри зазначені вище переваги полімерів перед металами, вони ще не отримали широкого поширення у виробництві великогабаритних деталей автомобіля, головним чином через недостатню жорсткість (низький модуль Юнга) та порівняно низьку атмосферостійкість, наприклад, у сополімеру АБС. Найширше пластмаси застосовують у виробництві деталей внутрішнього оздоблення салону автомобіля, особливо його передньої частини. При виготовленні декоративних деталей пластмаси фарбують у масі або металізують. На зовнішні видимі деталі метал наносять трудомістким, але таким, що дозволяє отримати більш зносостійкі покриття, гальванічним методом, на внутрішні деталі – вакуумним методом.

З пластмас виготовляють деталі двигуна, трансмісії, шасі. При використанні пластмас у підшипниках ковзання зменшується трудомісткість обслуговування автомобіля, тому що підшипники з вкладишами з пластмаси та консистентним мастилом, яке закладають під час збирання, не вимагають періодичного мастила при пробігу автомобіля до 80–100 тис. км.

Основні переваги полімерних конструкційних матеріалів:

– висока питома міцність (ставлення міцності до густини);
– зносостійкість;
– стійкість до хімічних впливів;
– гарні діелектричні характеристики;
– властивості полімерних матеріалів можна значно змінювати шляхом їх модифікації або поєднання з різними інгредієнтами. Наприклад, введення відповідних наповнювачів у полімери дозволяє отримувати фрикційні та антифрикційні матеріали, а також матеріали з струмопровідними, магнітними та іншими спеціальними властивостями.

До недоліків полімерних матеріалів відносяться:

– схильність до старіння;
– схильність до деформування під навантаженням (повзучість);
– залежність характеристик міцності від режимів навантаження (температура, час);
– порівняно невисока теплостійкість;
– відносно великий температурний коефіцієнт лінійного розширення;
– зміна розмірів під впливом на матеріал вологи чи агресивних середовищ.

З пластичних мас виготовляють широкий асортимент деталей і вузлів машин, а також різноманітне технологічне оснащення для різних галузей.

Основними причинами, чому традиційні матеріали на залізниці слід активно замінювати композитними, є їх висока корозійна стійкість, підвищена міцність, низька густина, відмінні ізоляційні властивості та хороше шумопоглинання

полімерних композитних матеріалів. Крім того, вироби з композитних матеріалів є більш надійними та довговічними в експлуатації, порівняно з їх аналогами, виготовленими з різних видів металів. На (рис. 1) зображено перспективний концепт кузова напіввагону який виготовлений з дерево-полімерного композиту. Це композитний матеріал, що складається з деревного порошку/волокон і пластику. Це водонепроникний і стійкий до комах матеріал, який не піддається корозії та гниттю, а також мають значний термін служби.

Рис. 1. Перспективний концепт кузова напіввагону з дерево-полімерного композиту

Дерево-пластикові композити вважаються екологічно безпечними матеріалами, адже після завершення їхнього життєвого циклу їх можна легко переробити для виробництва нових композитів.

Дніпрополімермаш – великий завод в Україні, що спеціалізується на виробництві гумоазбестових виробів. Заснований у 1967 році, завод пройшов через кілька структурних та організаційних перетворень за свою історію. Це найбільший виробник прес-форм для вулканізації пневматичних і масивних шин, камер та обідних стрічок в Україні. Продукція заводу використовується на 90 % шинними заводами країн СНД та України. Модельний ряд прес-форм є досить широким.

В даний час завод безперервно оновлює та модернізує обладнання та цехи. Завод займається виробництвом: обладнання для сільськогосподарських потреб, зварних металоконструкцій, обладнання для гірничодобувної, металургійної, переробної промисловості. Підприємство має гнучку технологію виробництва, що дозволяє швидко реагувати на найменші зміни в потребі ринку, в стислі терміни модернізувати продукцію, що випускається. Кваліфіковані співробітники займаються виробництвом, проектуванням та розробкою нестандартних машин, агрегатів та обладнання. На заводі безперервно відбувається впровадження та освоєння нових технологій у машинобудуванні. Підприємство співпрацює з головними проектними та науково-дослідними інститутами. Все це дозволяє підприємству виробляти конкурентоспроможну продукцію та дотримуватись сучасних тенденцій ринку. При заводі є власне конструкторське бюро та технологічне підрозділ, у яких застосовуються сучасні програмні продукти.

Використання полімерних композиційних матеріалів у залізничній галузі забезпечує такі переваги:

– заміна дорогих металевих сплавів у конструкціях із зниженим навантаженням;

– зменшення ваги рухомого складу, що сприяє підвищенню швидкості;

– покращення безпеки перевезень завдяки використанню енергопоглинаючих елементів при зіткненнях;

– зниження рівня пожежної небезпеки на рухомому складі;

– скорочення трудовитрат під час ремонту;

– підвищення комфорту та ергономічності пасажирських вагонів, а також їх довговічності та зниження витрат на обслуговування;

– можливість повторної переробки виробів із термопластичних полімерів, що сприяє збереженню навколишнього середовища.

Висновки. Використання пластмас у конструкції автомобілів та рухомого складу дозволяє суттєво знизити їхню вагу, одночасно підвищуючи комфортність салону та рівень безпеки пасажирів. У середньому один легковий автомобіль містить близько 55 кг пластмас, при цьому ця кількість може зростати до 120 кг. Більше впроваджувати пластмаси у важке машинобудування, пасажирські та вантажні перевезення. Основною сферою застосування пластмас є виробництво великих зовнішніх компонентів із композиційних матеріалів, що сприяє зниженню маси транспортного засобу та підвищує його довговічність завдяки високій корозійній стійкості пластикових виробів. Крім того, використання високопродуктивних композитних пластмас дозволило виготовляти навантажені силові деталі, такі як ободи, рессори та вали.

Заміна металевих деталей на вироби з пластмас при виготовленні конструкцій складної форми забезпечує суттєвий техніко-економічний ефект, оскільки більшість таких компонентів може бути вироблена на автоматизованих установках з мінімальними відходами перероблюваного матеріалу.

Використання полімерних матеріалів у будівництві як пасажирського, так і вантажного рухо-

мого складу залізниці сприяє зниженню ваги, скороченню витрат на виробництво, підвищенню довговічності та зменшенню експлуатаційних витрат.

Список літератури:

1. Суберляк О. В., Яковенко Т. Т., Бабаханова Т. Г. та ін. Атлас технологічних схем виробництва полімерів та пластичних мас на їх основі / Суберляк О. В., Яковенко Т. Т., Бабаханова Т. Г., Тхір І. Г. – Л., 2002. 239 с.

2. Дослідження точності отворів у волокнистих полімерних композиційних матеріалах при обробці свердлами з дискретними покриттями глобулярного типу на робочій поверхні / Корбут Є., Парненко В., Ніколаєнко Т., Плівак О. *Технічні науки та технології*. 2022. № 1(27). С. 101–107. DOI: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2022-1(27)-101-107.

3. Dieter G. E. Engineering design / G. E. Dieter, L. C. Schmidt. *McGraw-Hill Education*. 2017. p. 880.

4. Chawla K. K. Composite Materials Science and Engineering / K. K. Chawla. *Springer Science+Business Media New York*. 2013. p. 590.

5. Павленко В. М. та ін. Новітні технології в екологічно безпечних полімерних покриттях: дослідження, технології, перспективи. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. № 1 (19). С. 85–94. doi: https://doi.org/10.31649/2413-4503-2024-19-1-85-94

6. Sergii V. S., Sergii S. S., Fomin O., Gaichenia O., Zablotskyi Y., Píštěk V., Kučera P. Use of biofuels in marine diesel engines for sustainable and safe maritime transport. *Renewable Energy*. 2024. 120221 ISSN 0960-1481 https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120221

7. Sagin, S., Kuropyatnyk O., Sagin, A., Tkachenko I., Fomin O., Píštěk V., Kučera P., *Ensuring the Environmental Friendliness of Drillships during their Operation in Special Ecological Regions of Northern Europe*. J. Mar. Sci. Eng. 2022. 10, 1331. https://doi.org/10.3390/jmse10091331

8. Gorobchenko O., Fomin O., Gritsuk I., Saravas V., Grytsuk Y., Bulgakov M., Volodarets M. and Zinchenko D. Intelligent Locomotive Decision Support System Structure Development and Operation Quality Assessment. *IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine. 2018. P. 239–243. doi:10.1109/IEPS.2018.8559487

9. Sulim A. O., Fomin O. V., Khozya P. O., Mastepan A. Theoretical and practical determination of parameters of on-board capacitive energy storage of the underground rolling stock. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5(1), P. 79–87. doi: 10.29202/nvngu/2018-5/8

10. Fomin O., Sulym A., Kulbovsky I., Khozia P., Ishchenko V. Determining rational parameters of the capacitive energy storage system for the underground railway rolling stock. *Eastern-European journal of enterprise technologies*. 2018. 2/1(92). P. 63–71. doi: 10.15587/1729-4061.2018.126080

Fomin O. V., Kozynka O. S., Hrytsai S. V., Zelenskyi O. V., Lisnychyi V. S. INNOVATIVE AND CONCEPTUAL ASPECTS OF POLYMER MECHANICAL ENGINEERING

This article analyzes the use of crystalline, organic, and inorganic compounds that form long macromolecules through the sequential bonding of links. Such compounds are of significant importance in mechanical engineering as they protect structures against corrosion and mechanical vibrations that affect their strength and durability. Furthermore, the application of protective coatings contributes to improved technical and economic indicators in both mechanical engineering and rail vehicle manufacturing. Nowadays, plastics are used in every automobile. They are most commonly employed in the production of interior parts of the cabin, particularly the front section. In addition, plastics are used to manufacture engine, transmission, and chassis components. The use of plastics in sliding bearings reduces the labor intensity of maintenance, since such bearings – with plastic bushings and integrated lubrication – do not require regular greasing for up to 80–100 thousand kilometers. The article also analyzes the main advantages and disadvantages of polymers as structural materials. In mechanical engineering and the production of complex industrial equipment, it is crucial that mechanisms operate reliably even under high loads and prolonged use. To this end, they must possess excellent antifriction properties, high wear resistance, stability at critical temperatures, and effective thermal insulation. Modern thermoplastics and composite materials successfully meet these requirements. The use of plastics in mechanical engineering yields significant technical and economic benefits: machine weight is reduced, expenses on non-ferrous metals and steels are saved, and both the labor intensity of maintenance and the production costs of components are lowered. In particular, the application of plastics in friction nodes contributes to increased productivity and longevity of machines by reducing power losses due to friction, as well as lowering the overall cost and weight of structures. Moreover, the use of modern materials or the treatment of metal surfaces serves as a necessary measure of structural protection, since corrosion can adversely affect the durability and safety of machine-building products.

Key words: *mechanical engineering, transport, rolling stock, polymers, plastics, new materials, operation, reliability.*

UDC 629.463.65
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/06

Fomin O. V.
State University of Infrastructure and Technologies

Burlutskyi O. V.
Ukrainian State University of Railway Transport

Krasulin A. S.
Priazovsky State Technical University

Tarasenko A. V.
National University "Zaporizhzhia Polytecnic"

Gunko I. V.
State University of Infrastructure and Technologies

MATHEMATICAL DESCRIPTION OF THE SHRINKAGE FUNCTION FOR DETERMINING DEFORMATIONS OF MECHANICAL ENGINEERING STRUCTURES

The article is devoted to the mathematical description of the shrinkage function which is used to determine deformations after welding works in machine-building structures. The article indicates the importance of railway transport in its general transport system of the country, and also notes its leading role in the implementation of domestic and foreign economic relations of the country.

The important role of the welding technological process in the production of new and modernization of existing units of the car fleet is indicated. An important role is played by predicting the stress-strain state of large-sized welded structures is currently possible only with the help of the approximate method of the shrinkage function. One of the first works where the method and stresses based on the shrinkage function are used is the work of E. O. Paton and colleagues, published in 1936, which presents a comprehensive study of residual welding stresses. Here, the idea of calculating residual welding stresses by the methods of the theory of elasticity for a given value of shrinkage longitudinal deformations, which were determined experimentally from simple experiments, is used.

Deformations of metal structures of wagons are a common problem that occurs during their manufacture, operation and repair. The main causes of these deformations are residual stresses that arise during welding, as well as mechanical damage during operation. According to the design standards of a wagon, the stresses in it are determined by longitudinal forces acting along the coupling axis and the vertical load, which includes the payload and the dead weight of the wagon body.

The work also proposes to use a computational-experimental method for solving the inverse problem, taking into account the results of measuring welding deformations on small samples for the most accurate determination of the parameters of the shrinkage function. The article discloses the methodology for calculating deformations of wagon metal structures that arise during their welding.

The results are a mathematical description of the shrinkage function for determining deformations of machine-building structures. As an example, the results of mathematical modeling of the backbone beam of freight cars are given. Based on the results obtained, the feasibility and need for further research into the possibility of using methods to reduce residual stresses, for example, optimizing the technology of pre-bending the beam before welding, is justified. This approach can become an alternative to the thermal straightening method, contributing to reducing residual deflection and increasing the accuracy of manufacturing metal structures

Key words: *railway transport, rolling stock, car fleet, welding, machine-building structures, post-welding deformations, shrinkage functions, mathematical description, mathematical models.*

Formulation of the problem. During the life cycle, all engineering objects perceive different types of loads. In general, loads can be divided into: typical for operation and non-typical. In this case, it is desirable that engineering objects do not lose their performance when exposed to non-typical loads and / or have the ability to restore it.

Correction of deformations of machine-building structures is always an important and relevant scientific and applied problem. The technical and economic indicators of the operation of the facility at different stages of the life cycle largely depend on the effectiveness of its solution. Therefore, the expected results of solving the scientific problem of correcting deformations of the relevant machine-building facilities are relevant and timely [1].

Analysis of recent research and publications. Forecasting the stress-strain state of large-sized welded structures is currently possible only using the approximate method of the shrinkage function. One of the first works, where the method and stresses based on the shrinkage function are used, is the work of E. O. Paton and colleagues, published in 1936 [2], which provides a comprehensive study of welding residual stresses. Here, the idea of calculating the residual welding stresses by the methods of the theory of elasticity for a given value of shrinkage longitudinal deformations, which were determined experimentally from simple experiments, was used. Deformations of railcar metal structures are a common problem that occurs during their manufacture, operation and repair. The main causes of these deformations are residual stresses arising from welding processes, as well as mechanical damage during operation [3–6].

According to the norms of wagon design, the stresses in it are determined by the longitudinal forces acting along the axis of the coupling, and by the vertical load, which includes the payload and the own weight of the wagon body [7–8].

The relevance of the problem of forecasting general deformations of large-sized welded structures, as well as the effectiveness of using the shrinkage function method for these purposes, are confirmed by the results of works [9]. In the paper, based on a comparison with the results of experimental measurements and the results of calculations using the thermoplasticity method, the high accuracy of determining the welding deformations of shipbuilding panels using the approximate method of the shrinkage function is shown. Also, in this paper, it is proposed to use the calculation-experimental method of solving the inverse problem taking into account the results of measuring welding deformations on small samples for the most accurate determination of the parameters of the shrinkage function.

Task statement. Is a mathematical description of the shrinkage function for determining deformations of mechanical engineering structures (On the button Railway transport).

Outline of the main material of the study. To determine the shrinkage function, a calculation scheme was chosen using a maximally simplified model of butt welding of plates of limited dimensions from the point of view of geometry. However, the search for a solution is carried out on the basis of general methods of thermoplasticity and the finite element method. A generalized representation of shrinkage function methods is given in [4]. The shrinkage function is generally represented by a symmetric second-rank tensor in the form:

$$\Pi_{ij} = \begin{Vmatrix} \Pi_{xx} & \Pi_{xy} & \Pi_{xz} \\ \Pi_{yx} & \Pi_{yy} & \Pi_{yz} \\ \Pi_{zx} & \Pi_{zy} & \Pi_{zz} \end{Vmatrix} \quad (i, j = x, y, z), \qquad (1)$$

where Π_{xx}, Π_{yy}, Π_{zz} – normal components of the shrinkage function. The condition of conservation of volume gives

$$\Pi_{xx} + \Pi_{yy} + \Pi_{zz} = 0 \qquad (2)$$

The tangential components satisfy the symmetry condition, i. e. $\Pi_{xy} = \Pi_{yx}$, etc. For thin-walled elements of welded structures, for which the basic hypotheses of the theory of plates and shells are applicable [7, 12], the components of the tensor Π_{ij} have the form

$$\Pi_{ij}(x, y, z) = \Pi^0_{i,j}(x, y) + æ_{ij}(x, y), \qquad (3)$$

where $\Pi^0_{i,j}(x, y)$ – shrinkage in the middle surface of the element $z = 0$, $æ_{ij}(x, y)$ – corresponding curvature of the shrinkage function at the point x, y.

When determining the «shrinkage function» for the case of bending deformations, when welding beams, it is usually sufficient to consider a characteristic section x = const, within which the temperature field of heating and cooling is known $T(y, z, t)$ and external axial force $N_{xx}(t)$ and moments $M_{yy}(t)$ и $M_{zz}(t)$. This is a statically determined problem, where at each step of tracing the increment of curvature is $\Delta x_{yy}(t)$ и $\Delta x_{zz}(t)$ and longitudinal shortening $\Delta\varepsilon^0_{xx}(t) = \Delta\varepsilon_{xx}(0,0,t)$ are determined within the framework of beam hypotheses from the equilibrium equations [10, 11]

$$\Delta\varepsilon^0_{xx} L_{j1} + \Delta x_{zz} L_{jz} + \Delta x_{yy} L_{jy} + \mathrm{P}_j = \bar{M}_j, \quad (j = 1, z, y). \qquad (4)$$

Where $L_{iq} = \int_F \frac{j \cdot q}{B_1} dF \quad (i, q = 1, z, y),$

$$\mathrm{P}_j = \int_F b_{xx} \frac{dF}{B_1} j \quad (j = 1, z, y),$$

F – beam cross-sectional area, $\bar{M}_j$ – external load, i. e. when $j = 1$ this is an effort $N_{xx}(t)$, a at $j = z, y$ – moments accordingly $M_{zz}(t)$ and $M_{yy}(t)$, acting in a given section at a given moment in time t, B_1 – is expressed through the state function of the material ψ, the bulk modulus

$$K = \frac{1 - 2\nu}{E}$$

as for a plane stress state, i. e.

$$B_1 = \frac{2\psi + K}{3};$$

b_{xx} in (1) also corresponds to a plane stress state, but only for non-zero normal stresses σ_{xx}, i. e.

$$b_{xx} = \left(\frac{\sigma_{xx} - \frac{1}{3}\sigma_{xx}}{2G} + K \frac{\sigma_{xx}}{3} \right)_{t-\Delta t} - \\ - \Delta\varphi = \left(\frac{\sigma_{xx}}{E} \right)^{*)} - \Delta\varphi. \quad (5)$$

$\sigma_{xx}(y, z, t)$ are determined by dependence:

$$\sigma_{xx}(y, z, t) = \\ = \frac{1}{B_1} \left[\Delta\varepsilon_{xx}^0(t) + \Delta x_{zz}(t) \cdot z + \Delta x_{yy}(t) \cdot y - b_{xx} \right]. \quad (6)$$

The state function $\psi(y, z, t)$ is found iteratively using the well-known algorithm [10]. At each iteration with respect to ψ, it is necessary to solve the system of equilibrium equations (1), the matrix of which is symmetric and positive definite, which is a sufficient condition for the existence and uniqueness of the solution of system (1) for given. In the case of a multi-support beam under consideration, the forces on the supports $Q_{ji(t)}$ ($j = y, z$; $i = 0, 1, 2, \ldots, N$) depend on the stress state from the conditions that the increments of displacements on the supports.

The state function $\psi(y, z, t)$ is found iteratively using the well-known algorithm [10]. At each iteration with respect to ψ, it is necessary to solve the system of equilibrium equations (1), the matrix of which is symmetric and positive definite, which is a sufficient condition for the existence and uniqueness of the solution of system (1) for given $\bar{M}_j$.

In the case under consideration, the beams on two supports $Q_{ji}(t)$ ($j = y, z$; $i = 0, 1, 2, \ldots, N$) depend on the stress state from the conditions that the increments of displacements on the supports

$$\Delta U_{ji} = 0, \quad (j = y, z; \quad i = 0, 1, \ldots, N). \quad (7)$$

Since at each iteration with respect to ψ the solution with respect to the function $\Delta U_j(x, t)$ is determined for given values of $\psi(x, y, z, t)$, it is more convenient to search for it in the form of a sum

$$\Delta U_j(x,t) = \Delta U_j^{(T)}(x,t) + \Delta U_j^{(Q)}(x,t), \quad (j = z, y). \quad (8)$$

Accordingly, the increment of curvature $\Delta x_{jj}(x, t)$ is represented by the sum

$$\Delta x_{ij}(x,t) = \Delta x_{ij}^{(T)}(x,t) + \Delta x_{ij}^{(Q)}(x,t). \quad (9)$$

In this case, $\Delta x_{ij}^{(T)}$ they satisfy the equilibrium equations in the section x = const $\bar{M}_j = 0$, and $\Delta x_{jj}^{(Q)}(x,t)$, respectively, are determined from equations (1) in the form:

$$\Delta x_{zz}^{Q_j} L_{jz} + \Delta x_{yy}^{Q_j} L_{jy} = \bar{M}_j(Q_j), \quad (j = y, z); \quad (10)$$

$$\Delta x_{yy}^{Q} = \frac{L_{zz}\bar{M}_y - \bar{M}_z L_{zy}}{L_{zz}L_{yy} - L_{zy}^2} = \bar{M}_y A_y - M_z D; \\ \Delta x_{zz}^{Q} = \frac{L_{yy}\bar{M}_z - \bar{M}_y L_{zy}}{L_{zz}L_{yy} - L_{zy}^2} = \bar{M}_z A_z - M_y D. \quad (11)$$

where l_i – the distance from the i-support to the support can be written:

$$\bar{M}_j(x) = Q_{0j} l_1 + Q_{1j}(x - l_1),$$

$\bar{M}_y$, $\bar{M}_z$ – bending moments in the section x = const from the sought-after forces $Q_{yi}(t)$, $Q_{zi}(t)$ ($i = 0, 1, \ldots, N$).

$$A_y = \frac{L_{zz}}{\Delta}, \quad D = \frac{L_{zy}}{\Delta}, \quad A_z = \frac{L_{yy}}{\Delta}, \quad \Delta = L_{zz}L_{yy} - L_{zy}^2.$$

Considering the static equations for forces $Q_{ji}(t)$, т. е.

$$\sum_{i=0}^{N} Q_{ji} = 0 \quad \text{and} \quad \sum_{i=0}^{N} Q_{ji} l_i = 0, \quad (12)$$

where l_i – the distance from the i-support to the support can be written:

$$\bar{M}_j(x) = Q_{0j} l_1 + Q_{1j}(x - l_1) \quad \text{for} \quad l_1 < x < l_2; \\ \bar{M}_j(x) = Q_{0j} x + Q_{1j}(x - l_1) + Q_{2j}(x - l_2) \\ \text{for} \quad l_2 < x < l_3$$

etc., i. e. for $l_i < x < l_{i+1}$

$$\bar{M}_j(x,t) = \sum_{n=0}^{i} Q_{nj}(t)(x - l_n) \quad (13)$$

at $j = y, z$; $i = 1, 2, \ldots, N - 1$; $l_0 = 0$.

Using condition (4), as well as the dependencies $\Delta x_{jj} = -\dfrac{\partial^2 \Delta U_j}{\partial x^2}$, we obtain after integration taking into account (1) and (7), (8) a system of $2(N-1)$ equations with respect to the known Q_{ji} and the constant of integration C_0.

$$C_{0y} l_i + \int_0^{l_i}\int_0^{x} \Delta x_{jj}^{(T)}(t,x)dxdx + \sum_{n=0}^{i}\left[Q_{ny}(t)\Phi_{in}^{(y)} - Q_{nz}R_{in}\right] = 0;$$
$$C_{0z} l_i + \int_0^{l_i}\int_0^{x} \Delta x_{zz}^{(T)}(t,x)dxdx + \sum_{n=0}^{i}\left[Q_{nz}(t)\Phi_{in}^{(z)} - Q_{ny}R_{in}\right] = 0, \quad (14)$$

where

$$\Phi_{in}^{(j)} = \int_{l_{i-1}}^{l_i}\int_{l_{i-1}}^{x} A_j(x,t)(x - l_{i-1})dxdx,$$

$$R_{in} = \int_{l_{i-1}}^{l_i}\int_{l_{i-1}}^{x} D(x,t)(x - l_{i-1})dxdx.$$

The most loaded unit of the load-bearing structures of freight cars is the frame. The main longitudinal load acting on the frame during operational modes is perceived by the backbone beam (Fig. 1).

As an example, (Fig. 2) shows the calculated results of the kinetics of the displacements U_y of the axial line points of the ridge beam passing through the center of gravity of the sections after welding. The calculation is performed for 1/3 of the length of the ridge beam of the gondola car using the similarity method [12, 13]. The beam profile and welding heating are symmetrical relative to the Y axis, therefore the displacements U_z are equal to zero.

The experimental results showed close agreement with the calculated data, both in the nature of the distribution and in the magnitude of (Fig. 3). The use of software based on the developed calculation algorithm made it possible to quickly determine the optimal distances between supports for beams of different rigidity to ensure acceptable transverse displacement of the beam at the moment of passage of the welding source.

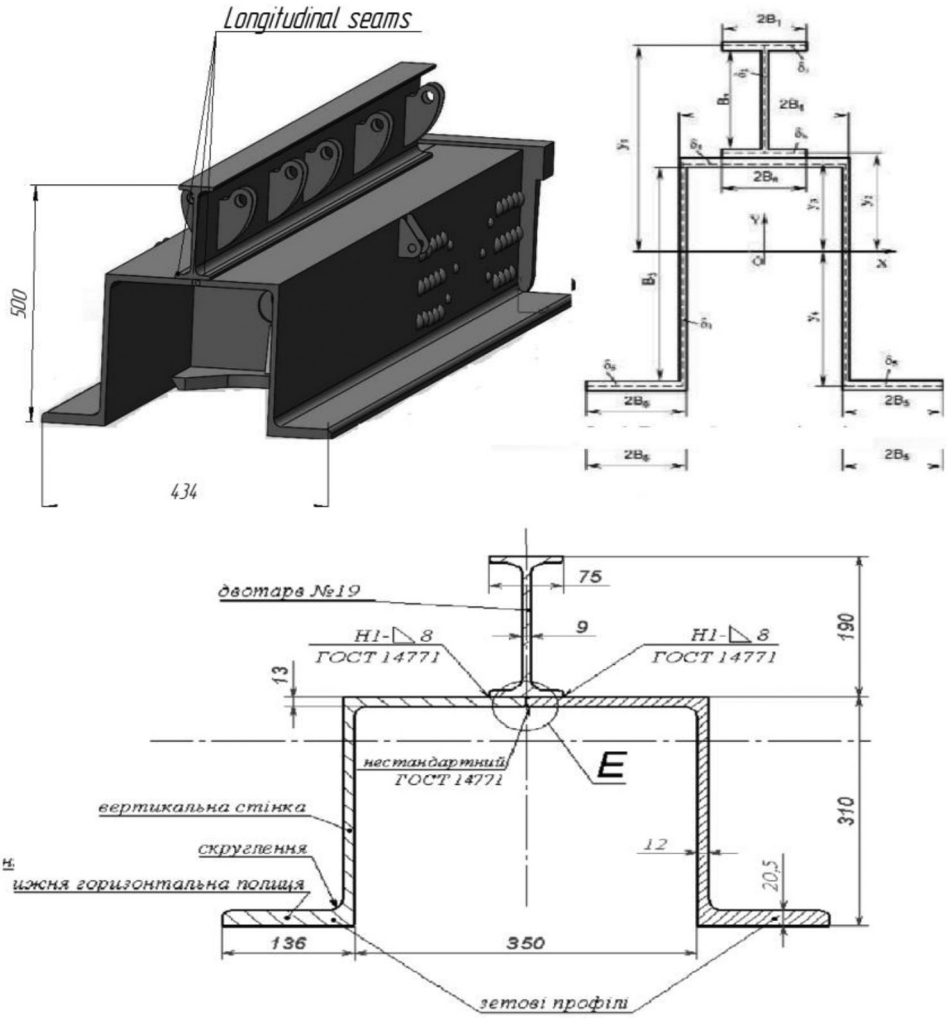


Fig. 1. Cross-section of the ridge beam of a gondola car

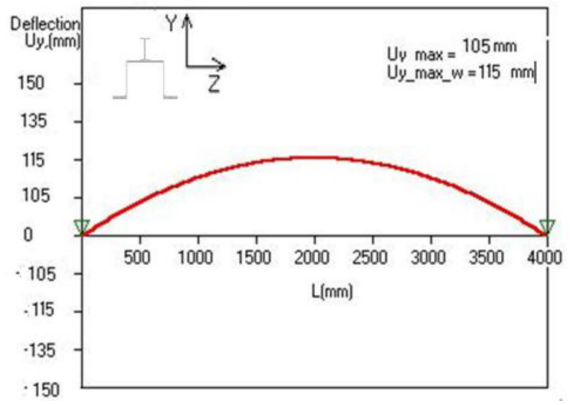


Fig. 2. Calculated results of the kinetics of displacements U_y of the axial line points of the ridge beam during welding after complete cooling

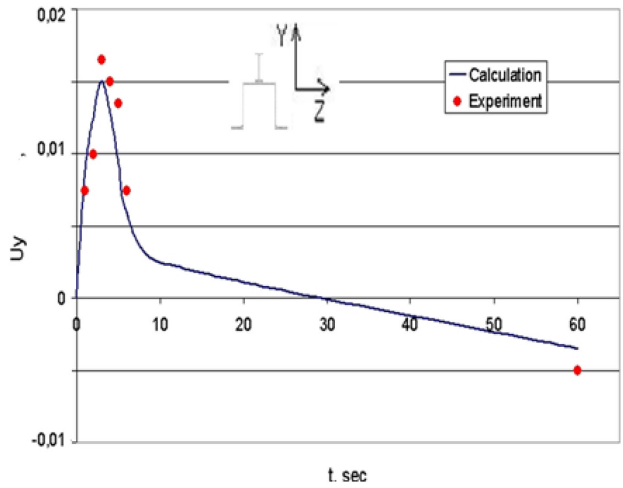


Fig. 3. Comparison of calculated and experimental data on the kinetics of transverse movement of the ridge beam at the moment of passage of the welding source

Conclusion.

1. Reducing the deformation of car metal structures is critically important to ensure their reliability and durability.

2. A mathematical description of car metal structures has been created and a similar mathematical apparatus allows for lining selection of optimal welding deformations

3. You have determined that 60 % of the area of the upper sections of the *Z*-profiles at the welding station after welding of the beam is covered by a zone of excess plasticity after welding, and that the metal in this zone has excess tensile stresses at the level of fluidity.

4. The results of the de-fracture of the stress-deformed mill when welding late welds of transverse cuts on model problems do not coincide with the existing theoretical findings about the machine and are consistent with the known results of other authors.

Recommendations for further research. It is recommended to consider the possibility of using methods to reduce residual stresses, such as optimizing the technology of preliminary bending of the beam before welding.

The development of a method for calculating the parameters of the preliminary active mechanical load for a beam folded on tacks is a promising research direction. This approach can become an alternative to the thermal straightening method, contributing to the reduction of residual deflection and increasing the accuracy of manufacturing metal structures.

Bibliography:

1. O. Fomin, O. Kozinka, V. Ishchenko, O. Burlutskyy. Repair means for typical and composite open-wagon bodies- II International Conference “In-service Damage of Materials: Diagnostics and Prediction”-Procedia Structural Integrity 59. 2024 P. 523–530. https://doi.org/10.1016/j.prostr.2024.04.074

2. Напруження та деформації при зварюванні і паянні / за заг. ред. Л. М. Лобанова. Миколаїв НУК, 2016. 246 с.

3. Бурлуцький О. В., Кочешкова Н. С. Визначення зварювальних деформацій які виникають під час життєвогоциклу піввагона *Збірник наукових праць Державного економіко-технологічного університету транспорту Серія Транспортні системи і технології ДЕТУ*, 2015. № 26–27. С. 92–101.

4. Фомін О. В. Дослідження дефектів та пошкоджень несучих систем залізничних напіввагонів: монографія / О. В. Фомін. Київ, ДЕТУТ, 2014. С. 299.

5. Чухліб В. Л., Губський С. О., Окунь А. О. Формалізовані підходи до визначення числа технологічних переходів при виробництві гнутих профілів *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. зб. наук. пр. Харків НТУ «ХПІ»*, 2020. № 2. С. 169–173.

6. Губський С. О. Чухліб В. Л., Біба М. В Моделювання формоутворення гнутого профілю зі змінним перерізом *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Сер. зб. наук. пр. Харків НТУ «ХПІ»*, 2022. № 1. С. 80–84.

7. ДСТУ 7598:2014 Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізо-ваних вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ : Держстандарт України. 2015. С. 162.

8. Махненко О. В. Прогнозування деформацій при зварюванні і термічному правленні конструкцій на основі методів термопластичності і функції усадки : *автореф. дис.. д-ра техн. наук: 05.03.06; НАН України, Ін-т електрозварювання ім. Є. О. Патона*. 2009. С. 40.

9. Кандала С. М. Ресурс елементів внутршньо корпусних пристроїв реактора ВВЕР-1000 з урахуванням залишкових зварювальних напружень. *Дис. доктора філософій: за спеціальністю 132 – «Матеріалознавство» (13 – Механічна інженерія*). – Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, Київ, 2023. С 32.

10. Y. Luo, Prediction D., L. Deng, H. Murakawa Deformation for Large Welded Structures Based on *Inherent Strain Trans. of JWRI*. 2004. Vol. 33, № 1. P. 65–70.

11. Опір матеріалів (спеціальний курс), теорія пружності та пластичності/ за заг. ред. В. М. Трач, Каравела, Київ., 2016 С. 434.

12. Єрмолаєв, Г. В. Міцність зварних з'єднань *підручник*, Миколаїв : НУК, 2007. С. 220.

13. Основи математичного имоделювання / За заг. ред. д.т.н., доц. О. А. Балтовського. Одеський держ. Унів-т внутр. справ, 2023. С. 125.

Фомін О. В., Бурлуцький О. В., Красулін О. С., Тарасенко О. В., Гунько Є. В. МАТЕМАТИЧНЕ ОПИСАННЯ ФУНКЦІЇ УСАДКИ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ДЕФОРМАЦІЙ МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ

Стаття присвячена математичному описанню функції усадки яка застосовується для визначення деформацій після зварювальних робіт в машинобудівних конструкцій. У статті зазначена важливість залізничного транспорту в її загальній транспортній системі країни, а також відмічене його провідну роль у здійсненні внутрішньодержавних та зовнішньодержавних економічних зв'язках країни.. Зазначена важлива роль технологічного процесу зварювання при виробництві нових та модернізації існуючих одиниць вагонного парку. Важлива роль з прогнозувати напружено-деформований стан великогабаритних зварних конструкцій в даний час можливо лише за допомогою наближеного методу функції усадки. Однією з перших робіт, де використано метод і напруження на основі функції усадки, є робота Е. О. Патона з колегами, опублікованому в 1936 р., в якому представлено всебічне дослідження залишкових напруг зварювання. Тут використано ідею розрахунку залишкових зварювальних напружень методами теорії пружності для заданого значення усадкових поздовжніх деформацій, які були визначені експериментально з простих дослідів. Деформації металоконструкцій вагонів є поширеною проблемою, яка виникає при їх виготовленні, експлуатації та ремонті. Основними причинами цих деформацій є залишкові напруги, що виникають в процесі зварювання, а також механічні пошкодження в процесі експлуатації. Згідно з нормами проектування вагона напруги в ньому визначаються поздовжніми силами, що діють уздовж осі зчеплення, і вертикальним навантаженням, яке включає корисне навантаження і власну вагу кузова вагона.. Також у роботі запропоновано використовувати розрахунково-експериментальний метод розв'язування оберненої задачі з урахуванням результатів вимірювання зварювальних деформацій на малих зразках для найбільш точного визначення параметрів функції усадки.

У статті розкрито, методика розрахунку деформацій вагонних металоконструкцій, які виникають в процесі їх зварювання. Наведені результати математичне описання функції усадки для визначення деформацій машинобудівних конструкцій. В якості прикладу наведені результаті математичне моделювання хребтової балки вантажних вагонів.

На підставі отриманих результатів обґрунтовано доцільність і необхідність подальших досліджень можливість застосування методів зниження залишкових напружень, наприклад оптимізації технології попереднього згинання балки перед зварюванням. Такий підхід може стати альтернативою методу термічної правки, сприяючи зменшенню залишкового прогину та підвищенню точності виготовлення металоконструкцій.

Ключові слова: *залізничний транспорт, рухомий склад, вагонний парк, зварювання, машинобудівних конструкцій, після зварювальні деформації, функції усадки, математичне описання, математичні моделі.*

ЕЛЕКТРОТЕХНІКА

УДК 621.313.333
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/07

Голощапов С. С.
Херсонська державна морська академія

Іванов А. А.
Херсонська державна морська академія

Дощенко Г. Г.
Херсонська державна морська академія

Наговський Д. А.
Херсонська державна морська академія

ОПТИМІЗАЦІЯ ФОРМИ ЖИВЛЯЧОЇ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА ПРИ ЧАСТОТНОМУ КЕРУВАННІ

Трифазний асинхронний двигун (АД) є основним типом електродвигуна, який застосовується в промисловості та на суднах морського флоту. Широке застосовування трифазні АД одержали завдяки простоті устрою, зручності обслуговування та високої надійності роботи. Використання асинхронного приводу в суднових підйомних механізмах, насосах та вентиляторах з регульованою продуктивністю передбачає плавне регулювання швидкості в широкому діапазоні. В даний час в основному використовується частотне регулювання – найбільш плавний та економічний спосіб регулювання швидкості асинхронних короткозамкнених двигунів, що забезпечує широкий спектр регулювання (до 12:1 і вище) з досить жорсткими механічними характеристиками. Однак застосування цього методу вимагає спеціальних перетворювачів частоти, тип яких визначає схему частотного управління АД. В сучасних приводах з усіх видів методів отримання синусоїдального струму в основному використовується метод з проміжною ланкою постійного струму та інвертором, керованим широтноімпульсним модулятором (ШІМ). Для одержання синусоїдальної форми кривої струму необхідно досить часто (приблизно 10 разів за півперіода) перемикання ключів інвертора, що призводить до значних комутаційних втрат в ключах і їх розігріву, для зменшення якого використовуються рідинні системи охолодження. Останнє різко знижує експлуатаційну надійність і ускладнює конструкцію інвертора. У дійсній статті досліджено експлуатаційні показники АД при живленні його прямокутною напругою типу меандр, утворення якого передбачає зменшення на порядок комутаційних втрат в інверторі та відмови від систем рідинного охолодження. Виходячи з аналізу додаткових втрат у обмотках і сталі двигуна від вищих гармонійних, що виникають при живленні несинусоїдальним струмом визначено енергетичні показники АД при описаних способах живлення і вплив значень обмоткового коефіцієнта на ці показники. За наведеною методикою розрахунків доведено, що навіть у найгіршому варіанті додаткові втрати від вищих гармонійних складають незначну частку від загальних втрат двигуна і не можуть суттєво впливати на його енергоефективність і тепловий режим.

Ключові слова: *асинхронний двигун, гармоніка, коефіцієнт укорочення, комутаційні втрати, обмотковий коефіцієнт.*

Постановка проблеми. Трифазні асинхронні двигуни (АД) набули широкого застосування в промисловості та судах морського та річкового флоту завдяки своїй простоті в обслуговуванні, високим енергетичним показникам, надійності та є основним типом електродвигунів, що застосовуються в електроприводах. Відносно невисокий ступінь регульованості швидкості АД в даний час компенсується застосуванням частотного управління, яке забезпечує широкий діапазон швид-

костей за досить жорстких механічних характеристик і економічно з енергетичної точки зору. Найбільш поширеним типом сучасного перетворювача частоти є модель з випрямленою мережевою напругою з подальшим інвертуванням та формуванням напруги синусоїдальної форми на базі широтно-імпульсного модулятора (ШІМ). При цьому, щоб отримати струм двигуна синусоїдальної форми, необхідно до 10 разів за півперіоду провести комутацію ключів інвертора, що викликає в них високі втрати комутації, які можливо евакуювати тільки за допомогою застосування рідинних систем охолодження. Останні різко знижують надійність та ускладнюють конструкцію інвертора.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [1, с. 98–107] було здійснено аналіз енергетичних характеристик асинхронного двигуна при живленні його прямокутною напругою виду 1 (рис. 1).

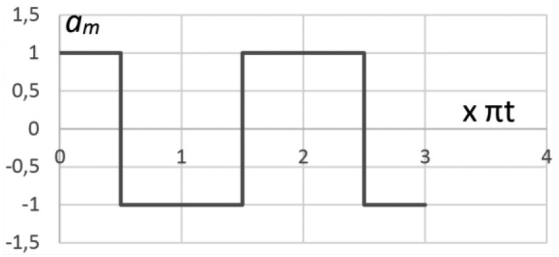


Рис. 1. Прямокутна живляча напруга виду 1

При цьому напруга виду 1 описується функцією [2, с. 142]

$$u(t)=\frac{4U_m}{\pi}\left(\cos\omega t+\frac{1}{3}\cos 3\omega t+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{5}\cos 5\omega t+\frac{1}{7}\cos 7\omega t+\ldots\right). \quad (1)$$

Як видно з наведеної формули, величина вищих гармонійних зменшується пропорційно номеру гармоніки. Очевидно, що найбільш вираженою після першої є третя гармоніка. І якщо при з'єднанні обмоток статора зіркою її вдається повністю знищити, то при з'єднанні трикутником вона залишається і її дія при певних значеннях обмотувальних коефіцієнтів може бути небезпечною з точки зору додаткових моментів, що спотворюють основну механічну характеристику двигуна, і додаткових втрат, що викликають перегрів обмотки і заліза статора. Крім того, досить відчутною залишається і п'ята гармоніка, яка також доповнює вказані небажані явища.

Постановка завдання. Метою цієї статті є аналіз енергетичних показників АД при живленні його напругою прямокутної форми виду 2, в якому відсутні треті та кратні їй гармоніки.

Виклад основного матеріалу. З точки зору зменшення дії вищих гармонійних найбільш доцільнішою є форма ступінчастої прямокутної напруги виду 2.

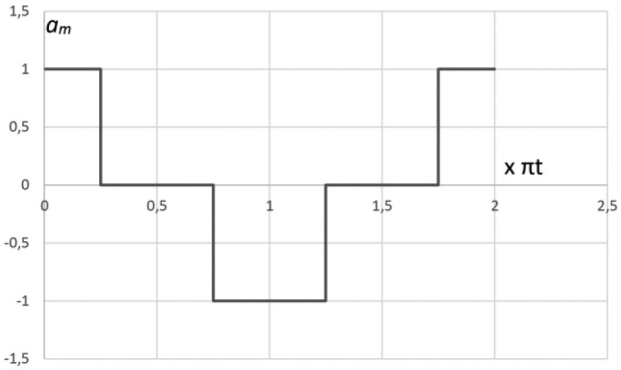


Рис. 2. Прямокутна живляча напруга виду 2

У цьому випадку функція описується виразом

$$u(t)=\frac{4a_m}{\pi}\left(\sin\frac{\alpha\pi}{2}cos\omega t+\frac{1}{3}\sin\frac{3\alpha\pi}{2}\cos 3\omega t+\right.$$
$$\left.+\frac{1}{5}\sin 5\frac{5\alpha\pi}{2}\cos 5\omega t+\ldots\right). \quad (2)$$

Аналіз виразу функції, представленої на рис. 2 показує, що при $\alpha = 2/3$ або $\alpha\pi = 120°$ третя гармоніка обертається в 0 і при даному значенні $\alpha\pi$ крива виду 2 може бути рекомендована для схеми включення трикутником.

Якщо ж використовується схема включення зірка, доцільно прийняти $\alpha = 2/5$ або $\alpha\pi = 72°$. При цьому знищується найбільш виражена п'ята гармоніка.

Слід, проте мати на увазі, що якщо при формі напруги живлення виду 1 співвідношення основної робочої першої гармоніки до третьої становить 1:0,333, то при напрузі виду 2 це співвідношення при становить 0,866:0, тобто. при 100-відсотковому придушенні третьої гармоніки за рахунок форми напруги живлення для збереження енергетичних показників двигуна, що визначаються першою гармонікою, слід збільшити напругу живлення на 15,5 %.

Дійсно, при $\alpha\pi = 120°$ функція виду 2 дає

$$f(\omega t)=\frac{4a_m}{\pi}(0{,}866\cos\omega t+0\cos 3\omega t-$$
$$-0{,}173\cos 5\omega t+\ldots). \quad (3)$$

Аналогічно, при 100-відсотковому зменшенні п'ятої гармоніки за рахунок форми напруги слід збільшити напругу живлення в 1,7 рази, оскільки при $\alpha\pi = 72°$функція виду 2 дає

$$f(\omega t) = \frac{4a_m}{\pi}(0,588\cos\omega t + 0,317\cos 3\omega t + \\ + 0\cos 5\omega t + ...). \quad (4)$$

Звичайно, останній варіант, що представляє повне придушення третьої і п'ятої гармоніки при з'єднанні зіркою є найбільш кращим, проте не завжди прийнятним на суднах, де часто використовують з'єднання трикутником для отримання підвищеної потужності, а істотне зменшення (4) основної гармоніки вимагає значного підвищення загальної напруги живлення, що не завжди можливо. Тому як компромісний варіант слід розглядати придушення третьої гармоніки в трикутнику згідно з (3) тим більше, що найбільш типове укорочення кроку обмотки, яке застосовує заводвиробник, сприяє ефективному придушенню п'ятої гармоніки.

У виразах (1–4) перша гармоніка є корисною і робить роботу, створюючи основні теплові втрати двигуна. Вищі гармонічні створюють додаткові моменти, що спотворюють основну характеристику моменту двигуна, і додаткові втрати, що зменшують к.к.д. двигуна і призводять до порушення його теплового режиму. Оцінку впливу вищих гармонійних на енергетичний та тепловий режим двигуна можна оцінити в такий спосіб.

Як відомо [3, с. 207], обмотувальний коефіцієнт $k_{об}$ складається з коефіцієнта укорочення k_y та коефіцієнта розподілу k_p, тобто $k_{об} = k_y \cdot k_p$.

Для першої гармоніки k_p є функцією числа пазів на полюс і фазу, але ця залежність є слабкою і в першому наближенні можна прийняти $k_{p1} \approx 0,96$.

Коефіцієнт укорочення $k_{y\nu}$ для ν-тої гармоніки визначається як [1, с. 102]

$$k_{y\nu} = \sqrt{1 - \left(\sin\nu \arcsin\sqrt{1 - k_{y1}^2}\right)^2}, \quad (5)$$

де: k_{y1} – коефіцієнт укорочення для першої гармоніки, ν – номер гармоніки.

Таким чином, загальний алгоритм розрахунку обмотувального коефіцієнта для ν-тої гармоніки можна представити як [1, с. 103]:

1. Задаємося обмотувальним коефіцієнтом $k_{об1}$ по першій гармоніці.

2. Приймаємо коефіцієнт розподілу для першої гармоніки $k_{p1} = 0,96$.

3. Визначаємо коефіцієнт укорочення для першої гармоніки як

$$k_{y1} = \frac{k_{об1}}{k_{p1}} = \frac{k_{об1}}{0,96}.$$

4. Для ν-тої гармоніки визначаємо коефіцієнт розподілу [3, с. 226]

$$k_{p\nu} = \frac{\sin\dfrac{\nu\pi}{2m}}{q\sin\dfrac{\nu\pi}{2mq}}.$$

5. Визначаємо коефіцієнт укорочення для ν-тої гармоніки по (5).

6. Визначаємо обмотувальний коефіцієнт для ν-тої гармоніки як $k_{об\nu} = k_{p\nu}k_{y\nu}$.

Для визначення втрат в обмотках двигуна від ВГ слід спочатку визначити ці потужності кожної гармонійної окремо, а потім їх скласти.

Потужність втрат у міді статора у разі напруги живлення виду 1 дорівнює

$$P_{e1,1} = 3I_{1,1}^2 r_1,$$

де $I_{1,1}$ – номінальний струм статора основної гармоніки, r_1 – активний опір обмотки статора.

Вважаємо, що струм ν-тої гармоніки пропорційний напрузі цієї гармоніки. Тоді для тієї гармоніки електричні втрати в міді статора можна записати як

$$P_{e1,\nu} = \frac{k_{об,\nu}^2}{\nu^2 k_{об1}^2} P_{e1,1},$$

а з урахуванням втрат у міді ротора втрати в обмотках від ν-тої гармоніки будуть рівні

$$P_{e,\nu} = \frac{k_{об,\nu}^2}{\nu^2 k_{об1}^2} P_{e,1},$$

де $P_{e,1}$ – втрати в обмотках статора та ротора від основної гармоніки.

Слід зазначити, що наведені формули справедливі лише для двигуна з короткозамкненим ротором. У разі фазного ротора слід розглядати електричні втрати у статорі та роторі окремо з використанням відповідних обмотувальних коефіцієнтів для обмоток статора та ротора.

Втрати в сталі від ν-тої гармоніки при живленні прямокутною напругою виду 1 [1, с. 104]:

$$P_{ст\nu} = P_{ст1}\left(\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 \nu^{\beta-2}, \quad (6)$$

де $P_{ст1}$ – втрати сталі від першої гармоніки, β – залежить від марки сталі.

Крім основних втрат $P_{ст.осн}$ у сталі (ярмі статора та його зубцях) існують ще поверхневі втрати $P_{пов}$ та пульсаційні $P_{пул}$ в зубцях. Аналіз цих залежностей показує, що зазначені втрати, в кінцевому рахунку, пропорційні, як і основні втрати в сталі, величині індукції в повітряному зазорі, тобто, структури формул основних втрат у сталі, поверхневих втрат в роторі і пульсаційних втрат в зубцях ротора щодо індукції схожі. Тому у формулі (6) як параметр слід розуміти повні втрати в сталі

$$P_{ст1} = P_{ст.осн} + P_{пок} + P_{пул}.$$

У разі використання напруги живлення виду 2 електричні втрати в обмотках від дії ν-тої гармоніки можна представити як

$$P^1_{e,\nu} = \left(\frac{1{,}155}{\nu}\sin\frac{\nu\alpha\pi}{2}\right)^2 \frac{k^2_{об\nu}}{k^2_{об1}} P_{e1,1}, \qquad (7)$$

де 1,155 – коефіцієнт, що враховує підвищення напруги живлення.

Зіставляючи формули (6) і (7) можна побачити, що вони відрізняються на множник a^2_ν, де $a_\nu = 1{,}155\sin\frac{\nu\alpha\pi}{2}$, що обертається в 0 у випадку $\alpha\pi = 120°$для гармонік, кратних 3 і в 1 для інших непарних гармонік.

Втрати сталі від ВГ у разі напруги виду 2.

Згідно з [1, с. 104], основні втрати в сталі осердя статора від основної гармоніки визначаються за формулою

$$P_{ст1} = p_{1,0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^\beta (k_{да}B^2_a m_a + k_{za}B^2_{zср}m_z), \qquad (8)$$

де $p_{1,0/50}$ – питомі втрати сталі, наведені до індукції 1 Тл і частоті 50 Гц, β – залежить від марки сталі, f – частота перемагнічування сталі, $k_{да}$, k_{za} – коефіцієнти, що враховують вплив на втрати в сталі нерівномірності розподілу потоку за перерізами ділянок магнітопроводу та технологічних факторів, B_a і $B_{zср}$ – індукція в ярмі та середня індукція в зубцях статора, m_a і m_z – маса сталі ярма та зубців статора.

Вважаємо, що величина індукції тієї гармоніки пропорційна Тоді втрати в сталі від ν-тої гармоніки визначаться як

$$P_{ст\nu} = p_{1,0/50}\left(\frac{\nu f}{50}\right)^\beta (k_{да}B^2_{a\nu}m_a + k_{дz}B^2_{zср\nu}m_z) =$$

$$= p_{1,0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^\beta \nu^\beta\left[k_{да}(a_\nu B_{a1})^2 m_a + k_{дz}(a_\nu B_{zср1})^2 m_z\right],$$

з урахуванням обмотувального коефіцієнта

$$P_{ст\nu} = p_{1,0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^\beta \nu^\beta a^2_\nu\left[k_{да}\left(B_{a1}\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 m_a + \right.$$

$$\left. + k_{дz}\left(B_{zср1}\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 m_z\right] = p_{1,0/50}\left(\frac{f}{50}\right)^\beta \nu^\beta a^2_\nu\left(\frac{k_{об\nu}}{\nu k_{об1}}\right)^2 \times$$

$$\times (k_{да}B^2_{a1}m_a + k_{дz}B^2_{zср1}m_z).$$

З урахуванням (8)

$$P_{ст\nu} = P_{ст1}\left(\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 \nu^\beta a^2_\nu,$$

або

$$P_{ст\nu} = P_{ст1}\left(\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 \nu^{\beta-2}(1{,}155\sin\nu 60°)^2.$$

Необхідність введення у формулу втрат у сталі обмотувального коефіцієнта $k_{об1}$ пов'язана з тим, що реальний двигун вже має цей обмотувальний коефіцієнт, тому необхідно спочатку привести його (і відповідні формули втрат) до умовного двигуна, що має $k_{об1} = 1$, тобто до двигуна з зосередженою діаметральною обмоткою, а потім вже вводити розрахункові обмоткові коефіцієнти по ВГ.

При використанні сталі 2312 β = 1,4, тоді

$$P_{ст\nu} = 1{,}334 P_{ст1}\left(\frac{k_{об\nu}}{k_{об1}}\right)^2 \nu^{-0,6}\sin^2\nu 60°.$$

Згідно з наведеним алгоритмом був розрахований двигун з номінальною потужністю 40 кВт, напругою 440 В, частотою 60 Гц. В результаті розрахунку були отримані такі дані:

$P_{e1,1}$ = 1550 Вт, $P_{e2,1}$ = 940 Вт, $P_{ст1}$ = 955 Вт,
к.к.д. η = 0,96.

Тепловий розрахунок за основною гармонікою дав такі результати:

– перевищення температури обмотки статора над температурою довкілля $\Delta\vartheta_1$ = 93,5 °С,

– перевищення температури осердя статора над температурою повітря всередині двигуна $\Delta\vartheta_{пов1}$ = 19 °С,

При розрахунку додаткових втрат від ВГ до уваги брали додаткові втрати від усіх непарних гармонік з 3-ї по 19-ту.

Розрахунки велися для значень обмотувальних коефіцієнтів 0,88, 0,9, 0,92, 0,94. Результати розрахунку наведено у табл. 1.

За наслідками розрахунку табл.1 було розраховано к.к.д. Результати розрахунку зведено до таблиці 2.

Таблиця 1

Таблиця втрат від ВГ у двигуні від величини

$k_{об1}$	з прямокутною напругою вида 2		з прямокутною напругою вида 1		Загальні втрати від ВГ	
	втрати в міді	втрати в сталі	втрати в міді	втрати в сталі	з прямокутною напругою вида 2	з прямокутною напругою вида 1
0,88	9,68	93,66	34,1	185,9	103,3 (2,82 %)	220 (6 %)
0,9	17,4	227	55,8	293	**244,4 (6,67 %)**	348.8 (9,52 %)
0,92	6,19	79,15	67,2	158,7	85,34 (2,33 %)	225,9 (6,17 %)
0,94	14,14	172,4	116,9	366	186,5 (5,09 %)	**483 (13,2 %)**

Таблиця 2

Значення к.к.д. для напруг живлення виду 1 і виду 2

$k_{об1}$	напруга виду 2	напруга виду 1
0,88	0.914	0.911
0,9	0.91	0.908
0,92	0.914	0.911
0,94	0.911	0.905

Таблиця 3

Перевищення температури окремих частин двигуна

Перевищення температури	За основної гармоніки	за рахунок додаткового розігріву від ВГ
– сердечника статора над температурою повітря усередині двигателя, °С	19	22,6
– обмотки статора над температурою повітря усередині машини, °С	23,9	25,8
– повітря всередині машини над температурою навколишнього середовища, °С	69,6	70,6
– обмотки статора над температурою навколишнього середовища, °С	93,5	96,4

К.к.д. без урахування втрат від ВГ згідно з розрахунком двигуна дорівнює η = 0,916.

При цьому найбільші втрати від ВГ показав варіант при $k_{об}$ = 0,9. Додаткові втрати в обмотках збільшились на 1,1 % і становили 17,4 Вт, у сталі – на 23,8 % (227 Вт). К.к.д. зменшився до 0,91.

Результати теплового розрахунку, який вівся для найгіршого випадку, тобто при $k_{об}$ = 0,9 і напрузі живлення виду 2 наведено в табл. 3.

Висновки. Як показують розрахунки, найбільш несприятливим з погляду додаткових втрат від ВГ є варіант при обмотувальному коефіцієнті, що дорівнює 0,9. Але навіть у цьому випадку енергетичні показники двигуна погіршуються лише трохи: к.к.д. зменшився всього на 0,6 %, додатковий розігрів обмотки статора над температурою навколишнього середовища склав 2,9 °С, сердечника статора над температурою повітря всередині двигуна, 3,6 °С, що не може викликати будь-якого помітного порушення теплового режиму двигуна в цілому. Тому запропонований варіант регулювання швидкості методом зміни частоти дозволить значно знизити втрати комутацій у ключах інвертора частотного перетворювача, відмовитися від складних і ненадійних систем рідинного і обмежитися повітряним охолодженням. В цілому наведена методика розрахунку додаткових втрат може бути також використана і для аналізу енергетичних показників асинхронних двигунів з довільною формою напруги живлення а також для двигунів з фазним ротором.

Список літератури:

1. Голощапов С. С., Іщенко І. М., Козловський М. І. Аналіз енергетичних характеристик асинхронного двигуна при живленні прямокутною напругою: Вісник Херсонської морської державної академії МДА № 2(21) 2019 р С. 98–107.

2. Маляр В. С. Теоретичні основи електротехніки. Електричні кола: навч. посібник. Львів : Львівська політехніка, 2012. 312 с.

3. Бєлікова Л. Я., Шевченко В. П. Електричні машини: навч. посібник. Одеса, 2012. 480 с.

Goloschapov S. S., Ivanov A. A., Doshchenko G. G., Nagovskiy D. A. OPTIMIZATION OF THE FORM OF THE SUPPLY VOLTAGE OF AN INDUCTION MOTOR WITH FREQUENCY CONTROL

Three-phase asynchronous motor (AD) is the main type of electric motor used in industry and on ships of the marine fleet. Three-phase ADs have gained wide application due to their simplicity of design, ease of maintenance and high reliability of operation. The use of an asynchronous drive in ship hoisting mechanisms, pumps and fans with adjustable performance involves smooth speed regulation in a wide range. Currently, frequency regulation is mainly used – the most smooth and economical way to regulate the speed of asynchronous squirrel-cage motors, which provides a wide range of regulation (up to 12:1 and above) with fairly rigid mechanical characteristics. However, the use of this method requires special frequency converters, the type of which determines the frequency control scheme of the AC. In modern drives, of all types of methods for obtaining a sinusoidal current, the method with an intermediate DC link and an inverter controlled by a pulse-width modulator (PWM) is mainly used. To obtain a sinusoidal shape of the current curve, it is necessary to switch the inverter keys quite often (approximately 10 times per half-period), which leads to significant switching losses in the keys and their heating, to reduce which liquid cooling systems are used. The latter sharply reduces operational reliability and complicates the design of the inverter. In the present article, the operational indicators of the AD when powered by a rectangular voltage of the meander type are investigated, the formation of which provides for an order of magnitude reduction in switching losses in the inverter and the rejection of liquid cooling systems. Based on the analysis of additional losses in the windings and steel of the motor from higher harmonics that arise when powered by a non-sinusoidal current, the energy indicators of the AD are determined for the described power supply methods and the influence of the winding coefficient values on these indicators. According to the calculation method presented, it has been proven that even in the worst case scenario, additional losses from higher harmonics constitute a small fraction of the total engine losses and cannot significantly affect its energy efficiency and thermal regime.

Key words: *induction motor, harmonic, shortening factor, switching losses, winding factor.*

УДК 629.56/.5.064:681.51:621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/08

Хлопенко М. Я.
Херсонська державна морська академія

МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В АДАПТИВНІЙ ЧАСТОТНО КЕРОВАНІЙ СИСТЕМІ З АСИНХРОННИМ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ СУДНОВОГО ПІДРУЛЮЮЧОГО ПРИСТРОЮ

У статті розв'язана проблема моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системи з еталонною моделлю та частотно керованим асинхронним електродвигуном (АД) суднового підрулюючого пристрою зі спостерігачем стану та параметричною невизначеністю осьових моментів інерції гребного гвинта фіксованого кроку з приєднаною масою води до його лопатей, а також деталей рухомих мас (вхідного і вихідного валів конічної зубчастої передачі редуктора, муфти та упорного диску підшипника), що з'єднують гвинт із ротором електродвигуна. Математичний опис об'єкта та еталонної моделі надається у просторі станів. Моменти інерції рухомих мас деталей, що обертаються навколо нерухомих осей вхідного та вихідного валів конічної передачі приводяться до осі обертання ротора електродвигуна. За фазові координати приймаються крутний момент, кутова швидкість ротора двигуна та швидкість обертання магнітного поля відносно статора. Кожна з цих координат подається в безрозмірній формі. Стан об'єкта описується трьома лінійними диференціальними рівняннями у нормальній формі Коші. Ці рівняння об'єкта були представлені в канонічній керованій та спостережуваній формах Луенбергера у вигляді матриць третього порядку. При цьому елементи матриці канонічної еталонної моделі приймалися рівними відповідним елементам матриці номінального об'єкта і в процесі функціювання системи залишалися незмінними. Вплив зазорів зубчастої передачі на поведінку системи не враховувався. Для оцінки безрозмірних координат об'єкта використовувався спостерігач стану, подібний спостерігачу Луенбергера. Адаптивна структурна схема моделювання перехідних процесів у системі будувалася в пакеті Simulink. Для забезпечення збіжності фазових координат об'єкта і моделі використовувався прямий метод Ляпунова. За цим методом знайдено алгоритм адаптації та на його основі встановлено зворотний зв'язок та побудовано адаптивний регулятор, що з'єднує вихід системи зі входом об'єкта. Встановлено функціональний зв'язок кутової швидкості ротора АД з вихідним сигналом швидкості блока еталонної моделі, а також крутного моменту і кутової швидкості магнітного поля із кутовою швидкістю цього ротора, що пов'язана із вказаним сигналом блока еталонної моделі. Удосконалено математичну модель, розроблено методологію та схему моделювання адаптивної системи частотного керування асинхронного електропривода з невизначеними осьовими моментами інерції мас, що обертаються навколо нерухомих осей валів конічної зубчастої передачі, та спостерігачем для визначення оцінок фазових координат об'єкта. Результати моделювання перехідних процесів кутової швидкості ротора, крутного моменту та кутової швидкості обертання магнітного поля відносно статора при пуску АД підтверджують стабілізацію цих параметрів на усталеному режимі та збіг їх оцінок до параметрів еталонної моделі з високою точністю.

Ключові слова: *судновий підрулюючий пристрій, система адаптивна частотно керована, електродвигун асинхронний, пускові перехідні процеси.*

Постановка проблеми. Суднові підрулюючи пристрої (СПП) тунельного типу з асинхронним електродвигуном (АД), зубчастою конічною передачею та гвинтом фіксованого кроку є найбільш відповідальними пристроями, що забезпечують утримання судна при русі за заданою фазовою траєкторією. Тому до ефективності їх роботи пред'являються підвищені вимоги щодо відхилення фазових координат судна від цієї траєкторії.

Сучасні СПП не в повній мірі задовольняють цим вимогам у зв'язку з відхиленнями робочих параметрів АД від номінальних значень. Ці відхилення параметрів обумовлені виникаючими при експлуатації пристрою різного виду параметричних невизначеностей. До них відносяться осьовий момент інерції гвинта з приєднаним моментом інерції маси води, що досягає 25…40 % від моменту інерції матеріалу гвинта, а також невідомі постійні осьові моменти інерції конічної зубчастої передачі з горизонтальним та вертикальним валами, муфти з'єднання ротора АД з вертикальним валом та диску упорного підшип-

ника, що не перевищують 25…35 % від осьового моменту інерції ротора двигуна.

Особливо гостро проблема впливу невизначеностей моментів інерції гвинта з приєднаною масою води, зубчастої передачі, її валів, муфти та упорного диску на якість функціювання АД проявляється на пусковому режимі роботи, як найбільш тяжким серед інших режимів його експлуатації.

У цьому режимі вказана параметрична невизначеність породжує такі невизначеності АД, як крутний момент, кутова швидкість ротора та кутова швидкість магнітного поля відносно статора при функціюванні СПП. Тому проблема компенсації параметричної невизначеності частотно регульованого підрулюючого пристрою на пусковому режимі роботи АД є актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш важливішими теоріями, які можуть бути застосовані для вирішення проблеми компенсації параметричної невизначеності, є робастне та адаптивне керування. Основна відмінність робастної системи керування від адаптивної полягає у тому, що в неї не використовується інформація про невизначеність об'єкта в процесі його експлуатації. В адаптивній системі керування з еталонною моделлю, що розглядається, та спостерігачем стану інформація про стан об'єкта присутня і компенсується при його експлуатації за рахунок автоматичної настройці регулятора.

В даної роботі для моделювання адаптивної самонастроювальної автоматичної системи керування з еталонною моделлю служили метод простору стану [1, с. 6] та другий метод функцій Ляпунова. Задача керування полягала у виконанні двох умов. Перша з них заключалася у компенсації параметричної невизначеності осьових моментів інерції гвинта з приєднаною масою води та деталей, що приводяться до руху електродвигуном, при забезпеченні збіжності оцінок фазових координат об'єкта і еталонної моделі на нескінченому відрізку часу, а друга – в забезпеченні слідкування вихідної координати об'єкта за виходом еталонної моделі.

За виконанням першої з цих умов та із застосуванням методу Ляпунова знайдено, як і в роботі [2, с. 262], алгоритм адаптації. На його основі встановлений зворотний функціональний зв'язок між виходом об'єкта та входом системи, що замикається через адаптивний процес, і, таким чином, отримано адаптивний регулятор. Виконання другої умови здійснювалося в процесі спостереження за кривими перехідних процесів фазових координат еталонної моделі та оцінок фазових координат об'єкта спостерігачем [2, с. 262].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз ефективності досліджень проводився за збіжністю отриманих кривих цих координат. Однак у цій роботі залишилася невирішеною проблема встановлення функціонального зв'язку фазових координат об'єкта та їх оцінок спостерігачем з вихідними координатами еталонної моделі, яка розв'язується у даній роботі. Також усуваються деякі недоліки, які були допущені в роботі, та уточнюються математична модель, схема моделювання та розрахунки перехідних процесів.

Удосконалення системи керування комплексом підрулюючих пристроїв, яка автоматично контролює положення судна в заданому положенні при хвилюванні моря, а також рухом на ходу за заданим курсом, розглянуто в роботі [3, с. 45]. В ній запропоновано новий практичний метод побудови систем керування цим комплексом, а в роботі [4, с. 39] – схему оптимізації математичної моделі зазначеного комплексу. Схема моделі основана на застосуванні електронних регуляторів в системах автоматичного регулювання і управління підрулюючим пристроєм. Однак отримані у цих роботах результати відносяться до суден спеціального призначення, обладнання яких автоматичною системою регулювання комплексу підрулюючих пристроїв дозволяє забезпечити утримання суден в режимі динамічного позиціонування при активному використанні суднових рушіїв.

Проблема адаптивного керування судновим пропульсивним комплексом із синхронним електродвигуном з постійними магнітами обговорюється в роботі [5, с. 1]. В ній на базі представленої теорії стабілізації скорості електродвигуна розраховано та спроектовано оптимальний адаптивний контролер. Відзначається, що запропонована система забезпечує хорошу реакцію на зовнішній обурювальний вплив і не потребує складних корегувань.

Багато робіт зарубіжних вчених присвячено моделюванню адаптивного керування асинхронних електродвигунів із параметричною невизначеністю. Серед них слід відзначити роботу [6, с. 3193], в якій розглядається модель еталонної адаптивної системи для скалярного керування асинхронного двигуна без застосування датчиків. Однак її використання в системах керування підрулюючим пристроєм обмежується відомими труднощами.

Таким чином, короткий огляд останніх зарубіжних та вітчизняних робіт з адаптивного керування

АД дозволяє встановити, що проблема керування судновим підрулюючим пристроєм з гребним гвинтом фіксованого кроку, спостерігачем стану оцінок фазових координат та з параметричною невизначеністю об'єкта є незавершеним дослідженням. Вона в нелінійній постановці відсутня, а в лінійній постановці розглядається вперше.

Постановка завдання. Ціллю роботи є моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системі з еталонною моделлю та частотно керованим АД суднового підрулюючого пристрою з гребним гвинтом фіксованого кроку і спостерігачем стану, який призначений для визначення оцінок фазових координат об'єкта, що утворюють сумісно з вихідними сигналами еталонної моделі зворотний зв'язок керування адаптивним процесом.

Виклад основного матеріалу. Математичний опис об'єкта і еталонної моделі надається в просторі станів. Асинхронний електропривод, як об'єкт керування, описується за аналогією з роботою [2, с. 32] трьома лінійними диференціальними рівняннями в нормальній формі Коші:

$$\dot{x}_1 = \frac{M_n}{J\omega_n}x_2 - \frac{M_n}{J\omega_n}x_1;$$
$$\dot{x}_2 = 2z_p M_{cr}\left(\frac{\omega_{0n}}{M_n}x_3 - \frac{1}{\beta}x_2 - \frac{\omega_n}{M_n}x_1\right); \qquad (1)$$
$$\dot{x}_3 = -\frac{1}{T_{fc}}x_3 + \frac{K_{fc}}{T_{fc}K_{fcn}}u.$$

де

$$\beta = \frac{2M_{cr}}{\omega_{0n}s_{cr}}; \quad T_e = \frac{1}{z_p\omega_{0n}s_{cr}};$$

$x_1 = \omega/\omega_n$; $x_2 = M/M_n$; $x_3 = \omega_0/\omega_{0n}$ – безрозмірні фазові координати; $u = U/U_n$ – безрозмірний керуючий вплив; ω, M, ω_0 – відповідно кутова швидкість ротора, крутний момент АД та кутова швидкість магнітного поля, що обертається відносно статора; U – керуючий вплив; M_{cr}, s_{cr} – відповідно критичний момент та критичне ковзання двигуна; β – жорсткість лінеаризованої механічної характеристики АД; T_e – еквівалентна електромагнітна постійна часу двигуна; K_{fc}, T_{fc} – відповідно коефіцієнт передачі та постійна часу частотного перетворювача; z_p – число пар полюсів; J – приведений до осі ротора двигуна момент інерції усіх мас, що обертаються двигуном; n – індекс номінальних величин. Точка над кожною безрозмірною фазовою координатою означає похідну за часом.

Другій доданок праворуч в першій формулі системи рівнянь (1) отримано із рівності моментів навантажень за квадратичним та лінійним законами від кутової швидкості ω, що діють на ротор при обертанні гребного гвинта, причому коефіцієнти при цих законах навантаження визначаються за номінальними значеннями крутного моменту та кутової швидкості АД.

Записану систему рівнянь (1) представимо в матричній формі:

$$\dot{x} = Ax + Bu;$$
$$y = Cx, \qquad (2)$$

де

$$A = \begin{bmatrix} -a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ -a_{21} & -a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ b \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$a_{11} = \frac{M_n}{J\omega_n}; \quad a_{12} = \frac{M_n}{J\omega_n}; \quad a_{13} = 0;$$

$$a_{21} = 2z_p M_{cr}\frac{\omega_n}{M_n}; \; a_{22} = 2z_p\frac{M_{cr}}{\beta}; \; a_{23} = 2z_p M_{cr}\frac{\omega_{0n}}{M_n};$$

$$a_{31} = a_{32} = 0; \quad a_{33} = \frac{1}{T_{fc}}; \quad b = \frac{K_{fc}}{T_{fc}K_{fcn}} = \frac{1}{T_{fc}},$$

x – вектор фазових координат x_1, x_2, x_3; y – вектор виходу об'єкта.

Перетворимо систему рівнянь (2) об'єкта до канонічної керованої форми Луенбергера (3) [1, с. 65]:

$$\dot{v} = \tilde{A}v + \tilde{B}u;$$
$$y = \tilde{C}v, \qquad (3)$$

де

$$v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ v_3 \end{bmatrix}; \quad \tilde{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}; \quad \tilde{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix};$$

$$\tilde{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$$

$$a_1 = a_{11} + a_{22} + a_{33};$$

$$a_2 = a_{11}a_{22} + a_{21}a_{12} + a_{11}a_{33} + a_{22}a_{33};$$

$$a_3 = a_{33}(a_{11}a_{22} + a_{12}a_{21}).$$

Тут фазовий вектор v відрізняється від вектора фазових координат об'єкта xта пов'язаний з ним матрицею подібності [1, с. 61].

Для еталонної моделі значення параметрів a_1, a_2, a_3 вважаємо рівними відповідним номінальним значенням параметрів об'єкта. З урахуванням цього та за властивістю матриць запишемо рівняння еталонної моделі в канонічній спосте-

режуваній формі Луенбергера [1, с. 67] таким чином:

$$\dot{v}_m = A_m v_m + B_m g; \quad y_m = C_m v_m, \tag{4}$$

де

$$v_m = \begin{bmatrix} v_{1m} \\ v_{2m} \\ v_{3m} \end{bmatrix}; \quad A_m = \begin{bmatrix} -a_{1n} & 1 & 0 \\ -a_{2n} & 0 & 1 \\ -a_{3n} & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad C_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$B_m = B;$$

m – індекс моделі; y_m – вихід моделі; g – керуючий вплив.

Тут вектор v_m пов'язаний з фазовим вектором об'єкта x теж матрицею подібності, як і в попередньому випадку.

Вектор похибки слідкування об'єкта за еталонною моделлю запишемо у вигляді

$$e(t) = \hat{v}(t) - v_{\mathrm{m}}(t), \tag{5}$$

де $\hat{v}(t) = \begin{bmatrix} \hat{v}_1(t) & \hat{v}_2(t) & \hat{v}_3(t) \end{bmatrix}^T$ – оцінка фазового вектора об'єкта (3) спостерігачем стану.

Складемо цільову умову

$$\lim_{t\to\infty} e(t) = 0. \tag{6}$$

Запишемо рівняння оцінки параметризованого фазового вектора об'єкта, яке подібне спостерігачу Луенбергера, як і в роботі [2, с. 264]:

$$\hat{v} = (pI - A_m)^{-1}\varepsilon y + (pI - A_m)^{-1} u, \tag{7}$$

де $\varepsilon = \begin{bmatrix} a_{1n} - a_1 \\ a_{2n} - a_2 \\ a_{3n} - a_3 \end{bmatrix}$ – матриця параметричної неузгодженості між параметрами моделі та об'єкта; $y = v_1$ – вихід об'єкта.

Структура закону для формування керування $u(t)$ знаходилася за допомогою другого методу Ляпунова, як і в роботі [2, с. 264]:

$$u(t) = \hat{\Theta}^T \hat{v} + g = \hat{\theta}_1 \hat{v}_1 + \hat{q}_2 \hat{v}_2 + \hat{q}_3 \hat{v}_3 + g, \tag{8}$$

де $\hat{\Theta}^T = (\hat{\theta}_1 \quad \hat{\theta}_2 \quad \hat{\theta}_3)$ – оцінка вектора параметричних неузгоджень, що визначається за відомим так званим стандартним алгоритмом адаптації

$$\dot{\hat{\Theta}} = \gamma \hat{v} K^T P e, \tag{9}$$

де γ – коефіцієнт адаптації; $K = [0 \;\; 0 \;\; 1]^T$.

В записаній формулі (8) матриця P визначається за рівнянням Ляпунова (10):

$$A_m^T P + P A_m = -Q, \tag{10}$$

де Q – довільна симетрична матриця.

Формула (9) дозволяє визначити за коренями рівняння (10) квадратної матриці P наступні вирази для координат $\hat{\theta}_1$, $\hat{\theta}_2$, $\hat{\theta}_3$ вектора $\hat{\Theta}$:

$$\dot{\hat{\theta}}_1 = q\hat{v}_1; \quad \dot{\hat{\theta}}_2 = q\hat{v}_2; \quad \dot{\hat{\theta}}_3 = q\hat{v}_3, \tag{11}$$

де

$$q = \gamma(p_{31}e_1 + p_{32}e_2 + p_{33}e_3);$$

p_{31}, p_{32}, p_{33} – корені рівняння Ляпунова (10), що розташовані в третьому рядку квадратної матриці P; e_1, e_2, e_3 – координати вектора похибки (5) слідкування об'єкта за еталонною моделлю.

Таким чином, запропоновано математичний апарат (1)–(11) для моделювання в пакеті Simulink автоматичної самонастроювальної системи керування з еталонною моделлю частотно керованого асинхронного електроприводу суднового ПП тунельного типу з параметричною невизначеністю осьових моментів інерції гребного гвинта фіксованого кроку з приєднаною масою води, валів, муфти та зубчастої передачі. Структурна схема автоматичної системи моделювання в цьому пакеті представлена на рис. 1. Вона складається із блоків еталонної моделі 1, об'єкта 2, спостерігача 3, 4, трьох блоків 5–7 Demux, трьох блоків Mux 8–10, віртуальних осцилографів 11–14 для графічного зображення безрозмірних фазових координат кутової швидкості x_1 (поз. 11), крутного моменту x_2 (поз. 12), кутової швидкості магнітного поля x_3 (поз. 13) та їх оцінок $\hat{x}_1$, $\hat{x}_2$, $\hat{x}_3$ спостерігачем стану об'єкта, а також похибок (поз. 14) збіжності цих координат до їх оцінок при слідкуванні об'єкта за еталонною моделлю, блоків підсилення, декілька суматорів та блоків множення, вхідного одиничного ступінчастого сигналу, аперіодичної ланки, розташованої за цим сигналом, ліній зв'язків та адаптивного регулятора АР, що утворює від'ємний зворотний зв'язок між виходом системи (сигналами v_1, v_2, v_3 та їх оцінками $\hat{v}_1$, $\hat{v}_2$, $\hat{v}_3$) та входом в об'єкт (сигнал, рівний скалярному добутку $\hat{\Theta}\hat{v}$ векторів $\hat{\Theta}$ та $\hat{v}$).

Вихідні сигнали v_1, v_2, v_3 еталонної моделі, як було замічено вище, не співпадають з фазовими координатами об'єкта x_1, x_2, x_3. Зв'язок між цими сигналами та фазовими координатами об'єкта визначається за матрицею подібності [1 с. 61, 67] або за формулою Аккермана [1 с. 71]. Зворотна матриця цієї матриці подібності, що встановляє зв'язок фазових координат об'єкта із вихідними сигналами еталонної моделі, дозволяє виразити

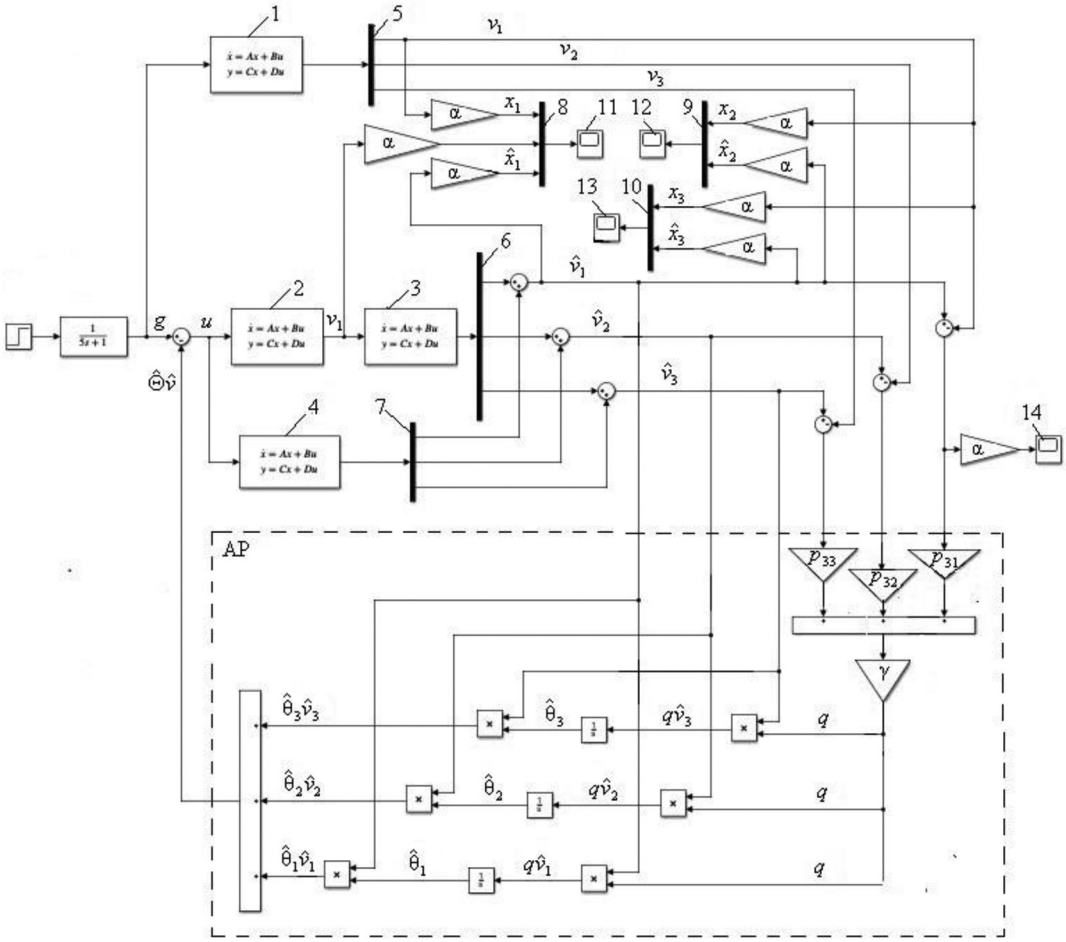


Рис. 1. Структурна схема моделювання самонастроювальної системи із еталонною моделлю та параметричною невизначеністю:

кожну координату об'єкта x_1, x_2, x_3 із вихідними сигналами еталонної моделі v_1, v_2, v_3. Однак ця процедура потребує громіздких математичних викладок. Тому в даній роботі за зворотною матрицею матриці подібності розраховується тільки одна фазова координата x_1 за формулою

$$x_1 = \alpha v_1. \tag{12}$$

Невідомий коефіцієнт α в цій формулі визначається за елементом зворотної матриці, який знаходиться на перетину першій строки та першого стовпця. Іншими двома дуже малими елементами, що знаходяться в першій строчці, нехтуємо, оскільки вони не впливають на результати обчислень координати x_1.

Для визначення залежності фазової координати x_2 від координати x_1 скористаємося формулою (13):

$$M_p\omega_p = M\omega\eta, \tag{13}$$

де M_p, ω_p – навантаження та кутова швидкість гребного гвинта; M, ω – крутний момент та кутова швидкість АД; η – ККД СПП.

Записана формула (13) визначає передачу ефективної потужності від АД до гребного гвинта.

При автоматичному частотному керуванні плавним пуском двигуна за заданим адаптивним алгоритмом та побудованим на його основі зворотним функціональним зв'язком будуть забезпечені достатньо малі прирощення ΔM крутного моменту M та Δω кутової швидкості ω при неперервній зміні навантаження M_p на величину ΔM_p та швидкості ω_p на величину $\Delta\omega_p$. Тому в кожний момент часу формулу (13) можно представити у вигляді (14):

$$(M_p + \Delta M_p)\cdot(\omega_p + \Delta\omega_p) = \\ = (M + \Delta M)\cdot(\omega + \Delta\omega)\eta, \tag{14}$$

де

$$M_p = jM; \quad \Delta M_p = j\Delta M; \\ \omega = j\omega_p; \quad \Delta\omega = j\Delta\omega_p; \tag{15}$$

j – передавальне число конічної передачі редуктора.

Розкривши дужки в обох частинах рівності (14) та нехтуючи достатньо малими квадратич-

ними членами, отримаємо з урахуванням (15) таке рівняння:

$$(M\Delta\omega + \omega\Delta M)(1 - \eta) = 0,$$

або після скорочень на величину$(1 - \eta) > 0$

$$M\Delta\omega + \omega\Delta M = 0. \qquad (16)$$

З рівняння (16) при достатньо малих відхиленнях керованої робочої точки від лінійного участку жорсткої механічної характеристики електродвигуна будемо мати:

$$\frac{\Delta M}{M_n} = -\frac{\Delta\omega}{\omega_n} \quad \text{або} \quad \frac{M_n - M}{M_n} = \frac{\omega_n - \omega}{\omega_n},$$

що випливає з подоби прямокутних трикутників з гіпотенузами із загальною вершиною в номінальній точці механічної характеристики.

Звідси знаходимо:

$$\frac{M}{M_n} = \frac{\omega}{\omega_n},$$

або

$$x_2 = x_1 = \alpha v_1. \qquad (17)$$

Зв'язок фазової координати $x_3 = \frac{\omega_0}{\omega_{0n}}$ із координатою x_1, що визначається за формулою (12), можна дістати, якщо поділити чисельник ω_0 на знаменник ω_{0n} записаного виразу для x_3 на величину $(1 - s) \neq 0$ (s – відносне ковзання двигуна). Тоді будемо мати:

$$x_3 = x_1 = \alpha v_1. \qquad (18)$$

Похибка збіжностей оцінок фазових координат до еталонної моделі визначається за формулою

$$\varepsilon = \alpha(\hat{v}_1 - v_1) \qquad (19)$$

та неперервно відображається у вигляді графіка віртуальним осцилографом (див. рис. 1, поз. 14).

Таким чином, отримані залежності (12), (17)–(19) дозволяють при моделюванні в пакеті Simulink забезпечити неперервну візуалізацію безрозмірних величин кутових швидкостей ротора магнітного поля, моменту, їх оцінок та похибок збіжності цих оцінок до еталонної моделі при адаптивному частотному керуванням процесом пуску АД.

На прикладі асинхронного електропривода суднового підрулюючого пристрою сучасного контейнеровоза з асинхронним двигуном HLA9 632-64Y потужністю 1200 кВт, номінальним крутним моментом 9653,9 Н · м, критичним моментом 24134,7 Н · м, критичним ковзанням 0,05411 та моментом інерції ротора 64 кг · м^2, частотою обертання 124,302 рад/с, напругою 440 В на клемах статора, зубчастою передачею з передавальним числом 5,3, гребним гвинтом з моментом інерції 17 кг · м^2 та приєднаним невизначеним моментом інерції води 6,8 кг · м^2 та іншими параметричними невизначеностями з приведеним до осі ротора АД сумарним моментом інерції 0.82 кг · м^2 (з них 0,06 кг · м^2 відносяться до вертикального валу); параметрами перетворювача частоти T_{fc} = 1/240 с, K_{fc} = 12,57 рад/(В·с); елементом матриці подібності $\alpha = 5{,}438 \cdot 10^5$; коренями рівняння Ляпунова $p_{31} = 0$, $p_{32} = 0{,}0141 \cdot 10^5$; $p_{33} = 0{,}0141 \cdot 10^5$; коефіцієнтом адаптації $\gamma = 10$ та постійною часу префільтра 5 с розраховані та побудовані криві перехідних процесів кутових швидкостей ротора АД, магнітного поля, що обертається навколо статора, крутного моменту, їх оцінок та збіжностей цих кривих та оцінок до відповідних кривих еталонної моделі (рис. 2–4), причому похибка збіжності кривих не перевищує 0,55 %.

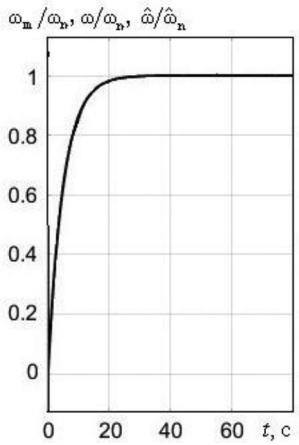


Рис. 2. Залежність кутових швидкостей моделі ω_m, об'єкта ω та оцінки $\hat{\omega}$ при пуску двигуна

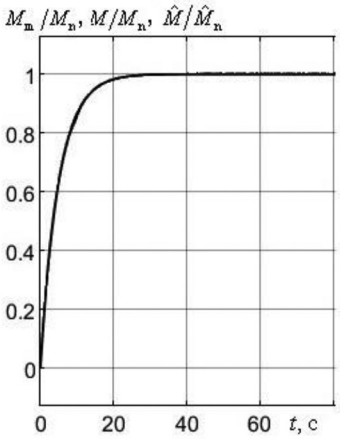


Рис. 3. Залежність крутних моментів моделі M_m, об'єкта M та оцінки $\widehat{M}$ при пуску двигуна

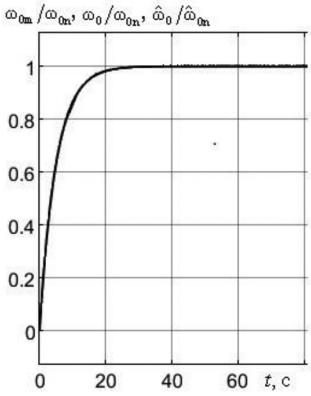


Рис. 4. Залежність кутових швидкостей магнітного поля моделі ω_{0m}, об'єкта ω_0 та оцінки $\hat{\omega}_0$ при пуску двигуна

Висновки.

1. Удосконалено математичну модель у просторі стану та побудовано структурну схему моделювання перехідних процесів в адаптивній самонастроювальній системі з еталонною моделлю та частотно керованим АД суднового підрулюючого пристрою зі спостерігачем стану та параметричною невизначеністю осевих моментів інерції гребного гвинта та деталей рухомих мас, що з'єднують гвинт із вхідним горизонтальним валом редуктора з конічною зубчастою передачею, а вихідний вертикальний вал – із муфтою, що жорстко з'єднана з ротором асинхронного електродвигуна.

2. Результати моделювання перехідних процесів кутової швидкості ротора, крутного моменту та магнітного поля, що обертається навколо статора, при пуску двигуна підтверджують високу точність стабілізації цих параметрів та збіг їх оцінок до параметрів еталонної моделі з похибкою, що не перевищує 0,55 % на усталеному режимі.

Список літератури:

1. Хлопенко М. Я., Білюк І. С., Шевченко В. В. Оптимальне керування об'єктами: навч. посіб. Миколаїв : НУК, 2013. 172 с.

2. Хлопенко М. Я. Моделювання адаптивної системи з еталонною моделлю та частотно керованим асинхронним електродвигуном суднового підрулюючого пристрою. Зб. матеріалів XVI міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (MINTT-2024)» (Одеса, 29–31 травня 2024 р.). Одеса, 2024. С. 262–265.

3. Будашко В. В., Онищенко О. А. Удосконалення системи управління підрулюючим пристроєм комбінованого пропульсивного комплексу. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2014. № 38(1081). С. 45–51.

4. Юшков Є. О. Моделювання режимів роботи суднової енергетичної установки комбінованого пропульсивного комплексу. Електротехніка і електромеханіка. 2016. № 6. С. 39–43. DOI: 10.20998/2074-272X. 2016.6.07

5. Zwierzewicz Z., Tarnapowicz D., Nerc A. Adaptive PMSM Control of Ship Electric Propulsion with Energy-Saving Features. *Energies*. 2024. 17. 2178. P. 1–16. URL: https://doi.org/10.3390/en17092178

6. Prakash R. B. R., Srinivasa Varma P., Pandian A., Prasad Rao K.P. Model Reference Adaptive System (MRAS) Technique for Sensorless Scalar Control of Induction Motor. *International Journal of Scientific & Technology Research*. 2020. Vol. 9. issue 03. P. 3193–3198.URL: https://www.ijstr.org>final-print>mar2020.

Khlopenko N. J. MODELING OF TRANSIENT PROCESSES IN AN ADAPTIVE FREQUENCY-CONTROLLED SYSTEM WITH AN ASYNCHRONOUS ELECTRIC DRIVE OF A SHIP'S THRUSTER

The problem of transient processes modeling in an adaptive self-adjusting system with a reference model and a frequency-controlled asynchronous electric motor (AM) of a ship's thruster with a state observer and parametric uncertainty of the axial moments of inertia of a fixed-pitch propeller with an attached mass of water to its blades, as well as parts of moving masses (input and output shafts of the bevel gear of the gearbox, clutch and thrust disk of the bearing) connecting the propeller with the rotor of the electric motor, was solved in this article. The mathematical description of the object and the reference model is provided in the state space. The moments of inertia of the moving masses of the parts rotating around the fixed axes of the input and output shafts of the bevel gear are reduced to the axis of rotation of the electric mot or rotor. The torque, angular velocity of the motor's rotor and the rotation speed of the magnetic field relative to the stator are taken as phase coordinates. Each of these coordinates is represented in dimensionless form. The state of the object is described by three linear differential equations in Cauchy normal form. These equations of the object were presented in the canonical controlled and observed Luenberger's form as third-order matrices. In this case, the matrix elements of the canonical reference model were taken to be equal to the corresponding elements of the nominal object's matrix, and remain unchanged during the system operation. The impact of gear clearances on the system behavior is not taken into account. A state observer similar to the Luenberger's

observer was used to estimate the dimensionless coordinates of the object. An adaptive structural diagram for simulating of the transient processes in the system was built in the Simulink package. To ensure convergence of the phase coordinates of the object and the model, the direct Lyapunov method was used. Using this method, an adaptation algorithm was found and, on its basis, a feedback was established and an adaptive controller, that connects the system output with the object input, was built. A functional relationship between the angular velocity of the AM rotor and the output signal velocity of the reference model block, as well as the torque and angular velocity of the magnetic field from the angular velocity of this rotor associated with the specified signal of the reference model block, was established. The mathematical model was improved, a methodology and a modeling scheme for an adaptive frequency control system of an asynchronous electric drive with uncertain axial moments of inertia of rotating around fixed axes of the shafts of a bevel gear transmission masses, and an observer for determining the estimates of the phase coordinates of the object were developed. The mathematical model was improved, a methodology and a modeling scheme for an adaptive frequency control system of an asynchronous electric drive with uncertain axial moments of inertia of rotating masses and an observer for determining the estimates of the phase coordinates of the object were developed. The results of transient processes modeling of the angular velocity of the rotor, torque and angular velocity of the magnetic field relative to the stator during the start of the AM confirm the stabilization of these parameters in the steady-state mode and the coincidence of their estimates to the parameters of the reference model with high accuracy.

Key words: *ship's thruster, adaptive frequency-controlled system, asynchronous electric motor, starting transient processes.*

ПРИЛАДИ

УДК 621:611:617.3:531.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/09

Криницький П. К.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

СУЧАСНІ РІШЕННЯ В ВІДНОВЛЕННІ ФУНКЦІЇ КОЛІННОГО СУГЛОБУ У ЛЮДЕЙ З ТРАНСФЕМОРАЛЬНОЮ АМПУТАЦІЄЮ ТА НАПРЯМКИ ЇХ ОПТИМІЗАЦІЇ

На сьогодні внаслідок різних критичних випадків, зокрема військових дій в Україні, все більша кількість людей потребує операцій з ампутації кінцівок. Більшість з них відбувається через травмування або відрив кінцівок.

Особливо важливу роль в здоров'ї та самостійності людини відіграють нижні кінцівки. Їх робота підтримує серцево-судинну систему та опорно-руховий апарат. Тому, відновлення їх функціоналу є однією з пріорітетних при протезуванні. Трансфеморальна ампутація є одним із найскладніших випадків ампутації ноги. При протезуванні людей з такою ампутацією, основною задачею є відновлення функції колінного суглобу для забезпечення руху.

В даній галузі останні 100 років було розроблено та покращено велику кількість технічних рішень. Основну роль у цьому відіграли зарубіжні компанії.

В представленій роботі було виконано аналіз релевантних анатомічних та антропометричних параметрів, на які орієнтуються при розробці колінних механізмів для трансфеморальних протезів, а саме: ступені свободи, розмірні параметри ноги, вагові параметри ноги та етапи ходи людини.

Було розглянуто класифікацію колінних механізмів для трансфеморальних протезів. Дані механізми класифікують за кількістю осей та типом контролю руху суглобу. Проведено аналіз створених конструкцій одноосьових колінних механізмів. Основна їх кількість використовує ручні засоби фіксації або автоматичну фіксацію механізмом тертя, що діє під навантаженням. Була встановлена необхідність у наближенні параметрів швидкості та довжини кроку протезованої кінцівки до параметрів здорової кінцівки. Виконано огляд багатоосьових колінних механізмів. Було розглянуто як особливсті будови гіпер-стабілізованих колінних механізмів, вільно контрольованих колінних механізмів та механізмів з піднятим МЦШ. Також було розглянуто гідравлічні та пневматичні засоби стабілізації багатоосьових протезів. Встановлення необхідність в мінімізації ваги даної системи. Проведено огляд цифрових колінних суглобів та їх додаткового функціоналу. Для цифрових колінних протезів було встановлена необхідність в розробці додаткових алгоритмів для людей, що мають невиліковні дефекти ходи.

Ключові слова: *протезування, трансфеморальний, оптимізація, змінний демпфер, антропометричні параметри.*

Постановка проблеми. Через реалії сьогодення в нашому суспільстві з'являється все більше людей з ампутаціями. За останні 3 роки близько 50 000 людей в нашій країні зазнали втрату кінцівки [1]. Дана статистика буде продовжувати зростати навіть у післявоєнний час через велику кількість нерозірваних снарядів, що все ще будуть знаходитися в землі. Як наслідок, переважна більшість ампутацій виникає через травматичний характер ушкодження частини тіла, що може нести за собою пошкодження сусідніх органів. Серед всіх ампутацій одними з найгірших є трансфеморальні ампутації ноги, оскільки зникає велика, складна та дуже важлива частина опорно-рухового апарату. Відновлення функціональності ампутованої кінцівки в таких випадках є важливим для забезпечення здоров'я як серцево-судинної системи, так і для вцілілої частини опорно-рухового апарату. Особливою проблемою є відновлення функції колінного суглобу таким чином, щоб це не призводило до дискомфорту та подальших травмувань.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Людство має дуже довгу історію протезування та

велику кількість надбань у цій галузі, проте більшість із них були отримані в останні 100 років. Серед штучних колінних суглобів довгий час панувала проста одновісьова конструкція, доки з початком Другої світової війни не почалося масове виробництво протезів та пошук зручніших рішень. На даний момент провідними серед розробників штучного колінного суглобу є зарубіжні компанії: Embreis (Швеція), Ottobock (Німеччина), Akder Medical (Турція), Blatchford (Британія), Proteor USA (США), Össur та Ortho Active (Канада). Також, варто згадати про українську компанію Nertus, що також займається інноваціями в даній галузі.

Також, дослідженнями в даній сфері займається й численна кількість незалежних протезистів та науковців.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз найефективніших, на даний момент, штучних колінних механізмів для трансфеморальних протезів. Необхідно виконати оцінку їх сильних та слабких сторін зважаючи на ускладнення в наслідок ампутації, та визначити напрямки їх оптимізації.

Виклад основного матеріалу. Щоб на базовому рівні повторити рухову функцію втраченої кінцівки, при проєктуванні трансфеморального протезу необхідно включити в нього функціональну подобу колінного суглобу. Гомілко-стоповий суглоб відіграє хоч і важливу роль в забезпеченні контакту з поверхнею, але частіше за все при розробці протезу обмежуються забезпеченням функції амортизації та розподілу мас шляхом спеціального дизайну стопи. Саме тому, розробка оптимального, по своєму функціоналу, колінного протезу є куди важливішим, оскільки він є ключовим в забезпеченні комфорту руху.

Попередньо, щоб розуміти рішення, котрі приймаються для побудови протезів, необхідно ознайомитися з низкою анатомічних та антропометричних характеристик нижньої кінцівки людини.

Нога людини має 3 великі суглоби: кульшовий, колінний та гомілко-п'ятковий. Колінний має найменшу кількість ступенів свободи, а саме 2. При протезуванні наявність другого ступеню свободи ігнорується, оскільки той є дуже обмеженим та проявляється лише в зігнутому стані.

Загальна довжина протезу повинна відповідати довжині здорової ноги людини, щоб уникнути небажаних викривлень спини та затиск м'язів тазу. Особливу увагу необхідно проявити до загальних довжин частин ноги, оскільки необхідно витримати однакову висоту вісі протезу з віссю згинання здорової ноги. Це береться до уваги не тільки при розробці опорної частини колінного механізму, але й при проектуванні додаткових систем контролю руху коліна, оскільки ті не повинні бути занадто громіздкими та лишати простір для подальшого варіювання довжин. При проєктуванні є доцільним орієнтування на усереднені антропометричні дані, а саме: 427 мм (середня довжина стегнової кістки, 361 мм (середня довжина великогомілкової кістки) [2].

Також важливу роль відіграє маса протезу та його частин. Різні рішення при проєктуванні колінного протезу можуть надлишково його обтяжувати в порівнянні з здоровою ногою. Додатково, це стає серйозною проблемою при ушкодженні або ослабленні м'язів, що відповідають за рух стегна. Як наслідок, це може призвести до дефектів ходи та проблем з фіксацією протезів. Маса ніг сильно варіюється в залежності від багатьох факторів, але, як правило, його можна вирахувати з маси тіла. В середньому, маса стегна та

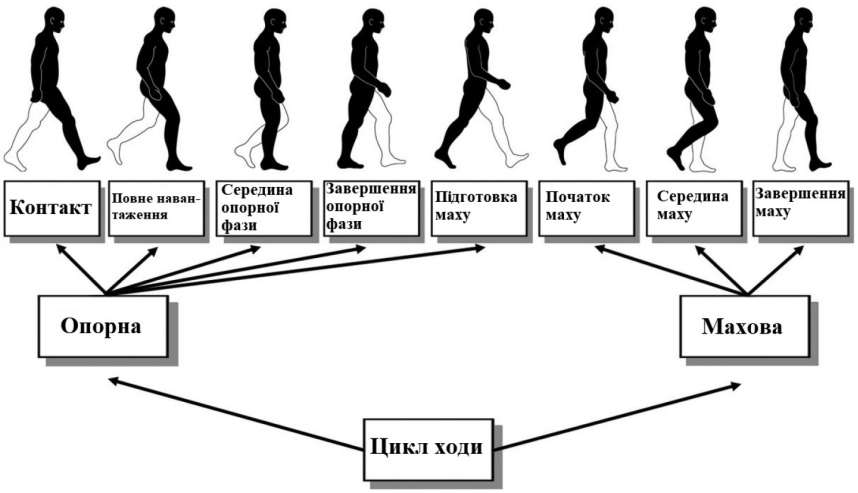


Рис. 1. Етапи та фази ходи людини [3]

ноги нижче коліна складає 11 % та 6.5 % від маси тіла відповідно [2]. При перерахунку на людину з вагою 80 кг це буде 8.8 кг та 5.6 кг.

Для розуміння особливостей роботи колінних протезів, варто також розуміти, з чого складається цикл ходи, що впливає на вимоги до конструкцій протезу нижньої кінцівки людини. Класифікацію етапів наведено на рис. 1.

Взявши до уваги наведені вище релевантні параметри нижньої кінцівки людини, можна виконати оцінку штучних колінних суглобів для трансфеморальних протезів.

Колінні механізми можна класифікувати двома способами. Перший спосіб бере до уваги безпосередньо опорну частину коліна, та класифікує їх за кількістю осей. Так коліна можна поділити на одноосьові та багатоосьові. Другий спосіб стосується механізму контролю згинання, та ділить протези на механічні та цифрові.

Найпростішими є протези з механічним одньоосьовим колінним суглобом. Такі протези є простими, надійними, дешевими та простими у догляді. Їх частіше за все застосовують для дітей, оскільки використання складніших механізмів не є доцільним з огляду на активний ріст тіла користувача. Також дані протези частіше обирають люди, що проживають на значній відстані від найближчих центрів протезування [4].

Першою проблемою такого протезу є те, що даний протез не є адаптивним до швидкості ходи. Другою є те, що якщо такі протези не мають механізму фіксації, то їх користувачу приходиться докладати додаткових зусиль, щоб підтримувати його в прямому, розігнутому стані. На сьогодні в такі суглоби імплементують прості засоби для блокування ноги здебільшого для стоячого положення. Тому, варто розглянути одноосьові колінні протези з рідними механізмами фіксації.

Блокування може відбуватися вручну або автоматично. Ручна фіксація зазвичай виконується через спеціальний важіль на корпусі або трос. Недоліком такої системи є постійна необхідність в ручному керуванні, та ненатуральна хода. При маховій фазі ходи суглоб може вільно розгинатися, через що може випадково завчасно торкнутися землі. Через це користувачу прийдеться сильніше підіймати таз, щоб запобігти спотиканню. Ця проблема особливо відчутна при погано підібраній довжині протезу. Також до значних недоліків відноситься відсутність амортизації поза тією, котру дає стопа. Через це під час етапу повного навантаження та етапу завершення опорної фази може відбуватися значно сильніше пошкодження кукси.

Прикладом одноосьового коліна з фіксацією через трос є Ottobock 3R40 Locking Knee, показаний на рис. 2.

Рис. 2. Ottobock 3R40 Locking Knee [5]

В якості альтернативи ручному блокуванню, є суглоби з блокуванням на основі сили тертя. В таких механізмах коліно фіксується при навантаженні на нього через зростання тертя між прокладкою та рухомою частиною. Протези на їх основі є зручнішими та дозволяють обпиратися на ногу навіть у зігнутому стані.

Прикладом одноосьового коліна з блокуванням на основі сили тертя є Ottobock 3R93, показаний на рис. 3.

Рис. 3. Ottobock 3R93 [6]

Хоча фіксація на основі тертя і є найбільш оптимальним, на сьогодні, рішенням для одноосьового механічного коліна, але дана конструкція все ще матиме проблему асиметричності ходи. Час махової фази одноосьового протезу більший на 40 % в порівнянні зі здоровою кінцівкою, а довжина кроку більша на 20 % [7]. Доцільною є оптимізація даних параметрів для найбільшого наближення до параметрів здорової ноги.

Наступними можна проаналізувати вимоги до конструкцій багатоосьових колінних проте-

зів. Зазвичай це протези з 4 осями. Їх основна особливість полягає в зміщенні миттєвого центру швидкостей (МЦШ). Це дозволяє запобігти випадкового згинання суглобу при навантаженні з меншим зусиллям м'язів для фіксації. Це також робить його зручним в русі. Дані коліна можуть надійно прийняти навантаження в русі при контакті з землею чи середині опорної фази, а після, легко згинаються для етапу повного навантаження чи махової фази. Ці суглоби також рішають проблему спотикання при ході з одноосьовими суглобами. При згинанні коліна нога стає трохи коротшою, що дозволяє коректно тримати таз.

Залежно від розміщення осей, коліна поділяються на: гіпер-стабілізовані, коліна з піднятим МЦШ та вільно контрольовані. Гіпер-стабілізовані коліна виконані таким чином, що при контакті п'яти з землею замикають коліно. Це обумовлено зміщенням МЦШ позаду прямої навантаження та трохи вище коліна. Коліна з піднятим МЦШ мають миттєвий центр швидкостей розташований позаду прямої навантаження та на висоті біля кульшового суглобу, що забезпечує більшу стабільність на етапі контакту з землею. Вільно контрольовані коліна має МЦШ розташований вище коліна та трохи позаду прямої навантаження, що дає більшу стабільність при опорній фазі ходи [8].

Як приклад багатоосьового механічного, вільно контрольованого коліна можна обрати Otto Bock 3R20, зображений на рис. 4.

Рис. 4. Ottobock 3R20 [8]

Наведені вище інженерні рішення роблять це коліно зручнішим для активних людей з неураженими м'язами тазу та добре сформованою куксою. Подібні механізми роблять протез значно важчими та більш енерговитратними для підтримки стабільності при опорній фазі ходи, що робить його незручними у використанні для людей, котрі зазнали значні ушкодження або атрофію м'язів тазу.

Щоб покращити стабільність протезу під час ходи, в штучні колінні суглоби встановлюють пневматичні або рідинні демпфери. Попри протидію навантаженню при згинанні, будова даних амортизаторів майже не сповільнює рух при розгинанні. Таке покращення дозволяє мати більш природню ходу котра може варіюватися в швидкості. Також демпфери амортизують ударне навантаження на куксу, зменшуючи її ушкодження. Недоліками такого механізму є значно збільшені розміри та вага. Наявність таких елементів як демпфери, значно ускладнює догляд. З огляду на це, основним напрямком оптимізації є зменшення ваги суглобу.

Прикладом чотирьохосьового механічного коліна з рідинним демпфером є Swan Knee M0780/M0786 зображений на рис. 5.

Рис. 5. Swan Knee M0780/M0786 [9]

Цифрові протези коліна беруть за свою основу розглянуті вище механічні рішення, та доповнює його механізмом керування, що динамічно адаптується під різні умови. Найпоширенішим механізмом контролю є змінний демпфер з магнітною рідиною. Провідні моделі мають широку сенсорну систему, що дозволяє швидко фіксувати зміну в русі та підлаштовуватися. Програмне забезпечення дозволяє імплементувати нові функції. До таких відноситься адаптація під спотикання, динамічна зміна швидкості, адаптація під різні стійки та позиції. Цифрові коліна дуже полегшують ходу та роблять її максимально наближеною до природньої зі всіх запропонованих. Недоліками є ще

більша вага, розмір, складність в догляді, вразливість до зовнішніх умов та низька доступність.

Окрім оптимізації будови протезу також необхідно адаптувати його під більшу кількість випадків. Зокрема, необхідною є налаштування програмного забезпечення для підтримки користувача з дефектами ходи. В наслідок травми, що передує ампутації, людина може отримати як певні ушкодження опорно-рухового апарату, так і нервової системи. Ці пошкодження можуть мати перманентний характер та вимагатимуть нових алгоритмів, що мінімізуватимуть шкоду від такої ходи.

Висновки. Впровадження коректних механізмів для відновлення функції колінного суглобу є дуже важливим для забезпечення самостійності та здоров'я для людей з трансфеморальною ампутацією. Тому в даній статті було проведено аналіз існуючих технічних рішень створення складових протезів нижньої кінцівки, їх переваги та недоліки. Зокрема було розглянуто:

– одноосьові колінні механізми та засоби їх фіксації;

– багатоосьові колінні механізми та засоби їх стабілізації;

– комп'ютеризовані колінні механізми та їх розширений функціонал.

Для кожного з наведених варіантів було встановлено напрямки удосконалення існуючих та застосованих в реальній практиці конструкцій. Було встановлена необхідність в створенні систем, що підлаштовувалися під дефективну ходу для мінімізації її наслідків у випадках її невиліковності.

Подальшими напрямками наукового дослідження є визначення основних принципів системи керування такими протезами та оптимізація цих принципів керування.

Список літератури:

1. Кількість ампутацій в Україні досягає масштабів Першої світової, URL: https://surl.lu/elktuu (дата звернення: 25.02.2025).

2. Криницький П. К., Клочко Т. Р. Ергономічні особливості проєктування протезу нижньої кінцівки людини, XXIII Міжнародна науково-технічна конференція «ПРИЛАДОБУДУВАННЯ: стан і перспективи», 14–15 травня 2024 року, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна, с. 218–224.

3. ProtoKinetics, Understanding Phases of the Gait Cycle. URL: https://protokinetics.com/understanding-phases-of-the-gait-cycle/ (дата звернення: 25.02.2025).

4. Prosthetic Knees for Adults / The War Amps, URL: https://surl.gd/cngslx (дата звернення: 25.05.2023).

5. Single Axis Knee Joint, Lock, Titan. | Knees – Ottobock, URL: https://surl.li/yopask (дата звернення: 23.03.2025).

6. Modular Brake Knee Joint with Lock | Knees – Ottobock, URL: https://surli.cc/zxirmr (дата звернення: 23.03.2025).

7. Gait Performance of Friction-Based Prosthetic Knee Joint Swing-Phase Controllers in Under-Resourced Settings, by Jan Andrysek, Alexandria Michelini, Arezoo Eshraghi, Sisary Kheng, Thearith Heang and Phearsa Thor, Institute of Biomedical Engineering, University of Toronto, Rosebrugh Building, Room 407, 164 College Street, Toronto, ON M5S 3E2, Canada, Submission received: 18 February 2022 / Revised: 8 March 2022 / Accepted: 9 March 2022 / Published: 15 March 2022.

8. Dimension Optimization of Polycentric Knee Mechanism Using the Bees Algorithm and Genetic Algorithm, Mert Eren AYĞAHOĞLU, Mehmet Sefa GÜMÜŞ, Abdullah ÇAKAN, Mete KALYONCU, e-ISSN 2717-8811 JournalMM, 2023, 4(1), 318–332 https://doi.org/10.55546/jmm.1243744

9. Swan Knee – Hydraulic Stance Flexion Polycentric Knee, URL: https://stngco.com/product/swan-knee-hydraulic-stance-flexion/ (дата звернення: 23.03.2025).

Krynytskyi P. K. MODERN SOLUTIONS IN THE RESTORATION OF KNEE JOINT FUNCTION IN PEOPLE WITH TRANSFEMORAL AMPUTATION AND DIRECTIONS FOR THEIR OPTIMIZATION

Today, an increasing number of people need to undergo amputation surgery. Most of them occur due to trauma or severance of limbs. Lower limbs play a particularly important role in human health and independence. Their work supports the cardiovascular system and the musculoskeletal system. Therefore, restoring their functionality is one of the priorities in prosthetics. Transfemoral amputation is one of the most difficult cases of leg amputation. When prosthetics are used for people with such amputations, the main task is to restore the function of the knee joint to ensure movement.

Over the past 100 years, a large number of solutions have been developed and improved in this area. Foreign companies have played a major role in this.

In this paper, we reviewed the relevant anatomical and anthropometric parameters that are used to design knee mechanisms for transfemoral prostheses, namely: degrees of freedom, leg dimensions, leg weight, and gait stages.

The classification of knee mechanisms for transfemoral prostheses was considered. These mechanisms are classified by the number of axes and the type of joint motion control. A review of uniaxial knee mechanisms was conducted. The majority of them use manual fixation means or automatic fixation by a friction mechanism acting under load. The need to approximate the parameters of speed and stride length of the prosthetic limb to the parameters of a healthy limb was established. A review of multiaxial knee mechanisms was performed. The features of the structure of hyper-stabilized knee mechanisms, freely controlled knee mechanisms, and mechanisms with a raised MCL were considered. Hydraulic and pneumatic means of stabilization of multiaxial prostheses were also considered. The need to minimize the weight of this system was established. A review of digital knee joints and their additional functionality was conducted. For digital knee prostheses, the need to develop additional algorithms for people with incurable gait defects was established.

Key words: *prosthetics, transfemoral, optimization, variable damper, anthropometric parameters.*

УДК 628.51+621.35
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/10

Кузнєцов С. І.
Херсонський національний технічний університет

Венгер О. О.
Херсонський національний технічний університет

Безпальченко В. М.
Херсонський національний технічний університет

Семенченко О. О.
Херсонський національний технічний університет

Івкіна Є. С.
Херсонський національний технічний університет

ЕЛЕКТРОСТАТИЧНИЙ ФІЛЬТР ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ГАЗІВ ВІД ПИЛУ

Забруднення повітря є актуальною проблемою сучасності. У статті розглянуто методи та обладнання електричного очищення газів від пилу. Виявлено, що електричні фільтри найбільш ефективні завдяки здатності захоплювати пил розміром від 0,01 мкм до 100 мкм. Основними характеристиками пиловловлюючих пристроїв є: ефективність пиловловлювання, аеродинамічний опір і пиломісткість. З'ясовано, що ефективність пиловловлювання залежить від характеристик пилу, таких як: дисперсність, питома вага, початкова концентрація, вологість та заряд частинок пилу. Визначено, що надмірний опір призводить до порушення ефективної роботи вентиляційної системи, тому розробка та дослідження роботи електростатичного фільтра, що працює на принципі електризації фізичних тіл внаслідок трибоефекту, має значний практичний інтерес. Електростатичні фільтри не потребують джерела високої напруги, оскільки електричне поле виникає на поверхні електродів у результаті тертя двох різнорідних матеріалів. Визначено, що такі фільтри за умови правильного вибору та експлуатації в оптимальному технологічному режимі, перевершують усі відомі типи пристроїв для очищення газів від пилу за технічними показниками. Для високоефективного очищення повітря розроблено конструкцію електростатичного фільтра, здатного захоплювати дрібнодисперсний (аерозольний) пил будь-якого походження. Визначено математичні залежності для отримання оптимальних геометричних розмірів і пропорцій апарату. Проведено комплексні дослідження з підбору матеріалів, що легко електризуються, та вивчено вплив різних параметрів на процес утворення електростатичних зарядів. Досліджено ефективність розробленого електростатичного фільтра для очищення різних газів.

Ключові слова: *електростатичний фільтр, дрібнодисперсний пил, очищення повітря, заряд частинок пилу.*

Постановка проблеми. Сучасною екологічною проблемою є техногенне забруднення атмосферного повітря пилом, розміри якого варіюються в межах 0,01–100 мкм [1, с. 786]. У 2023 році кількість викидів речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в Україні склала 149 212,445, тонн [2]. У зв'язку з цим необхідно цілеспрямовано розробляти та впроваджувати нові методи та більш досконале пилоочищуване обладнання. Маючи різні фізичні та хімічні властивості пилові частинки, потрапляючи в організм людини, завдають шкоди його здоров'ю. Забруднення повітря дрібнодисперсними частинками стало причиною смертей 42 916 українців у 2019 році, 9 % випадків інфаркту міокарда [3]. Особливо шкідливі частки, що мають розмір менше 1–2 мкм, тому що вони при вдиханні затримуються у легенях. Для зниження забруднення повітря Кабінет Міністрів України розпорядженням від 08.11.2017 № 796-р схвалив Національний план скорочення викидів (НПСВ) забруднюючих речовин від великих спалювальних установок [4; 5, с. 296].

Очищення промислових газів від пилу перед надходженням їх в атмосферу запобігає забрудненню атмосферного повітря, дозволяє повернути у виробництво корисні речовини і утилізувати без шкоди для навколишнього середовища шкідливий і небезпечний пил.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Електричне очищення є найбільш ефективним серед відомих промислових методів очищення газів від пилу та туманів. У свою чергу електрофільтри – найбільш універсальне обладнання, призначене для уловлювання дрібної та аерозольної фракцій пилу. Конструкція електрофільтрів досить складна, вона складається з рядів коронуючих і осаджувальних електродів, розташованих в ізольованому корпусі [6, с. 182]. Для забезпечення роботи використовується високовольтне джерело постійного струму. Як показує практика, ККД електрофільтрів становить 92–96 % і чим він вище, тим більші габаритні розміри мають бути у обладнання. Відомі такі позитивні особливості електричного очищення газів:

1) можливість забезпечувати в залежності від конкретних умов і вимог ступінь очищення газів до 99.9 % і діапазон продуктивності – від декількох м^3/год. до мільйонів м^3/год.;

2) електрофільтри мають найменший гідравлічний опір серед всього відомого обладнання, призначеного для очищення газів;

3) можливість роботи при тисках нижче та вище атмосферного;

4) концентрація зважених частинок в газовому потоці, що очищається, від 0,1 мг/м^3 до 50 г/м^3 і більше;

5) температура при очищенні до 500°;

6) очищення може проводитись, як у сухому, так і в мокрому режимах;

7) електрофільтри здатні вловлювати частки від 0,01 мкм до 100 мкм;

8) електрофільтри можуть бути виготовлені з матеріалів стійких до кислот, лугів та інших агресивних середовищ;

9) процес очищення в електрофільтрах може бути повністю автоматизований;

10) витрата електроенергії електрофільтрів, як правило, менша, порівняно з апаратами інших типів;

11) термін служби електрофільтрів залежно від умов роботи, становить до 20 років.

Однак електрофільтри придатні не для будь-яких виробничих умов, а ефективність їх роботи залежить від режиму експлуатації [7, с. 3; 8, с. 624]. До недоліків електрофільтрів слід віднести їх високу вартість, громіздкість, складність виготовлення, а також необхідність періодичного відновлення їх фільтруючих властивостей. Крім того в електрофільтрах не можливо вловлювати частинки легкозаймистих матеріалів, через небезпеку їх загоряння або вибуху.

Незважаючи на це, слід підкреслити, що при правильному виборі електрофільтрів, експлуатації їх в оптимальному технологічному режимі в більшості випадків вони за всіма показниками перевершують газоочисні і пиловловлюючі апарати всіх відомих типів. Особливо високий ефект газоочищення досягається при поєднанні електрофільтрів з іншими апаратами газоочищення [9, с. 49; 10, с. 140].

Постановка завдання. Мета досліджень – розробка і дослідження роботи конструкції електростатичного пиловловлювача здатного ефективно вловлювати дрібнодисперсний пил будь-якого походження.

Виклад основного матеріалу. Конструкцію електрофільтрів конкретного призначення в основному визначають технологічні умови роботи: властивості і склад газів, які будуть очищуватись, зважених частинок, що містяться в ньому, температура, тиск і вологість газів, необхідний ступінь очищення та ін.

Принцип дії електрофільтрів ґрунтується на виділенні з газового потоку твердих або краплинних частинок шляхом впливу електричного поля на заряд, індукований на поверхні частинки. Частинка пилу заряджається при проходженні зони заряду і осідає на електроді протилежного знаку [11, с. 85]. Подальшими операціями є: механічне зняття пилу з електродів, транспортування його (зазвичай вільним падінням у бункері та регулярне видалення зібраного пилу з бункерів).

Особливе місце серед електрофільтрів займають електростатичні фільтри. Спосіб електростатичного очищення газів від пилу, заснований на електризації електродів шляхом трибоефекту. При цьому в результаті тертя електроди, які зроблені з діелектричних матеріалів, отримують заряд статистичної електрики. На відміну від динамічної електрики, статична електрика не може викликати появу тепла, магнітного поля або хімічної дії.

Основним законом статичної електрики є закон збереження електричних зарядів, які не знищуються і не з’являються знову, вони можуть по-різному розташовуватися на поверхні тіла в межах однієї молекули або групи молекул. Явище електризації тіла – чисто поверхневий ефект і заряди за певних умов можуть переходити з поверхні одного тіла на поверхню іншого. Поява електричного заряду супроводжується появою електричного поля – особливого стану простору, зумовленого присутністю у ньому заряду. Будь-яке поле має розподілену в просторі енергію.

До електричних полів застосовується принцип суперпозиції, який свідчить, що кожен заряд створює своє поле незалежно від поля інших зарядів і кожна точка поля характеризується певним потенціалом. Між двома точками існує перепад напруги. Потенціал є енергетичною характеристикою поля, він чисельно дорівнює роботі А, виконаної полем при переміщенні заряду q по силовій лінії поля в нескінченність. Про величину заряду, що виникає на поверхні тіла при його електризації, судять по напруженості поля. Напруженість електричного поля Е визначає величину сили, що діє на заряд, що знаходиться в стані покою. Напруженість сумарного поля у будь-якій його точці буде геометричною сумою напруженості векторів поля кожного заряду окремо.

$$E = \frac{u}{d}\left[\frac{b}{u}\right],$$

де: E – напруженість однорідного електричного поля, потенціал якого змінюється на 1 В на відстані 1 м вздовж силової лінії. Розмір заряду пропорційний потенціалу його поля:

$$g = CU,$$

де: C – коефіцієнт пропорційності (виражається ємністю тіла).

Чим більша ємність тіла (провідника), тим більший потрібен заряд, щоб потенціал тіла досяг необхідної величини. Взаємодія наелектризованих тіл визначається законом Кулона, який говорить що сила взаємодії двох точкових електричних зарядів q_1 і q_2 пропорційна добутку зарядів і обернено пропорційна квадрату відстані між ними: $F = \frac{q_1 \cdot q_2}{r^2}$.

У однорідному діелектричному середовищі відмінному від вакууму, сила взаємодії зарядів буде меншою. Це враховується введенням коефіцієнта $K = \frac{I}{\varepsilon_a}$ і закон Кулона може бути виражений наступною формулою:

$$F = \frac{q_1 \cdot q_2}{\varepsilon_a \cdot r^2},$$

де: ε_a – абсолютна діелектрична проникність середовища.

Поверхнева густина зарядів , тобто поверхневий розподіл зарядів у вигляді нескінченного тонкого шару є відношенням заряду q_1, який припадає на площу ΔS до її величини, коли $\Delta S \to 0$

$$\vartheta = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\Delta q}{\Delta S} = \frac{\alpha_q}{\alpha_S}.$$

Елементарні заряди $\alpha_q = \vartheta \cdot \alpha_s$ можна розглядати як точкові заряди. Поверхнева густина зарядів – це деяке усереднене значення зарядів, віднесене відповідно до одиниці поверхні тіла, об'єму.

Для однорідного поля $\vartheta = \frac{q}{S}$. Однорідне електричне поле це таке поле, у всіх точках якого сила електричного поля залишається постійною. При наближенні до наелектризованого тіла ізольованого провідника на боці провідника, яка звернена до наелектризованого тіла, можна виявити заряди протилежного знаку, а з іншого боку провідника – заряди того самого знаку, як і у наелектризованому полі. При дотику двох різнорідних провідників на поверхні з'являються заряди, які дорівнюють за величиною і протилежні за знаком. У більшості випадків в основі електризації лежить контакт між двома тілами та його подальше порушення. У природних умовах контакт двох твердих тіл ускладняється наявністю на поверхні вологи, забруднень електролітами тощо.

В даний час найбільшого поширення набула теорія, що розглядає електризацію при контакті двох різних речовин, як результат переходу носіїв зарядів з однієї поверхні на іншу. Механізм процесу контактної електризації може протікати по-різному залежно від таких факторів, як електрохімічний процес, наявність сторонніх адсорбційних речовин на поверхні тіл, що перебувають у дотику, а також стану зовнішнього середовища.

Не менш обґрунтованою теорією є теорія, що розглядає електризацію, як результат орієнтації полярних молекул. Безперечний той факт, що виникнення електростатичного заряду є суто поверхневим ефектом. Електризація різних речовин в результаті тертя відбувається завдяки тому, що процес тертя зазвичай пояснюється взаємним зчепленням мікроскопічних виступів, що є на поверхні твердих тіл, і за рахунок міжмолекулярних сил.

Електростатичні процеси знайшли широке застосування у промисловості: очищення газів від твердих частинок в електростатичному полі, електростатичне забарвлення, електричне ворсування тощо. У всіх випадках зарядження частинок здійснюється в коронному розряді, а керування потоком заряджених частинок – штучно створеним електростатичним полем.

Електричні поля і заряди, утворені безпосередньо трибоелектричним ефектом не набули широкого застосування в промисловості, тому що недостатньо вивчені. Однак дослідження показують, що трибоелектричне зарядження матеріалу

може бути успішно використано в багатьох технологічних процесах. Величина електростатичного заряду в основному залежить від будови тіл, що знаходяться в контакті, стану поверхонь, від площі дотику тіл і від величини тиску одного на інше, а також швидкості відриву тіл одного від іншого.

Розроблено конструкцію багатодискового електростатичного пиловловлювача (рис. 1), який має велику продуктивність, високий ККД і низьку собівартість [12]. Для створення електричного поля у пиловловлювачі використовується трибоефект, який виникає внаслідок тертя діелектриків, і виключає необхідність у використанні високовольтного джерела живлення.

Матеріалом для виготовлення дисків можуть бути будь-які діелектрики. Дослідження показали, що найбільш придатними для цієї мети є полістирол, органічне скло, полівінілхлорид, склопластик, фтор-пласт і інші матеріали, що мають високу здатність наелектризовуватися від тертя. Щітки можуть бути виготовлені з повсті, капронової пряжі, скловолокна, щетини, сукна, хутра та інших матеріалів [13, с. 97].

При обертанні дисків і тертя їх об нерухомі щітки, на поверхні дисків виникає статична електрика, а між дисками – електростатичне поле. Частинки пилу примусово направляються або вільно надходять в апарат і потрапляють в електричне поле. Внаслідок ефекту поляризації і наведення зарядів, пил притягується поверхнею протилежно заряджених дисків, осідає на них і за допомогою щіток зчищається в бункер – пилозбірник.

Електростатичне поле створюється нерухомими в просторі і незмінними в часі електричними зарядами, які виникають в результаті трибоефекту, при цьому електричний струм відсутній.

Електростатичний розряд відбувається при дуже високій напрузі і дуже низькій силі струму. Напругу в десятки тисяч вольт при струмі, який вимірюється тисячними частками ампера неможливо відчути при дотику. Саме низьке значення струму не дає статичному заряду завдати людині шкоди, що є великою перевагою електростатичного пиловловлювача.

Для запобігання стікання наведених зарядів з поверхні дисків вал виконаний з діелектрика.

Електростатичний пиловловлювач складається із корпусу 1, встановленого на станині 2, який має вхідний патрубок 3 на одному боці і вихідний патрубок 4 – на протилежному, бункери для збору пилу 5, приєднані до нижньої частини корпусу 1, крім того, у корпусі 1 розміщені два паралельні вали з дисками-електродами 6, 7, які виконані із органічного скла і тефлону, до кожного диску-електроду 6, 7 з обох боків прилягає повстяна щітка 8 з пружиною 9, закріпленою на корпусі 1, та гумовий ніж 10, приєднаний до щітки 8 і призначений для очищення дисків-електродів 6, 7 від налиплого пилу, також пиловловлювач має розташований на станині 2 електродвигун 11 з клиноремінним приводом 12.

У електростатичному пиловловлювачі встановлено 5 дисків на кожному валу. Диски виготовлені з органічного скла і тефлону товщиною 5 мм і діаметром 250 мм. Відстань між дисками на валу 50 мм. Швидкість обертання дисків 77 хв$^{-1}$. Матеріал щіток – повсть. Для обертання ротора застосований двигун потужністю 30 Вт. При обертанні дисків-електродів 6 з органічного скла, вони заряджаються позитивно, а диски-електроди 7 з тефлону – негативно за рахунок тертя об повстяні

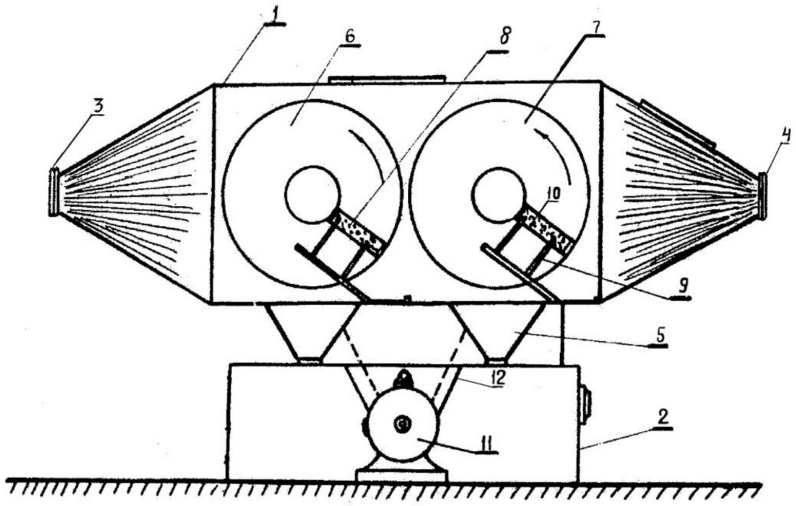


Рис. 1. Багатодисковий електростатичний фільтр: 1 – корпус, 2 – станина, 3, 4 – патрубки, 5 – бункер, 6, 7 – дискові електроди, 8 – щітка, 9 – пружина, 10 – ніж, 11 – електродвигун, 11 – клиноремінний привод

Таблиця 1

Результати випробувань електростатичного пиловловлювача при очищенні (100 м³) повітря від деяких домішок

	Пил (походження)	Запиленість повітря, г/м³		Ступінь очищення повітря, %
		вхід	вихід	
1	Цемент	1,5	0,013	99,8
2	Поварена сіль	2,3	0,01	99,6
3	Сечовина	3,2	0,01	99,8
4	Бавовняний пил	0,8	0,00	100,0
5	Суперфосфат	1,4	0,006	99,6
6	Аміачна селітра	2,8	0,006	96,8

щітки 8, які щільно притискаються до дисків-електродів 6, 7 за допомогою пружин 9, закріплених на корпусі 1. При терті виникає висока напруженість електростатичного поля. Частинки пилу, які мають різнойменні заряди, рухаються у газовому потоці та притягуються до протилежно заряджених дисків-електродів, осаджуючись на їх поверхні. Після чого пил зчищається з електродів за допомогою гумових ножів 10 у бункери для збору пилу 5.

Проведені випробування показали, що апарат описаної конструкції інтенсивно захоплює пил різних речовин органічного і неорганічного походження: вугільний пил, золу, цемент, сажу, натрій хлорид, хлористий калій, сульфіт і сульфат натрію, кварц, фосфорити, суперфосфат, гіпс, фосфорну муку, аміачну селітру, сульфат амонію, крейда, вапняк, луг і багато інших речовин. З органічних речовин добре уловлюється бавовняний, конопляний і джутовий пил, частинки інших текстильних волокнистих матеріалів, а також, борошна, цукру, щавлевої кислоти, сечовини, сульфосолі тощо. Результати випробувань електростатичного пиловловлювача при очищенні повітря від деяких домішок наведено в табл. 1.

Висновки. Електростатичний пиловловлювач здатний ефективно очищувати гази від надзвичайно легких і дрібних частинок, розмір яких може бути менше 0,01 мкм, безпечно вловлювати легкозаймистий, вибухонебезпечний, струмопровідний пил при низькому тиску газу. Робочі частини пиловловлювача не схильні до корозії при дії кислот, лугів та інших агресивних середовищ, оскільки виготовлені з неметалічних матеріалів. Пиловловлювачі не потребують джерела високої напруги.

Собівартість електростатичного пиловловлювача нижче, ніж у електрофільтру, конструкція апарату проста у виготовленні, довговічна, надійна, безпечна в роботі, не вимагає установки високовольтного джерела живлення, легка в обслуговуванні.

Список літератури:

1. Torghabeh A., Pradhan B., Jahandari A. Assessment of geochemical and sedimentological characteristics of atmospheric dust in Shiraz, southwest Iran. *Geoscience Frontiers*. 2020. Vol. 11, № 3. P. 783–792.

2. Викиди забруднюючих речовин і парникових газів в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів. Викиди речовин у вигляді суспендованих твердих частинок в атмосферне повітря від стаціонарних джерел викидів за регіонами у 2023 році С. 4. URL: https://www.ukrstat.gov.ua/operativ/operativ2018/ns/vzap/arch_vzrap_u.htm. (дата звернення: 23.03.2025).

3. Максим Сорока. Звітування про викиди в атмосферне повітря: як працює рішення для українських підприємств-забруднювачів. 04.03.2023. URL: https://rubryka.com/article/zvituvannya-pro-vykydy/ (дата звернення: 23.03.2025).

4. Про Національний план скорочення викидів від великих спалювальних установок. Розпорядження Кабінету Міністрів України від 08.11.2017 № 796-р. *Урядовий кур'єр*. 2017. 30 листопада. № 226.

5. Вольчин І. А., Гапонич Л. С. Стан та перспективи виконання національного плану скорочення викидів забруднюючих речовин від великих спалювальних установок. *Екологія. Людина. Суспільство* : матеріали XXII Міжнародної наук.-практ. конф. (м. Київ, 2021 р.). Київ, 2021. С. 296–302.

6. Крусір Г. В., Мадані М. М., Гаркович О. Л. Техніка та технології очищення газових викидів: навч. посібник. Одеса : ОНАХТ, 2017. 207 с.

7. Ліпенков І. В. Аналіз сучасних систем очищення вихідних газів у суднових енергетичних установках. *Молодий вчений. Технічні науки*. 2020. № 1(77). С. 1-4. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2020-1-77-1

8. Gudanov I. S., Vatagin A. A., Lebedev A. E., Kapranova A. B., Dolgin D. S. Modernization of Diffuser Design of EGAV Type Electrostatic Precipitators for Ensuring Uniformity of Gas and Dust Flow. *Chemical and Petroleum Engineering*. 2024. Vol. 60, № 9. P. 623–629. DOI: 10.1007/s10556-024-01260-6

9. Шапорев В. П. Екологія у виробництві тугоплавких неметалевих і силікатних матеріалів: навч. посіб. Харків : Технологічний центр, 2018. 180 с.

10. Куц В. П., Гумницький Я. М., Марціяш О. М. Можливості застосування пиловловлювачів комбінованої дії на підприємствах переробної галузі регіону і економічна оцінка ефективності процесу пилоочищення. *Наукові праці ОНАХН*. 2016. Вип. 1. Т. 80, С. 138–143.

11. Zhao Z. Enhancing Dust Removal Efficiency in Electrostatic Precipitators with Homogeneous Flow. *Academic Journal of Science and Technology*. 2023. Vol. 7, № 3. P. 84–88. DOI: 10.54097/ajst.v7i3.13052

12. Трибоелектростатичний пиловловлювач: пат. на корисну модель № 120641 Україна: МПК A47L 9/10, (2006.01), B04C 3/04 (2006.01); заявл.22.04.17; опубл. 11.11.17. Бюл. № 21. 4 с.

13. Кузнєцов С. І., Венгер О. О., Семенченко О. О., Безпальченко В. М., Івкіна Є. С. Дослідження впливу деяких факторів на рівень електризації діелектриків. *Екологічні науки*. 2022. № 6(45). С. 95–99. DOI: https://doi.org/10.32846/2306-9716/2022.eco.6-45.15

Kuznietsov S. I., Venher O. O., Bezpalchenko V. M., Semenchenko O. O., Ivkina Ye. S.

ELECTROSTATIC FILTER FOR CLEANING GASES FROM DUST

Air pollution is a pressing problem of our time. The article considers methods and equipment for electrical purification of gases from dust. It was found that electrical filters are most effective due to their ability to capture dust with a size from 0.01 μm to 100 μm. The main characteristics of dust collection devices are: dust collection efficiency, aerodynamic resistance and dust capacity. It was found that the efficiency of dust collection depends on the characteristics of dust, such as dispersion, specific gravity, initial concentration, humidity and charge of dust particles. It was determined that excessive resistance leads to disruption of the effective operation of the ventilation system, therefore the development and study of the operation of an electrostatic filter that works on the principle of electrification of physical bodies due to the triboeffect is of significant practical interest. Electrostatic filters do not require a high voltage source, since an electric field arises on the surface of the electrodes as a result of friction of two dissimilar materials. It was determined that such filters, provided they are properly selected and operated in the optimal technological mode, surpass all known types of devices for cleaning gases from dust in terms of technical indicators. For highly efficient air purification, an electrostatic filter design was developed that is capable of capturing fine (aerosol) dust of any origin. Mathematical dependencies were determined to obtain optimal geometric dimensions and proportions of the device. Comprehensive studies were conducted on the selection of materials that are easily electrified, and the influence of various parameters on the process of electrostatic charge formation was studied. The effectiveness of the developed electrostatic filter for cleaning various gases was investigated.

Key words: *electrostatic filter, fine dust, air purification, charge of dust particles.*

РАДІОТЕХНІКА ТА ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ

UDC 004.75
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/11

Bobyk Yu. V.
Institute of Information and Communication
Technologies and Electronic Engineering

Shpur O. M.
Institute of Information and Communication
Technologies and Electronic Engineering

DESIGNING THE COMPLEX MONITORING IN DISTRIBUTED INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS

This paper explores the development and implementation of a comprehensive monitoring and management solution designed to ensure high Quality of Service (QoS) in Distributed Information and Communication Systems (DICS). It focuses on the prerequisites and technological foundations necessary for the early detection of anomalies in network performance and the automatic reallocation of resources across multiple layers of infrastructure, including network, computational, and service levels. As modern DICS operate in increasingly complex and dynamic environments, maintaining stability and service quality requires adaptive, intelligent, and scalable solutions.

The proposed architecture is based on the integration of distributed telemetry agents, centralized telemetry storage systems, and hybrid data processing methodologies. These tools work together to analyze performance indicators like latency, jitter, packet loss, CPU load, and bandwidth usage in real time, enabling proactive response to performance degradation or resource overloads.

A key aspect of the system is its decision-making and automation capability, achieved through integration with modern orchestration and network management environments. These environments support near real-time adaptation of infrastructure based on analytical insights provided by the monitoring system, thus enabling self-healing, load balancing, and failover mechanisms without human intervention.

The designed solution is modular and interoperable, making it suitable for seamless integration into existing network and service management platforms. It enhances the reliability, fault tolerance, and scalability of distributed architectures, particularly in scenarios involving high user demand, geographic dispersion, heterogeneous infrastructure (including cloud and edge computing), or stringent SLA requirements. By enabling intelligent monitoring and automatic adaptation, the system ensures sustained service quality, operational efficiency, and resilience even under conditions of unpredictable load spikes or security threats.

Key words: *distributed ICS (DICS), monitoring, quality of service (QoS) management, adaptive algorithms, anomalies, machine learning, scaling.*

Formulation of the problem. The current stage of development of information and communication technologies (ICT) is characterized by rapid growth of data volumes and expansion of the range of services provided through distributed information and communication systems (DICS). Advances in cloud computing, virtualization, and containerization (Kubernetes, Docker, etc.), as well as the growing popularity of microservice architecture, have led to a more complex infrastructure structure and management. On the one hand, users need a wide range of available services 24/7 with guaranteed quality of service (QoS), and on the other hand, system administrators and telecom operators are forced to look for more flexible approaches to ensure reliability, performance, and scalability in the face of high load and dynamic changes in network topology.

This situation is caused by two key trends. First, the number of devices connected to the network is constantly increasing, which is being fueled by the proliferation of the Internet of Things (IoT) and smart sensor systems. This creates both a growing load on the network infrastructure and the need for constant monitoring and analysis of relevant data. Secondly, business processes that serve large networks increasingly require guaranteed QoS levels from ICT

systems to maintain competitiveness and meet the strict requirements of Service Level Agreements (SLAs). At the same time, managing distributed infrastructure becomes more complicated, as resources and services are often located in different geographical areas that may belong to different operators or cloud platforms (AWS, Azure, Google Cloud, etc.). Unpredictable transit delays, various routing mechanisms, variable bandwidth, and the possibility of local overloads or failures of individual components should be taken into account. Therefore, there is a need to improve methods and algorithms for monitoring and managing QoS to ensure stable operation of services under any network and computing load.

Analysis of recent research and publications. The issue of ensuring proper quality of service (QoS) in distributed information and communication systems has long been in the focus of attention of the scientific community and the telecommunications industry. Traditionally, the approaches recommended by ITU-T (in particular, E.800 [1]) have been used to assess and maintain QoS, which offer basic methods for measuring key indicators (delay, jitter, throughput, packet loss, etc.). However, with the proliferation of cloud computing, virtualization, and the widespread adoption of the Internet of Things (IoT), such traditional systems are increasingly proving insufficient for monitoring large, distributed, and dynamically changing environments. However, as the topology became more complex and the load on network nodes increased, it became clear that a shift to a proactive monitoring and management paradigm was needed to ensure a high level of QoS in distributed systems. At the same time, there is a growing interest in machine learning (ML) algorithms and artificial intelligence systems capable of predicting workload. These tools allow to identify patterns (seasonality, daily cycles, activity spikes) based on historical data, allocating additional resources (e.g., computing nodes, bandwidth) in advance. This approach is mainly used in cloud and virtualized environments, where resource allocation or release can be performed in an almost automated manner [3, 6]. The papers [4, 7] addresses this problem by monitoring SDN flows and service logs, which is a very important feature of a monitoring system that can reduce the risk of DoS and keep the service component available to users. Recent studies emphasize the growing role of highly reliable real-time monitoring of cloud services and networks. In particular, in [5], the authors consider traffic engineering in service-oriented software-defined networks, paying special attention to the operational monitoring of network flow parameters to implement QoS-oriented routing and ensure the required level of QoE for end users. However, the monitoring in this study focuses mainly on the network aspects, without taking into account data on services or computing resources. This conclusion prompted us to develop a comprehensive system capable of providing a high level of quality of service (QoS) in the face of dynamic changes in network infrastructure and diverse loads.

Task statement. The main purpose of the article is to investigate the effectiveness of the interaction between information technologies and neural networks for automated text content generation and to determine the optimal approaches to the use of these technologies in real industries such as writing, marketing, and business. In addition, the paper examines the impact of modern neural network architectures on the quality of text generation, and explores the features of using basic neural network models for text generation. Criteria for a comprehensive assessment of the quality of the generated content are proposed, and prospects for the development of synergy between information technology and neural networks are identified. Forecasts are given on the trends of the industry development, including increasing the adaptability of texts to the cultural or linguistic context.

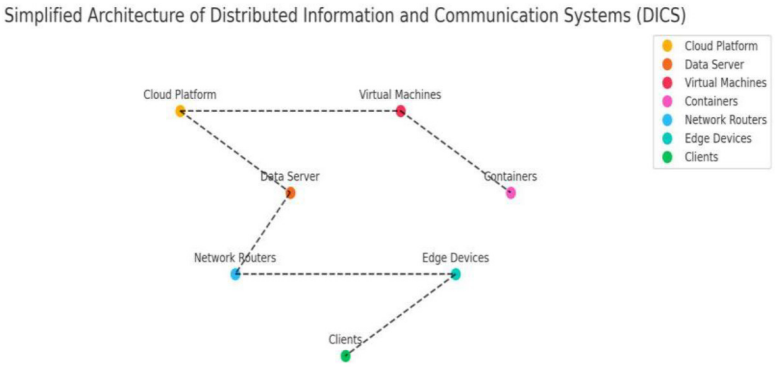


Fig. 1. DICS architecture diagram

Outline of the main material of the study. With the rapidly increasing complexity of modern distributed information and communication systems (DICS), there is a need for a comprehensive approach to monitoring and managing the quality of information services (QoS).

The enhanced architecture of Distributed Information and Communication Systems (DICS) consists of an expanded network of interconnected components that ensure data storage, processing, and transmission between users and cloud resources. The central element is the cloud platform, which provides computing power and is connected to data servers and virtual machines. Data servers process requests, interact with databases, and facilitate data transmission through network routers.

To meet user needs and strict SLA requirements, QoS monitoring and management systems must not only diagnose the current state, but also proactively prevent potential failures or dramatic deterioration in performance. Several key factors complicate this task:

Dynamic changes in infrastructure. (DICS) consist of interconnected subsystems (network routers, data servers, virtual machines, containers, etc.), the configuration of which can change at any time due to load balancing, automatic autoscaling, or software updates.

In multiservice environments, services with varying degrees of criticality are provided simultaneously.

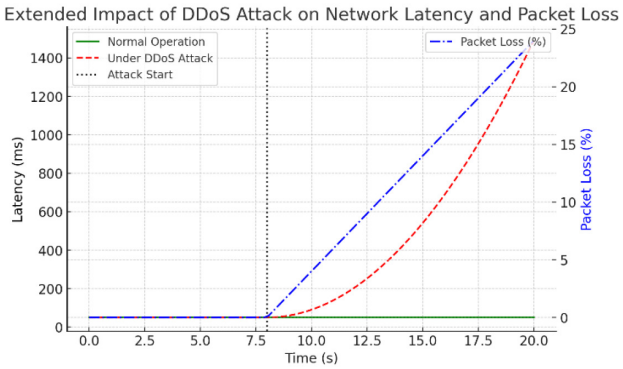


Fig. 2. Impact of DDoS attacks on latency

Table 1

Comparison of QoS parameters and service types

Service Type	Critical Metrics	Tolerated Packet Loss (%)	Required Bandwidth (Mbps)
Video Streaming	Latency, Jitter	1	5
Voice Communication	Latency, Jitter	1	0.1
Backups	Bandwidth	5	100

QoS degradation can arise from several interconnected factors:

– Excessive user traffic may result in the overloading of network channels, application servers, or databases, disrupting normal operations.

– Insufficient computing resources often lead to suboptimal performance of service components, directly affecting their ability to handle requests efficiently.

– Inefficient network routing that fails to account for user traffic patterns or the geographic locations of users and service components can exacerbate delays and packet losses.

Solving the problem of proactive monitoring and adaptive management of the quality of information services in distributed ICS requires an integrated approach that covers all levels of the system: from physical and channel interaction (telemetry collection, low-level monitoring) to high-level service orchestration (dynamic scaling in the cloud, reconfiguring routes in SDN, traffic prioritization).

Each node or group of nodes in the DICS is equipped with agents that measure key indicators: bandwidth, latency, jitter, packet loss, CPU utilization, memory usage, virtual machine status, etc. Data collection technologies. To minimize the delay in data transmission, agents can perform primary processing (aggregation, hashing) locally and send the compressed information to central monitoring nodes.

Alert system. In case of significant deviations from normal indicators or critical events, notifications are sent (via e-mail, SMS, push channels) and/or external scripts are automatically called to trigger control mechanisms.

Linear and polynomial regression. They are used as basic approaches to identify trends (e.g., slow growth of delay) and extrapolate short-term load. ARIMA, SARIMA, and other time-based models. Used for more accurate modeling of time series with seasonal fluctuations (daily/weekly cyclicality). Machine learning methods (neural networks,

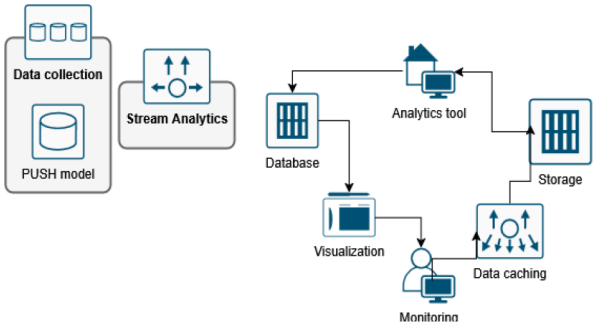


Fig. 3. Multi-level monitoring system

Random Forest, XGBoost). They allow taking into account nonlinear dependencies between parameters and predicting unusual situations in advance. For each indicator, statistical thresholds (mean, standard deviation) are calculated, when exceeded, the system generates a signal of a possible deviation. Clustering models (K-means, DBSCAN). Metrics belonging to clusters with low density or that do not correspond to "typical" centroids are treated as anomalous. Distance estimation (Mahalanobis distance, Isolation Forest). Allows you to automatically detect points or entire subsets of data that have atypical characteristics compared to the majority. If possible, the central components of the monitoring system should be duplicated in geographically distant data centers.

Effective proactive monitoring and adaptive management of information service quality in DICS rely on continuous improvement and extension of the monitoring infrastructure. As networks grow in scale and complexity, new technological solutions and architectural models become relevant to handle emerging challenges.

By placing data preprocessing and partial analytics (e.g., anomaly detection) at edge or fog nodes, the system can reduce the load on central servers and minimize latency.

Deploy monitoring agents across multiple public or private cloud providers, enabling unified visibility into distributed workloads. Harmonize telemetry formats (e.g., OpenTelemetry) to collect data consistently regardless of the cloud platform. Use federated learning or distributed AI techniques to train and improve anomaly detection models across different cloud environments without transferring raw data.

Incorporate deeper neural network architectures (LSTM, GRU, Transformers) for more accurate forecasting of network load and resource utilization. Apply reinforcement learning for dynamic adaptation strategies, where the monitoring system optimizes its own decision-making policies based on real-time feedback. Improves trust and transparency for operators managing critical infrastructure.

Extend the monitoring system to collect and analyze security-related telemetry (intrusion attempts, unexpected port scans, lateral movement in the network). Correlate security metrics with performance data to detect malicious traffic patterns that also affect QoS (e.g., DDoS attacks). Combine anomaly detection with network policy enforcement tools (firewalls, intrusion prevention systems) to isolate compromised nodes or throttle suspicious traffic. Implement runbooks or playbooks that trigger automated mitigation steps based on predefined security thresholds.

Adopt tools like Terraform or Ansible to define and manage monitoring environments, enabling repeatable and version-controlled deployments. Automate scaling of monitoring agents or central servers in response to usage spikes or newly deployed services. By extending the proposed monitoring system with edge/fog processing, advanced AI techniques, and multi-cloud orchestration, organizations can achieve even higher levels of agility, resilience, and efficiency in managing distributed ICS. Incorporating enhanced security metrics, self-healing mechanisms, and robust disaster recovery strategies will further solidify the system's reliability and responsiveness.

The IMS platform, operating at the core network level, is a key architecture enabling Voice over LTE (VoLTE) and other IP-based multimedia services. It consists of critical components responsible for session control, subscriber authentication, and media handling. These components function at various sublevels within the core network:

1. Session control is managed by the Call Session Control Function (CSCF), which operates at the application signaling level.
2. Subscriber authentication is handled by the Home Subscriber Server (HSS), functioning at the database level.
3. Media handling is performed by the Media Resource Function (MRF), which operates at the media processing level.

Given the critical role IMS plays in delivering VoLTE and multimedia services, it is essential to implement robust firewalls to safeguard the network against unauthorized access, cyberattacks, and service disruptions. Firewalls, deployed at the network level, particularly at the perimeter and between network segments, are crucial for protecting the IMS platform's core infrastructure from external threats. They filter incoming and outgoing traffic, ensuring that only legitimate traffic is allowed while blocking potentially malicious activity. Firewalls also provide essential protection for sensitive subscriber data and critical IMS components like the HSS and MRF, maintaining both privacy and service reliability.

In addition to firewalls, a notification system, operating at the application level, plays a vital role in network management by providing real-time alerts in the event of significant deviations from normal operating conditions or critical system failures. When key QoS parameters or network events exceed predefined thresholds, the system sends notifications via various channels such as

email, SMS, or push alerts. This allows network operators to be immediately informed of potential issues, enabling quick intervention and minimizing service disruptions. Furthermore, external scripts can be automatically triggered in response to these alerts, activating predefined mechanisms to control or mitigate the impact of the issues. For example, if a surge in packet loss or latency is detected, scripts may be executed to reroute traffic, adjust resources, or activate backup systems, ensuring the network continues to perform optimally even during periods of stress.

To complement this security layer, Vodafone employs a sophisticated notification system, functioning at the application level, to continuously monitor its network. In the event of deviations from expected QoS parameters (e.g., high latency, packet loss, or jitter spikes), the system triggers immediate alerts via multiple channels such as email, SMS, and push notifications to the operations team.

For example, in the case of a major mobile operator, parameters such as latency, jitter, packet loss, and throughput are continuously monitored to assess network performance. These metrics are measured at the transport level of the network. Operators often use regression models like linear and polynomial regression to identify trends, such as gradual increases in latency, allowing them to anticipate potential issues and optimize network resources.

Time series models such as ARIMA and SARIMA are employed to account for seasonal variations, such as daily or weekly traffic cycles. These models help telecom operators refine their predictions, making them more accurate for specific time frames. Machine learning techniques, including neural networks, Random Forest, and XGBoost, are increasingly used to capture complex, non-linear relationships between network parameters. They offer an advantage in predicting unexpected situations, such as sudden spikes in traffic or network congestion, which would otherwise be difficult to foresee using traditional methods.

Additionally, statistical thresholds are set for each QoS parameter (e.g., mean, standard deviation), and the system is programmed to trigger alerts whenever these limits are exceeded, signaling potential issues that could affect service quality. Clustering methods like K-means and DBSCAN are used to detect outliers, with any metrics that deviate significantly from typical patterns flagged as anomalies. These anomalies can indicate a network fault or congestion event, enabling operators to take preemptive action. For more precise anomaly detection, distance-based

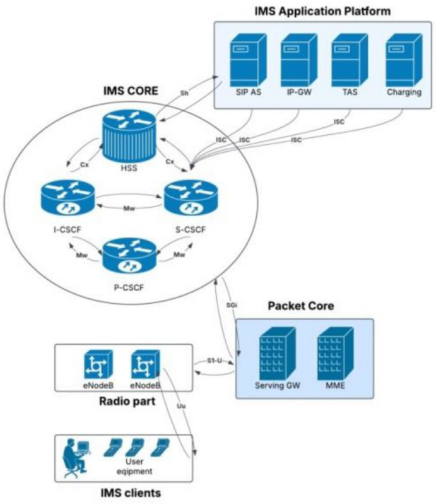


Fig. 4. The typical scheme of IMS

methods like Mahalanobis distance and Isolation Forest can be employed to identify data points or subsets that exhibit atypical behavior.

In a live operator environment, such as telecommunications networks, redundancy and fault tolerance play a key role in ensuring high availability, reliability, and performance. To achieve this, monitoring systems are duplicated across data centers located in different geographic regions. A telecom operator may have data centers, for example, in New York, Los Angeles, and Frankfurt, where identical instances of the monitoring system operate, including components for data collection, processing, and notification delivery. This setup ensures that if one data center fails – due to a power outage, network disruption, or natural disaster – the monitoring system automatically switches to another data center. Load balancers, such as HAProxy or Google Cloud Load Balancing, distribute incoming monitoring traffic across these data centers, taking into account latency, health checks, and available capacity, reducing the risk of a single point of failure and ensuring continuous network monitoring.

Fault tolerance is further enhanced by automatically launching backup instances for critical components. Monitoring systems utilize modular containerized components, such as data collectors, analytics engines, and alerting modules, which are managed through orchestration tools like Kubernetes. This tool continuously monitors the state of containers using liveness and readiness probes. For instance, if the virtual machine running the analytics engine for processing latency data fails, Kubernetes detects the issue and restarts the container, minimizing downtime and ensuring uninterrupted user service.

Proactive network management is also a key advantage of monitoring systems, as they continuously track key performance indicators such as latency, jitter, packet loss, and bandwidth. Monitoring agents installed on network devices – routers, switches, and base stations – send real-time metrics to the monitoring system using protocols like SNMP or streaming telemetry, such as gRPC and OpenTelemetry. This data is stored in time-series databases like InfluxDB or Prometheus, allowing efficient querying and visualization through tools such as Grafana. Alerting rules are configured to send notifications when predefined thresholds are exceeded – for example, if latency surpasses 100 ms for five minutes, the on-call team receives an alert via PagerDuty. This continuous monitoring helps detect early signs of network degradation before they affect users. If, for instance, latency on a particular network path begins to rise, the monitoring system triggers an alert, allowing operators to reroute traffic to less congested paths and prevent customer complaints about dropped connections or slow internet speeds.

Additionally, monitoring systems provide real-time insights to ensure stable and high-quality service. Machine learning models integrated into monitoring pipelines predict traffic spikes or anomalies. Automation tools like Ansible or Terraform execute predefined scripts based on this data – if, for instance, tower bandwidth usage exceeds 80 %, additional resources are allocated automatically. This proactive approach allows telecom operators to maintain stable and high-quality service even during peak load periods while adhering to service level agreements (SLAs).

In the case of Vodafone, ensuring optimal QoS is essential for maintaining the reliability of their voice and multimedia services, especially in a highly competitive market. The operator consistently monitors key QoS parameters like latency, jitter, packet loss, and throughput to ensure a seamless experience for its users.

Vodafone also leverages time series models such as ARIMA and SARIMA to account for daily and weekly traffic cycles, which are critical for managing network load during peak times. In addition to these traditional methods, Vodafone has incorporated advanced machine learning techniques, such as neural networks and XGBoost, to better handle non-linear dependencies in network traffic.

To detect performance anomalies, Vodafone employs clustering techniques like K-means and DBSCAN, identifying any metrics that deviate significantly from typical patterns. This enables the company to spot potential issues early, such as network outages or sudden drops in service quality. Advanced anomaly detection methods, including Mahalanobis distance and Isolation Forest, are used to pinpoint specific instances where network behavior falls outside expected norms, allowing for faster issue resolution.

Vodafone also emphasizes redundancy and fault tolerance in its monitoring systems. To ensure uninterrupted service, they replicate critical components across geographically diverse data centers.

1. Real-Time Traffic Rerouting. Vodafone's monitoring systems continuously analyze network congestion levels. If a particular network path experiences excessive latency or packet loss, traffic is dynamically rerouted through alternative, less congested routes.

2. Proactive Network Maintenance. By integrating predictive analytics, Vodafone can anticipate hardware failures in critical infrastructure such as base stations and fiber optic links. For example, if a base station starts showing a gradual increase in error rates or unusual temperature spikes, preemptive maintenance can be scheduled to prevent potential outages.

3. Optimized Video Streaming Performance. Using real-time telemetry data, Vodafone adjusts video streaming bitrates based on network conditions. If the system detects high congestion in a region, it dynamically reduces the resolution of video streams to prevent buffering, ensuring a smooth user experience.

4. Load Balancing in Cloud Infrastructure. Vodafone's cloud-based services leverage load balancers like HAProxy and Google Cloud Load Balancing to distribute traffic among multiple servers. If one server cluster experiences high CPU or memory usage, new sessions are redirected to underutilized servers to maintain consistent performance.

5. Emergency Response Management. In the event of natural disasters or large-scale network failures, Vodafone's monitoring system prioritizes emergency communications by allocating additional network resources to first responders. This ensures that critical services remain operational even under extreme conditions.

6. Customer Experience Enhancement through AI-Driven Support. AI-driven monitoring tools analyze customer complaints related to network quality and correlate them with real-time performance data. If multiple complaints arise from a specific area, Vodafone's system automatically triggers an investigation, allowing for faster resolution of service issues.

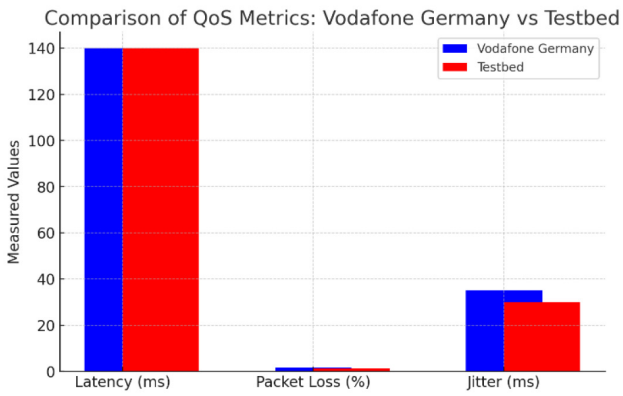


Fig. 5. Comparison of QoS Metrics

By employing a combination of predictive analytics, machine learning, and robust infrastructure, Vodafone ensures a consistently high level of QoS for its users while proactively addressing network challenges in real time.

To evaluate the QoS of the IMS platform, multiple test scenarios were executed under controlled conditions. End-to-end testing was performed by initiating VoLTE calls between test devices while monitoring key performance indicators such as call setup time, voice clarity, and connection stability. Load testing involved simulating thousands of concurrent calls and data sessions to observe system behavior under peak traffic. Packet-level analysis was conducted using Wireshark, capturing real-time traffic to measure latency, jitter, and packet loss.

To illustrate real-world QoS challenges, we analyzed Vodafone VoLTE network performance. During peak hours, call setup time increased by 3 %, reaching 310 ms, slightly exceeding the 300 ms threshold. Packet loss under heavy load rose to 1.5 %, affecting voice clarity. Network logs showed that congestion primarily occurred at eNodeB backhaul links. Using the formula for Packet Loss Rate (PLR):

$$PLR = \left(\frac{LP}{T}\right) \cdot 100, \qquad (1)$$

where LP – Lost Packets; T– Total Packets sent

For a stress test with 10 million packets sent and 150,000 lost packets, the calculated PLR was 1.5 %. Comparing our testbed results with Vodafone real-world data:

1. Latency remained stable in both cases, averaging 140 ms.
2. Packet loss exceeded thresholds (1.5 % vs. 1.2 %), suggesting bottlenecks in high-load scenarios.
3. Jitter spikes (Vodafone: 35 ms, Lab: 30 ms) were noticeable but tolerable.

To assess the impact on call quality, Hammer Call Analyzer measured parameters like MOS (Mean Opinion Score) and call drop rates during peak load periods. Advanced machine learning models, specifically Long Short-Term Memory (LSTM) networks, were trained on historical network data to predict congestion events and optimize resource allocation dynamically. These AI-driven insights allowed for real-time adjustments in the network configuration, improving QoS by proactively managing capacity and mitigating performance degradation, ensuring a seamless VoLTE experience for Vodafone's users.

The data from the stress test with 100,000 concurrent calls reveals several important insights into the performance of the network under heavy load. Below is a more detailed analysis based on the metrics provided:

1. The CSSR is slightly below the expected value, indicating a small number of failed call setups under stress. Although 98.5 % is a high success rate, this small degradation may result in some users experiencing issues when trying to initiate calls during peak times. This metric is critical for user experience, and while it is still acceptable in most cases, attention should be given to optimizing network resource allocation to reduce call setup failures during high demand.
2. Under normal conditions, the packet loss rate is within acceptable limits, but during the stress test, packet loss increased to 1.2 %, slightly exceeding the expected threshold. This suggests that the network is experiencing congestion under heavy load, leading to packet loss. Although this is marginally above the threshold, it indicates a potential area for optimization. Packet loss above 1 % can have a significant impact on service quality, especially for VoLTE calls, leading to audio dropouts or poor call quality.
3. The average call setup time is within the acceptable range, even under load. A 2 % increase in call setup time under stress is well within operational limits, suggesting that the network is managing to

Table 2

Performance Metrics

Metric	Call Setup Success Rate (CSSR)	Packet Loss Rate	Average Call Setup Time	Jitter	Latency	System Throughput
Expected Value	>99 %	<1 %	<300 ms	<30 ms	<150 ms	>1 Gbps
Measured Value	98.5 %	0.8 %	280 ms	25 ms	140 ms	1.2 Gbps

handle the load efficiently in terms of call initiation. However, it is important to continue monitoring this parameter as increased traffic may eventually lead to higher delays.

4. Jitter remains within acceptable limits during normal operation. However, during the stress test, occasional spikes in jitter beyond 30ms were observed. While jitter in itself is not an immediate concern, these spikes can lead to noticeable issues in voice quality during calls. VoLTE traffic is particularly sensitive to jitter, and periodic fluctuations can degrade user experience by causing choppy audio or dropped calls. This suggests a need for further optimization to mitigate jitter during peak periods.

5. Latency remains stable and within the acceptable limits even under stress. The network has shown resilience in handling the increased traffic without experiencing excessive delays in packet transmission. While latency is well within the threshold, periodic monitoring of the network infrastructure is necessary to ensure it remains stable during prolonged periods of high traffic.

6. In the case of Vodafone, ensuring optimal QoS is essential for maintaining the reliability of their voice and multimedia services, especially in a highly competitive market. The operator consistently monitors key QoS parameters like latency, jitter, packet loss, and throughput to ensure a seamless experience for its users. For instance, Vodafone uses linear and polynomial regression models to track trends in latency and identify gradual increases that could indicate network stress. By analyzing these trends, Vodafone can predict potential bottlenecks and take corrective action before they impact customers.

Even under load, the network maintained throughput above 1 Gbps, ensuring that data-intensive applications can function without significant degradation. To improve QoS during high traffic periods, implementing traffic prioritization mechanisms such as DiffServ or MPLS can help manage network resources more efficiently. These protocols enable better differentiation of traffic types, ensuring that critical services like VoLTE receive higher priority and are less likely to be affected by congestion. Addressing packet loss requires further capacity planning, particularly during peak periods, which may involve upgrading hardware such as routers and switches or allocating additional bandwidth to prevent congestion. Proactive bandwidth monitoring tools should be employed to detect potential congestion points before they impact performance.

Introducing dynamic and adaptive QoS policies based on real-time network load can optimize resource allocation. By leveraging real-time data on network conditions such as traffic volume, load distribution, and QoS parameters, the network can adjust its policies dynamically to ensure optimal service quality. For example, during periods of high load, the system could automatically allocate more resources to maintain call quality, while during low-load periods, resources could be reallocated to other services. While jitter remains within acceptable limits in most cases, occasional spikes suggest the need for jitter mitigation strategies. Techniques such as buffer management, prioritization of VoLTE traffic, and improving network resilience can help reduce jitter during peak periods. Additionally, investing in network infrastructure that reduces congestion and improves packet delivery consistency can help keep jitter levels within desired thresholds.

Continuous monitoring should be implemented for all key QoS parameters, especially under heavy traffic conditions. This could include re-routing traffic, adjusting network configurations, or alerting the network operations team to potential problems. While the network performs well under most conditions, critical areas such as packet loss, jitter, and dynamic traffic handling require optimization to maintain a consistently high-quality user experience, particularly during high-demand periods.

Conclusions. This paper presents the development of a multi-level monitoring system for distributed information and communication systems (DICS), which includes telemetry agents, centralized data storage, and real-time analysis tools. By integrating technologies such as machine learning, edge/fog computing, and automated orchestration, the system ensures high QoS even under dynamic network conditions. The integration of advanced features like anomaly detection and adaptive resource management highlights the system's ability to maintain a high level of Quality of Service (QoS) while reducing operational costs.

By detecting malicious activities such as DDoS attacks and integrating with firewalls and threat detection modules, the system ensures that security incidents are identified and mitigated in real-time. This proactive defense not only protects the network but also minimizes disruptions, ensuring continuous service availability.

This enables the detection of potential issues early, such as network outages or sudden drops in service quality. Advanced anomaly detection methods, including Mahalanobis distance and Isolation Forest, are used to pinpoint specific instances where network behavior falls outside expected norms, allowing for faster issue resolution.

The analysis of the IMS platform in the context of a telecom system has provided valuable insights into the performance, security, and reliability of VoLTE services. The study examined key aspects such as Quality of Service (QoS) parameters, security mechanisms, and automated notification systems to ensure a seamless user experience. The findings highlight the importance of continuous monitoring, predictive analysis, and proactive network management in maintaining high service quality.

The implementation of these security mechanisms ensures the integrity of critical components like the Home Subscriber Server (HSS) and Media Resource Function (MRF). Key QoS parameters, including latency, jitter, packet loss, and throughput, were analyzed using statistical and machine learning models. Regression models, time series forecasting, and clustering methods help identify performance trends and detect anomalies. These techniques enhance the ability to optimize network performance and anticipate congestion before it affects end-users.

The study included end-to-end VoLTE call testing, load testing, and packet-level analysis using tools like Wireshark. Performance degradation was observed during peak traffic periods, particularly in packet loss and jitter. Stress testing confirmed that under heavy loads, network congestion primarily occurs at the eNodeB backhaul links. The system met most KPIs but showed slight degradation under peak conditions. The call setup success rate was slightly below the expected threshold. Packet loss exceeded the 1 % limit under heavy load. Jitter occasionally spiked beyond the 30ms threshold, while latency remained within acceptable limits. System throughput exceeded expectations, ensuring sufficient capacity for handling network traffic. IMS-based VoLTE networks meet most QoS standards, though peak traffic can cause slight degradation. Proactive monitoring and dynamic resource management are essential for sustaining high service quality, especially in the context of 5G development.

Bibliography:

1. ITU-T Recommendation E.800 (Rev. 09/2008). Definitions of terms related to quality of service. International Telecommunication Union, 2008.

2. NetFlow services and applications white paper. Cisco, 2004.

3. Kumar B., Krishnamurhty A., Mohan R. M. Machine learning based presaging technique for multi-user utility pattern rooted cloud service negotiation for providing efficient service. *2020 2nd international conference on innovative mechanisms for industry applications (ICIMIA)*, Bangalore, India, 5–7 March 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/icimia48430.2020.9074895

4. Peleh N., Shpur O., Klymash M. Intelligent detection of ddos attacks in SDN networks. *Lecture notes in electrical engineering*. Cham, 2021. P. 210–222. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-92435-5_12

5. Traffic engineering and QoS/QoE supporting techniques for emerging service-oriented software-defined network / M. Beshley et al. *Journal of Communications and Networks*. 2024. Vol. 26, no. 1. P. 99–114. URL: https://doi.org/10.23919/jcn.2023.000065

6. Abeykoon V. L., Fox G. C., Kim M. Performance Optimization on Model Synchronization in Parallel Stochastic Gradient Descent Based SVM. *2019 19th IEEE/ACM International Symposium on Cluster, Cloud and Grid Computing (CCGRID)*, Larnaca, Cyprus, 14–17 May 2019. 2019. URL: https://doi.org/10.1109/ccgrid.2019.00065.

7. Concept of intelligent detection of ddos attacks in SDN networks using machine learning / M. Klymash et al. *2020 IEEE international conference on problems of infocommunications. science and technology (PIC S&T)*, Kharkiv, Ukraine, 6–9 October 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/picst51311.2020.9467963

Бобик Ю. В., Шпур О. М. РОЗРОБКА КОМПЛЕКСНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ В РОЗПОДІЛЕНИХ ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМАХ

У цій статті розглядаються питання розробки та впровадження комплексного рішення для моніторингу та управління, спрямованого на забезпечення високої якості обслуговування (QoS) у розподілених інформаційно-комунікаційних системах (РІКС). Основна увага приділяється передумовам і технологічним основам, необхідним для раннього виявлення аномалій у роботі мережі та автоматичного перерозподілу ресурсів на різних рівнях інфраструктури – мережевому, обчислювальному та сервісному. Оскільки сучасні РІКС функціонують у дедалі складніших і динамічніших середовищах, підтримка стабільності та якості обслуговування вимагає адаптивних, інтелектуальних і масштабованих рішень.

Запропонована архітектура базується на інтеграції розподілених агентів збору телеметрії, централізованих систем зберігання телеметричних даних та гібридних методів обробки інформації. Ці інструменти працюють разом для аналізу показників продуктивності, таких як затримка, джиттер,

втрата пакетів, завантаження процесора та використання пропускної здатності в режимі реального часу, що дозволяє проактивно реагувати на погіршення продуктивності або перевантаження ресурсів.

Ключовим аспектом системи є її здатність до прийняття рішень і автоматизації, яка досягається завдяки інтеграції з сучасними середовищами оркестрації та управління мережею. Ці середовища забезпечують адаптацію інфраструктури майже в реальному часі на основі аналітичних даних, які надає система моніторингу, що дозволяє реалізовувати механізми самовідновлення, балансування навантаження та аварійного перемикання без участі людини.

Розроблене рішення має модульну структуру та забезпечує сумісність, що дозволяє легко інтегрувати його у вже наявні платформи управління мережею та сервісами. Воно підвищує надійність, відмовостійкість і масштабованість розподілених архітектур, особливо в умовах високого користувацького навантаження, географічної розподіленості, гетерогенного середовища (включаючи хмарні й периферійні обчислення) або жорстких вимог щодо рівня обслуговування (SLA). Завдяки інтелектуальному моніторингу та автоматичній адаптації система забезпечує стабільну якість обслуговування, ефективність роботи та стійкість навіть у разі непередбачуваних пікових навантажень чи кіберзагроз.

Ключові слова: *розподілені ІКС (РІКС), моніторинг, управління якістю обслуговування (QoS), адаптивні алгоритми, аномалії, машинне навчання, масштабування.*

УДК 621.396.946:004.056.53
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/12

Волошин В. О.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Мадінов М. Л.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Бойко О. В.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Мацкевич В. Л.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

Паламарчук В. О.
Державний університет інформаційно-комунікаційних технологій

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ АЛГОРИТМИ КОРЕКЦІЇ ПОМИЛОК У СУПУТНИКОВО-ОПТИЧНИХ МЕРЕЖАХ ДЛЯ ВИСОКОШВИДКІСНИХ ПЕРЕДАЧ ДАНИХ

Стаття присвячена дослідженню інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах, орієнтованих на забезпечення високошвидкісної передач всіх видів даних. Проаналізовано основні фактори, які впливають на поширення оптичного сигналу, зокрема загасання, шумові перешкоди, хроматичну дисперсію, нелінійні ефекти, поляризаційні спотворення та спектральну фільтрацію, а також враховано гетерогенність сучасних оптичних мереж, де різні сегменти ліній характеризуються унікальними параметрами, що ускладнює оптимізацію їхньої роботи. Виявлено, що якість сигналу в процесі лінійного поширення поступово погіршується через накопичення підсиленого спонтанного випромінювання (ASE), яке генерується ербієвими підсилювачами (EDFA). Обґрунтовано, що при відсутності нелінійних спотворень коли базове значення відповідає конфігурації «back-to-back», тоді як у реальних умовах значення OSNR у лінії значно перевищує це значення через «штраф OSNR», зумовлений нелінійною деградацією сигналу, що ускладнює його відновлення. Запропоновано моделювання нелінійних спотворень як адитивного нелінійного шуму, що додається до лінійного шуму, що дозволило сформулювати аналітичні вирази для загальної потужності шуму та зворотного OSNR, які є основою для оптимізації параметрів багатопролітних DWDM-ліній. Розроблено методологію побудови калібрувальних кривих, які забезпечують однозначний зв'язок між OSNR і рівнем бітових помилок (BER), а також принцип локальної оптимізації, який веде до глобального покращення характеристик системи, зокрема через визначення оптимальної потужності для кожного прольоту. Оцінено ефективність IGN-моделі адитивного нелінійного шуму, яка довела свою доцільність для проектування високошвидкісних ліній зв'язку, хоча її точність залежить від попереднього вимірювання коефіцієнтів нелінійності. Експериментально досліджено характеристики ліній за допомогою спеціальної установки, що включає BER-тестер, транспондери, мультиплексори, демультиплексори та ербієві підсилювачі, що дозволило встановило відхилення розрахункових значень OSNR від експериментальних, підтвердивши високу точність е-моделі.

Ключові слова: *інтелектуальні алгоритми, корекція помилок, супутниково-оптичні мережі, високошвидкісна передача даних, нелінійні спотворення, оптичне відношення сигнал/шум (OSNR).*

Постановка проблеми. Сучасний розвиток інформаційного суспільства, масова цифровізація всіх сфер життєдіяльності, а також впровадження інноваційних технологій зв'язку, сприяють стрімкому зростанню обсягу переданої інформації та підвищенню вимог до швидкості її обробки й доставки у високошвидкісних оптичних мережах. Відповідно до сучасних тенденцій розвитку телекомунікаційної інфраструктури, збільшення пропускної здатності оптичних каналів є одним із ключових завдань, що вирішується шляхом поступового переходу від традиційних систем далекого зв'язку з канальною швидкістю 10 Гбіт/с, які використовують амплітудну модуляцію, до коге-

рентних систем зв'язку, здатних працювати на швидкостях 100 Гбіт/с і вище.

Однією з головних проблем, які виникають під час збільшення пропускної здатності оптичних мереж, є суттєве погіршення якості сигналу через накопичення шумів оптичних підсилювачів, а також виникнення лінійних і нелінійних спотворень під час передавання інформації. Такого формату явища значно ускладнюють забезпечення стабільності зв'язку та вимагають впровадження передових методів обробки даних для корекції помилок. У зв'язку з цим методи корекції помилок (Forward Error Correction, *FEC*) та цифрова обробка сигналів відіграють вирішальну роль у сучасних високошвидкісних системах зв'язку, оскільки вони дозволяють підвищити якість передавання інформації, знизити вартість обладнання та оптимізувати експлуатаційні витрати [6, 13]. Розвиток інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах дозволяє вирішити низку зазначених проблем, використовуючи методи машинного навчання та адаптивні алгоритми обробки сигналів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наукові дослідження зосереджені на вдосконаленні методів передачі даних, спрямованих на зменшення впливу фізичних спотворень та підвищення ефективності виправлення помилок. У наукових роботах [7, 11] детально аналізуються такі ключові проблеми, як загасання сигналу, хроматична дисперсія та поляризаційні ефекти, які суттєво впливають на якість передачі інформації в оптичних лініях зв'язку.

Результати аналізу останніх досліджень [1, 8] демонструють, що традиційні методи фізичної компенсації дисперсії поступово втрачають свою актуальність, поступаючись місцем когерентним системам зв'язку без компенсації дисперсії (NDC-лінії). У таких системах основним інструментом для боротьби зі спотвореннями є цифрова обробка сигналів.

Перспективним напрямом у вдосконаленні супутниково-оптичних мереж є розвиток інтелектуальних методів обробки сигналів, зокрема використання алгоритмів машинного навчання для корекції помилок, що активно обговорюється у працях [5, 14]. Дослідження підтверджують, що адаптивні алгоритми, здатні аналізувати та прогнозувати спотворення в режимі реального часу, значно підвищують ефективність роботи оптичних мереж і забезпечують зниження рівня помилок. Отже, провідні наукові опубліковані результати підкреслюють доцільність і необхідність продовження розробок в сфері компенсації нелінійних ефектів та впровадження інтелектуальних алгоритмів виправлення помилок в функціонуванні супутниково-оптичних мереж.

Постановка завдання. Метою статті є розробка та обґрунтування широкого використання алгоритмів інтелектуальної корекції можливих помилок в роботі супутниково-оптичних мереж, для забезпечення надійності високошвидкісної передачі даних.

Виклад основного матеріалу. Проектування ефективних та економічно доцільних оптичних мереж із високими швидкостями передавання даних є складним багатофакторним завданням, оскільки фізичні процеси, що впливають на розповсюдження інформаційного сигналу, залежать від багатьох параметрів. Серед основних проблем можна виділити загасання сигналу, вплив шумів, хроматичну дисперсію, нелінійні ефекти, поляризаційні спотворення та спектральну фільтрацію. Крім того, сучасні оптичні мережі стають усе більш гетерогенними: різні сегменти ліній можуть містити оптичні канали з різними характеристиками, що ускладнює вибір оптимальних параметрів системи [2].

У процесі лінійного поширення оптичного сигналу його якість поступово погіршується через накопичення шумів, зокрема підсиленого спонтанного випромінювання (*ASE*), що генерується ербієвими оптичними підсилювачами (*EDFA*). Дальність передачі даних у супутниково-оптичних мережах є обмеженою, оскільки збільшення потужності шуму *ASE* спричиняє зниження оптичного відношення сигнал/шум у лінії ($ON+$), і при досягненні граничної дальності цей показник наближається до критично допустимого рівня ($ON-$). За відсутності нелінійних спотворень ($ON-$) відповідає значенню $ON + B$, яке визначається для випадку прямого з'єднання передавача з приймачем у конфігурації back-to-back [12]. Лінійні спотворення, такі як хроматична дисперсія та поляризаційна модова дисперсія, мають мінімальний вплив на ефективність роботи когерентних систем зв'язку, оскільки такі перешкоди компенсуються на рівні цифрової обробки сигналу у когерентному приймачі (рис. 1).

Однак у реальних умовах значення ($ON-$) в оптичній лінії часто виявляється значно вищим, ніж $ON + B$, що призводить до виникнення так званого «штрафу по *OSNR*» – різниці між цими двома параметрами, вираженої в децибелах. Основною причиною цього явища є деградація оптичного сигналу під впливом нелінійних ефек-

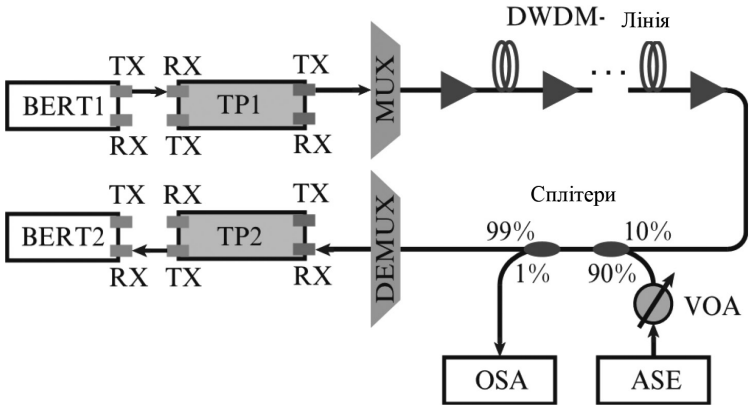


Рис. 1. Схема діючої установки для дослідження інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у супутниково-оптичних мережах із використанням DWDM-лінії (удосконалено автором)

тів, які істотно спотворюють передану інформацію та ускладнюють її відновлення на приймальному боці.

Природа нелінійних ефектів у супутниково-оптичних лініях зв'язку залежить від того, чи використовується фізична компенсація дисперсії. У традиційних системах, що включають компенсатори дисперсії (*DC*-лінії), нелінійні ефекти виявляються головним чином у вигляді викривлень переданих оптичних сигналів, що ускладнює корекцію помилок та ефективне відновлення інформації. У той же час у сучасних когерентних мережах, які не використовують компенсацію дисперсії на фізичному рівні (*NDC*-лінії), механізм нелінійної деградації сигналу відрізняється – і відбувається накопичення нелінійного інтерференційного шуму, який поступово ускладнює корекцію помилок і призводить до значного зниження ефективності системи [3, 9].

Нелінійні спотворення можна змоделювати як нелінійний шум, який додається до лінійного шуму в адитивний спосіб, то загальна потужність шуму в оптичній лінії зв'язку буде виражена через суму потужностей цих двох компонентів, що позначається як:

$$PS = PASE + PNL. \quad (1)$$

Розглядаючи це співвідношення детальніше, якщо обидві частини поділити на потужність сигналу P у певній точці лінії, отримуємо вираз:

$$\frac{1}{ON+B} = \frac{1}{(ON-)} + \frac{1}{ON+R}, \quad (2)$$

де величина $ON + B$, яка визначається як відношення P до PS, відображає рівень бітових помилок (*BER*), який вимірюється транспондером до того, як він розпочне процес корекції помилок, причому взаємозв'язок між $ON + R$ і *BER* у даній моделі є однозначним і описується за допомогою калібрувальної кривої транспондера, що являє собою експериментально отриману залежність логарифма *BER* від $ON + R$ у лінійному режимі роботи лінії, коли внесок нелінейного шуму *PNL* дорівнює нулю, а отже, $ON + R$ збігається з $ON+$ (рис. 2).

Наведена калібрувальна крива відіграє ключову роль у визначенні $ON + R$ у нелінейному режимі на основі виміряного рівня *BER*, причому методика її побудови детально викладена у відповідному розділі дослідження. Для аналізу багатопролітної *DWDM*-лінії, яка застосовується в супутниково-оптичних мережах, зручно ввести певні позначення, розбиваючи умовно лінію на N секцій, кожна з яких включає відрізок оптичного волокна та ербієвий підсилювач, а також характеризується такими параметрами, як потужність сигналу на вході в волокно (Pn), оптичні втрати у волокні (An), коефіцієнт нелінейності (ηn), коефіцієнт підсилення (Gn) і шумовий фактор підсилювача (Fn) для n-ї секції [4]. Оскільки *ASE*-шум

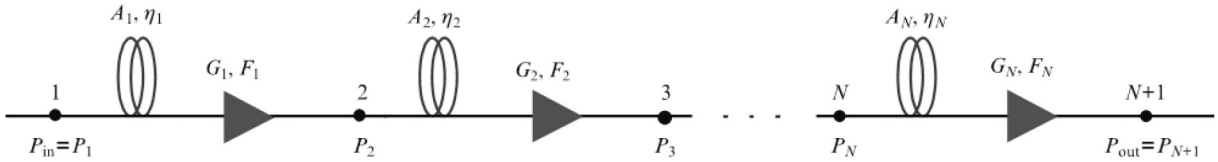


Рис. 2. Схема багатопролітної оптичної лінії з параметрами компонентів і сигналу для дослідження інтелектуальних алгоритмів корекції помилок для супутниково-оптичних мереж із підсилювачами EDFA (удосконалено автором)

від різних ербієвих підсилювачів складається адитивно, вираз для сумарного зворотного *OSNR*, обумовленого цим шумом, набуває вигляду першого доданку у відповідному співвідношенні, що враховує внесок кожного підсилювача в загальну картину шумових характеристик лінії.

$$Pn = \left(\frac{h\nu \times B \times An \times Fn}{2\eta n} \right). \quad (3)$$

Припускаючи, що нелінейний шум від різних прольотів також додається адитивно, з урахуванням попередніх співвідношень можна отримати прості аналітичні вирази для зворотного нелінейного *OSNR* у багатопролітній лінії, які є надзвичайно зручними для обчислень і оптимізації параметрів зв'язку в таких системах, як супутниково-оптичні мережі. Таким чином, $ON + R$ у цій моделі визначається через відповідну формулу, яка стає основою для проектування та оптимізації ліній зв'язку, де задача зводиться до пошуку мінімуму функції зворотного $ON + R$ при варіюванні значень потужностей Pn за фіксованих значень An, ηn, Gn і Fn, причому з цього випливає принцип локальної оптимізації, який веде до глобального покращення характеристик системи, дозволяючи аналітично вивести оптимальну потужність для кожного прольоту, при якій досягається найменше значення зворотного $ON + R$.

Вся модель, відома як *IGN*-модель адитивного (некогерентного) нелінейного шуму, виявляється надзвичайно корисною для розробки високошвидкісних ліній зв'язку в супутниково-оптичних мережах, і її доцільно застосовувати завжди, коли вона забезпечує необхідну точність прогнозування, хоча для практичного використання необхідно попередньо виміряти або розрахувати коефіцієнти нелінейності ηn для кожного прольоту, враховуючи, що кореляція між нелінейними спотвореннями, які виникають у різних прольотах, може знижувати точність цієї адитивної моделі [4].

Експериментальна частина роботи зосереджена на проведенні серії вимірювань, які спрямовані на визначення нелінейних коефіцієнтів h оптичних прольотів та інших констант, що входять до аналітичних формул для обчислення ключових параметрів ліній зв'язку, причому схема експериментальної установки, зображена на відповідному рисунку, включає такі компоненти, як *BER*-тестер (*BERT*), когерентний транспондер (*TP*), мультиплексор і демультиплексор (*MUX* і *DEMUX*), вхідний та вихідний ербієві підсилювачі (*EDFAin* і *EDFAout*), що функціонують у режимі постійної вихідної потужності, а також багатосекційний макет *DWDM*-лінії, який складається з котушок одномодового оптичного волокна з певними втратами (*An*) і ербієвих підсилювачів (*EDFAn*), налаштованих на режим постійного коефіцієнта підсилення, разом із джерелом підсиленого спонтанного випромінювання (*ASE*), оптичним спектральним аналізатором (*OSA*), перебудовуваними оптичними атенюаторами (*VOAin* і *VOAASE*) та спліттерами з різними коефіцієнтами розподілу сигналу (рис. 3).

Для побудови калібрувальних кривих, які є важливим інструментом у процесі аналізу, частина лінії зв'язку, позначена на схемі в квадратних дужках, замінювалася коротким відрізком волокна, відомим як патчкорд довжиною до

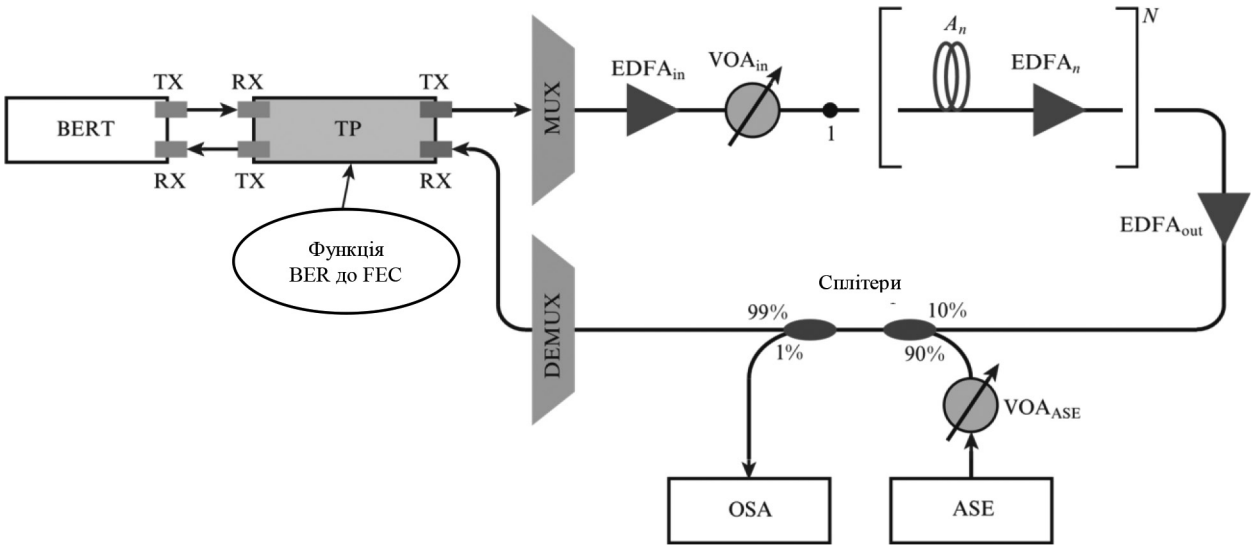


Рис. 3. Схема експериментальної установки для визначення калібрувальних кривих транспондерів та нелінейних параметрів лінії зв'язку при введенні інтелектуальних алгоритмів корекції помилок у роботі супутниково-оптичних мереж (розроблено автором)

3 метрів, при цьому за допомогою атенюатора *VOAASE* змінювалася потужність додаткового *ASE*-шуму, що дозволяло транспондеру вимірювати рівень бітових помилок (*BER*), тоді як спектральний аналізатор визначав величину *ON*+, яка в конфігурації back-to-back збігається з *ON* + *R*.

У процесі визначення коефіцієнта нелінейності для багатопролітної лінії джерело *ASE*-шуму вимикалося, а залежність *BER* від вхідної потужності Pin у певній точці вимірювалася шляхом зміни цієї потужності за допомогою цифрового атенюатора *VOAin*, який відображав величину внесених втрат, причому попередньо проводилося вимірювання потужності в цій точці за допомогою OSA, тоді як підсилювачі *EDFAn* працювали в режимі постійного коефіцієнта підсилення, налаштованого для компенсації втрат у прольотах довжиною 100 км, що забезпечувало однакову вхідну потужність *Pin* для всіх сегментів, а підсилювач *EDFAout*, навпаки, підтримував постійну вихідну потужність для оптимального сигналу на вході в транспондер [2, 10].

На кожному етапі вимірювань також фіксувалася величина *OSNR* у лінії за допомогою *OSA*, що дозволяло побудувати залежність зворотного нелінейного *OSNR* ($OSNR\text{-}NL^{-1}$) від квадрата вхідної потужності Pin^2, де коефіцієнт нелінейності h визначався як тангенс кута нахилу цієї залежності, приклад якої для однопрольотної лінії наведено на рис. 3. Для перевірки математичного апарату проводилися експериментальні вимірювання характеристик різних конфігурацій ліній, які потім порівнювалися з результатами, отриманими розрахунковим шляхом, і було встановлено, що відхилення розрахункових значень необхід *OSNR* від експериментальних перебувають у заданому діапазоні, зокрема позитивне відхилення коливається від 0,12 до 0,76 дБ, а для ліній із прольотами довжиною 100 км параметр e варіюється в межах 0,2–0,3, що свідчить про високу точність *e*-моделі в прогнозуванні характеристик ліній зв'язку в супутниково-оптичних мережах.

Висновки. У ході дослідження було проаналізовано ефективність традиційних методів виправлення помилок у системах з різними архітектурними підходами, зокрема в когерентних мережах без компенсації дисперсії (*NDC*-лініях) та системах із фізичними компенсаторами дисперсії (*DC*-лініях). Досліджено залежність рівня бітових помилок (*BER*) від оптичного співвідношення сигнал/шум (*OSNR*) у різних мережевих конфігураціях та обґрунтовано доцільність використання інтелектуальних алгоритмів виправлення помилок для підвищення надійності та стабільності передачі інформації.

На основі практичних та експериментальних даних удосконалено модель нелінійного шуму, яка дає змогу прогнозувати ефективність роботи супутниково-оптичних ліній зв'язку при зміні потужності сигналу та інших параметрів системи. Запропоновано новий підхід до адаптивного виправлення помилок із застосуванням інтелектуальних алгоритмів, що базуються на методах машинного навчання та цифрової обробки сигналів, що формує перспективу компенсації впливу нелінійних спотворень і суттєво знизити рівень помилок під час високошвидкісної передачі даних.

Список літератури:

1. Божеску В., Стринадко М. Оптичні рішення для передачі даних у системах зв'язку 6G. *Молодий вчений*. 2024. № 7(131). С. 8–14. DOI: https://doi.org/10.32839/2304-5809/2024-7-131-7

2. Ільченко М. Ю., Наритник Т. М., Присяжний В. І., Капштик С. В., Матвієнко С. А. Низькоорбітальна супутникова система інтернету речей на базі розподіленого супутника. *Космічна наука і технологія. 2020*. 26, № 4(125). С. 57–85. https://doi.org/10.15407/knit2020.04.057

3. Македон В. В., Байлова О. О. Планування і організація впровадження цифрових технологій в діяльність промислових підприємств. *Науковий вісник Херсонського державного університету. Серія «Економічні науки»*. 2023. Випуск 47. С. 16–26. DOI: 10.32999/ksu2307-8030/2023-47-3

4. Руденко В. І., Зінченко М. О., Яковчук О. В., Лазута Р. Р. Модель системи супутникового зв'язку та передачі даних спеціального призначення. *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони. 2024*. № 1(49). С. 45–58. DOI: https://doi.org/10.33099/2311-7249/2024-49-1-45-58

5. Atayev N., Hasanov M. High-speed data transmission in LEO satellite networks with free space optics-based transponder and 3D switch model. In: *Proceedings of the 2023 IEEE 17th International Conference on Application of Information and Communication Technologies (AICT)*. 2023 Oct 18-20; Baku, Azerbaijan. IEEE; 2023. DOI: https://doi.org/10.1109/AICT59525.2023.10313187

6. Avanesova N., Tahajuddin S., Hetman O., Serhiienko Y., Makedon V. Strategic management in the system model of the corporate enterprise organizational development. *Economics and Finance*. 2021. № 1/2021. Vol. 9. pp. 18–30. DOI: 10.51586/2311-3413.2021.9.1.18.30

7. Chaudhary S., Meng Y., Sharma A., Naeem M.A. MIMO and PDM-based intersatellite optical link for high-speed data transfer and remote sensing application. *PLoS ONE*. 2024. Nov 12. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313342

8. Ding R., Fang T., Wang W., et al. Star-ground fusion communication system: network architecture, enabling technologies, and prototype verification. *Space Integr Ground Inf Networks*. 2023. No 4(03). p. 79–87.

9. Liu Z., Jiang Q., Zhao K., Liu X., Ma W., et al. Analysis of reliable transmission performance optimization methods for satellite-to-ground laser communication links. *IgMin Research*. 2024. 2(7). pp. 662–666. IgMin ID: igmin230. DOI: https://doi.org/10.61927/igmin230. Available at: https://igmin.link/p230

10. Makedon V., Myachin V., Plakhotnik O., Fisunenko N., Mykhailenko O. Construction of a model for evaluating the efficiency of technology transfer process based on a fuzzy logic approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. no 2(13(128)). p. 47–57. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.300796

11. Mohandas R., Paka N., Venkata Ramana D., Kumar V., Swathi A., Turukmane A.V. Enhanced high-speed data transmission with optical switching in fiber optic communication system with security systems. In: Proceedings of the 3rd *International Conference on Optimization Techniques in the Field of Engineering (ICOFE-2024)*. 2024. Nov 15. http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.5077550

12. Rappaport T.S., Xing Y., Kanhere O., Ju S., Madanayake A., Mandal S., Alkhateeb A., Trichopoulos G.C. Wireless communications and applications above 100 GHz: opportunities and challenges for 6G and beyond. *IEEE* Access. 2019. Vol. 7. pp. 78729–78757. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2921522

13. Saiyyed R., Sindhwani M., Sachdeva S., Pahuja H. Enabling high-speed and large-capacity data transmission in optical inter-satellite communication links under various conditions. *Journal of Optics*. 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s12596-024-02227-9

14. Sarker S.P.K., Hossain M.A. Analysis of inter-satellite optical wireless communication systems for enhanced data transmission in satellite constellations. *Optics Continuum*. 2024. No 3(7). P. 1224–1243. DOI: https://doi.org/10.1364/OPTCON.529721

Voloshyn V.O., Madinov M.L., Boyko O.V., Matskevych V.L., Palamarchuk V.O. INTELLIGENT ERROR CORRECTION ALGORITHMS IN SATELLITE-OPTICAL NETWORKS FOR HIGH-SPEED DATA TRANSMISSIONS

The article is devoted to the study of intelligent error correction algorithms in satellite-optical networks aimed at providing high-speed data transmissions. The main factors affecting the propagation of an optical signal are analyzed, in particular, attenuation, noise interference, chromatic dispersion, nonlinear effects, polarization distortions and spectral filtering, and the heterogeneity of modern optical networks is also taken into account, where different segments of lines are characterized by unique parameters, which complicates the optimization of their operation. It is found that the signal quality in the process of linear propagation gradually deteriorates due to the accumulation of amplified spontaneous emission (ASE), which is generated by erbium-doped amplifiers (EDFA). It is substantiated that in the absence of nonlinear distortions when the base value corresponds to the back-to-back configuration, while in real conditions the OSNR value in the line significantly exceeds this value due to the «OSNR penalty» caused by nonlinear signal degradation, which complicates its recovery. Modeling of nonlinear distortions as additive nonlinear noise added to linear noise is proposed, which allowed formulating analytical expressions for the total noise power and inverse OSNR, which are the basis for optimizing the parameters of multi-span DWDM lines. A methodology for constructing calibration curves that provide a unique relationship between OSNR and bit error rate (BER), as well as the principle of local optimization, which leads to a global improvement in system characteristics, in particular by determining the optimal power for each span, is developed. The effectiveness of the IGN model of additive nonlinear noise, which has proven its feasibility for the design of high-speed communication lines, has been evaluated, although its accuracy depends on the preliminary measurement of nonlinearity coefficients. The characteristics of the lines have been experimentally investigated using a special setup that includes a BER tester, transponders, multiplexers, demultiplexers and erbium amplifiers, which allowed establishing the deviation of the calculated OSNR values from the experimental ones, confirming the high accuracy of the e-model.

Key words: *intelligent algorithms, error correction, satellite-optical networks, high-speed data transmission, nonlinear distortions, optical signal-to-noise ratio (OSNR).*

УДК 004.77
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/13

Карнаух Д. М.
Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

Тягунова М. Ю.
Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

Киричек Г. Г.
Національний технічний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИ ТА МОЖЛИВОСТІ ПОКРАЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ БЕЗДРОТОВИХ МЕРЕЖ ПЕРЕДАЧІ ДАНИХ ДЛЯ СИСТЕМ «IOT»

У даній статті досліджується існуюча ситуація з роботою електронних пристроїв в бездротових телекомунікаційних мережах в умовах великої кількості перешкод в щільних міських агломераціях, індустріальних парках, висвітлення актуальних потреб суспільства в цій сфері, аналізу нових технічних можливостей для розвитку систем, які використовують бездротові пристрої системи «Інтернет речей» (IoT), а також потенціал для розвитку бездротової комунікації у міській та промисловій інфраструктурі. Пошук оптимальних рішень щодо надійного зв'язку між багатьма пристроями, що працюють у середовищі з індустріальними завадами має вирішальне значення для безпечного та ефективного регулювання міського трафіку, забезпечення ефективної промислової автоматизації. Впроваджуючи гнучкі інтелектуальні рішення, що використовують бездротові пристрої, міста можуть підвищити безпеку, зменшити дорожні затори та затримки, покращити загальний трафік, зменшити обсяги шкідливих викидів, що призведе до економії коштів, підвищення якості життя жителів сучасних міст. Дослідження базується на детальному аналізі стандарту IEEE 802.11be для визначення ефективності, надійності та продуктивності бездротових телекомунікаційних мереж, що працюють у промислових умовах. Дослідження вивчає такі технології, як багатоканальні операції, множинний доступ з ортогональним частотним поділом, QAM модуляція тощо. У роботі розглянуто можливості підвищення стійкості до перешкод та зменшення впливу завад для бездротових телекомунікаційних мереж під впливом природних і техногенних факторів нестабільності. Показано, що використання можливостей стандарту IEEE 802.11be дозволяє досягти високої пропускної здатності каналів зв'язку з мінімальними мережевими затримками. Пристрої можуть використовувати всі доступні частотні ресурси в діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц, автоматично використовуючи канали без перешкод. Проаналізовано вплив конфігурації режиму роботи мережевих пристроїв стандарту IEEE 802.11be (Multi-Link Operations, Frame aggregation, QAM modulation) на пропускну здатність каналів зв'язку. У дослідженні підкреслюється перспективність використання багатоканальних режимів роботи з кількома частотними діапазонами одночасно. Результати дослідження можна використати для розробки надійних систем із використанням багатьох бездротових пристроїв Інтернету речей у місцях, де може бути високий рівень промислових перешкод за допомогою багатоканальних операцій, збільшення кількості просторових потоків і покращених методів управління якістю обслуговування (QoS) за новим стандартом IEEE 802.11be.

Ключові слова: *бездротові мережі, перешкодозахищеність, інтелектуальні системи, трафік, IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, модуляція, багатоканальна робота.*

Постановка проблеми. У сучасних містах використовуються складні інфраструктурні рішення, які містять велику кількість електронних пристроїв, датчиків та інших елементів системи «Інтернет речей», об'єднаних в мережу. Наприклад, актуальною є проблеми оптимізації міського трафіку [1–2], адаптивного регулювання дорожнього руху на перехрестях з використанням новітніх підходів, пов'язаних із застосуванням штучного інтелекту [3]. Вирішення цього питання потребує застосування широкого спектру електронних пристроїв: камер, сенсорів тощо, що збільшує точність оцінки ситуації, забезпечує надійність та сприяє ефективному функціонуванню міських транспортних мереж. Використання дротових з'єднань стає все більш обтяжливим та значно збільшує вартість підтримки системи. Застосування бездротових мереж

передачі даних усуває ці обмеження, але вимагає забезпечення надійності, стійкості до перешкод та високої швидкості передачі даних в умовах великої кількості завад, що властиві промисловим зонам, густонаселеним міським районам та при змінних погодних умовах.

Основними перевагами бездротових телекомунікаційних мереж системи IoT є:

– мобільність пристроїв зв'язку;
– гнучкість архітектури;
– легкість розширення системи;
– зниження витрат на технічне обслуговування системи.

Однак неоднорідність середовища передавання даних спричиняє труднощі в забезпеченні якості зв'язку (високої достовірності передавання інформації), здебільшого через перешкоди в радіоканалі, що знижує безпеку й ефективність функціонування всієї системи. У загальному випадку стійкість до перешкод каналу передачі – це здатність мережі розпізнавати і відновлювати сигнали з певним ступенем надійності в присутності перешкод.

У зв'язку з цим під час проєктування систем бездротового зв'язку актуальним завданням є підвищення завадостійкості та зниження впливу радіоперешкод на якість приймання/передавання в умовах впливу природних і техногенних чинників нестабільності. Наприклад, навіть короткочасна втрата чи суттєве спотворення даних у процесах управління складними дорожніми потоками є неприйнятним з погляду виконання вимог стійкості та безпеки системи. А випадання одного або більше пристроїв із системи через ненадійність каналів зв'язку знижує ефективність роботи всієї системи, а у великих масштабах може призвести до перебоїв роботи всього «розумного міста».

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення перешкодостійкості радіоканалів зв'язку є актуальною науково-технічною проблемою при побудові цифрових мереж електронного зв'язку. В міських умовах особливо потрібні методи завадостійкої телекомунікації для невеликих відстаней. Ідеальна телекомунікаційна мережа має бути здатна впоратися з будь-якими можливими змінами в розподілі. Телекомунікаційна система повинна ефективно долати короткострокові, довгострокові та високоінтенсивні перешкоди. Не зменшуючи швидкість каналу передачі даних до заданого мінімуму і маючи мінімальні компенсації затримки мережі. Короткочасні перешкоди зв'язку перешкоди вже досить давно успішно компенсуються за допомогою спеціальних алгоритмів кодування (кодування з корекцією помилок), які роблять сигнал менш сприйнятливим до шумів, перешкод і завмирань. Ці методи використовують надлишкове кодування даних для виправлення помилок, спричинених перешкодами, без повторної передачі даних [4–5].

Переваги їх використання:

– зменшується необхідність повторної передачі;
– приймач може виявляти наявність помилок і інформувати передавачу;
– низька вартість: досягається за рахунок програмної реалізації.

У разі ж потужного і тривалого джерела перешкод завадостійке кодування вже не може забезпечити стабільність каналу зв'язку, потрібно додаткове використання інших рішень, наприклад, таких, як:

– режим програмної перебудови робочої частоти у діапазоні виділених частот (Frequency Hopping Spread Spectrum (FHSS));
– збільшення ширини спектру частотного сигналу (Direct Sequence Spectrum Spread (DSSS));
– використання багатопроменевого поширення (Multiple Input Multiple Output (MIMO));
– формування діаграми спрямованості (Beamforming) – різновид MIMO: формує діаграму спрямованості багатоелементної антени MIMO в напрямку до приймача на підставі інформації про стан каналу між передавачем та приймачем. Спрямованість формується таким чином, щоб було мінімальне випромінювання у напрямі зон покриття сусідніх точок доступу, щоб мінімізувати взаємні перешкоди. Система може регулювати діаграму спрямованості антени в режимі реального часу. Покращує рівень та якість сигналу;
– технологія ортогонального частотного мультиплексування (Orthogonal frequency-division multiplexing (OFDM)).

При використанні FHSS система працює з перебудовою робочої частоти за певним алгоритмом, відомим приймачем і передавачем. Це зменшує вплив перешкод. Перевага цього методу полягає в тому, що його легко реалізувати, недолік – затримка потоку даних при зміні частоти. У разі сильних широкосмугових і динамічних перешкод виникають труднощі зі швидкістю узгодження частот зв'язку і надійністю потоків даних, що обробляються в режимі реального часу.

Технологія DSSS дозволяє розподіляти сигнал ширшою смугою частот за допомогою спеціальної кодової послідовності.

DSSS краще справляється з вузькосмуговими перешкодами, а FHSS ефективна проти широкосмугових та випадкових перешкод [6].

Технологія MIMO включає в себе системи, які використовують кілька антен як на передавальному, так і на приймальному кінцях. Це дозволяє передавати різні потоки даних одночасно по декількох каналах і ефективно використовувати багатопроменеве поширення, що підвищує стійкість до перешкод, якість передачі даних, швидкість каналу зв'язку [7–8]. Технологія MIMO використовується у більшості сучасних бездротових систем, таких як Wi-Fi, 4G LTE і 5G, забезпечуючи високу швидкість передачі даних і стабільність зв'язку, що особливо важливо в умовах щільної міської забудови та обмеженого спектру. Сучасна тенденція – збільшення кількості антен.

Розбиття сигналу на кілька піднесучих (OFDM) зменшує вплив перешкод на кожну піднесучу і підвищує загальну стабільність з'єднання. Ортогональність піднесучих дає змогу уникнути інтерференції (перехресних перешкод) між ними [9]. Системи OFDM можуть використовувати динамічний розподіл потужності між піднесучими, виділяючи більше потужності на піднесучі, найчутливіші до перешкод, і пригнічуючи піднесучі, менш чутливі до перешкод. Це сприяє більш рівномірному розподілу помилок і підвищує загальну ефективність системи [10].

Ці методи можуть використовуватися окремо або в комбінації для підвищення рівня захисту радіосигналів від перешкод.

Постановка завдання. Метою даної роботи є дослідження можливостей комплексу нових функцій стандарту IEEE 802.11be як простого та ефективного інтегрованого рішення для забезпечення стабільної та надійної роботи електронних пристроїв у бездротових телекомунікаційних мережах за наявності недетермінованих індустріальних радіоперешкод. Для досягнення завадостійкого бездротового зв'язку перспективним є використання інтелектуальних систем, здатних аналізувати інформацію про навколишній радіопростір і якість зв'язку, прогнозувати зміни параметрів каналу зв'язку та динамічно адаптувати параметри до змін середовища поширення радіохвиль, завад і завантаження частотного діапазону.

Виклад основного матеріалу. Технологія Wi-Fi відіграє важливу роль у бездротовому зв'язку між датчиками та пристроями, наприклад, в «Інтернеті речей» і промисловій автоматизації. Так, реалізація надійних рішень для інтелектуального керування рухом на перехрестях за допомогою нейронних мереж вимагає оброблення в реальному часі відео з камер з високою роздільною здатністю і високою швидкістю передачі даних. Для цього необхідні канали зв'язку з високою пропускною спроможністю і низькі затримки під час передачі даних. Відеотрафік є одним з основних компонентів трафіку Wi-Fi, і тенденція до збільшення вимог до пропускної здатності буде актуальною ще довгий час [11–12].

Цікавими є рішення, запропоновані новим стандартом IEEE 802.11be (Wi-Fi 7) для бездротових локальних мереж. Щоб забезпечити підтримку максимальної пропускної здатності щонайменше 30 Гбіт/с, у стандарті визначено нові режими керування доступом до середовища (MAC) і фізичного рівня (PHY) [13].

Особливості, які привертають найбільшу увагу у IEEE 802.11be:

– додана смуга частот 6 ГГц, яка менш завантажена, ніж діапазони 2,4 ГГц і 5 ГГц, що знижує рівень перешкод від наявного обладнання та зовнішніх джерел шуму;

– смуга пропускання розширена до 320 МГц;

– модуляція 4096-QAM (в попередньому стандарті 802.11ax використовується 1024-QAM) – дає змогу збільшити швидкість передавання даних на 20 %, але підвищує вимоги до співвідношення сигнал/шум у каналі [11];

– множинний доступ з ортогональним частотним поділом (OFDMA) – підвищує ефективність використання частот, дозволяючи декільком клієнтам спільно використовувати ресурси каналу [15];

– система багатопроменевого поширення (MIMO) розширена до 16 потоків, що дозволить ефективніше уникати колізій [12], [16–18];

– підвищення стійкості до помилок і покращення загального відношення сигнал/шум каналу зв'язку завдяки технології гібридного автоматичного запиту (Hybrid automatic repeat request (HARQ)), яка дозволяє об'єднувати пакети даних із кількох спроб передачі, передавач може адаптуватись під якість каналу міняючи модуляцію та керуючи швидкістю передачі даних [12], [14], [16–17];

– за рахунок дводіапазонного дуплексу (FD) забезпечується оптимізація використання частотного спектру, збільшення пропускної здатності, зниження затримок та кількості колізій [15];

– багатоканальна робота (Multi-Link Operations (MLO)) – одна з ключових функцій нового стандарту: можливість передавання і при-

ймання одного й того самого потоку даних кількома радіоінтерфейсами, використовуючи всі доступні частотні ресурси в діапазонах 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц.

У попередніх поколіннях Wi-Fi пристрій міг використовувати кілька радіоканалів одночасно, проте кожний радіоканал працював незалежно. Основна відмінність нового стандарту полягає у об'єднанні частотних діапазонів 2,4 ГГц, 5 ГГц і 6 ГГц в єдиний пул з безшовним використанням всього діапазону. Це дає змогу уникнути затримок, спричинених нестабільним з'єднанням і зовнішніми перешкодами [14–17]. У стандарті 802.11be всі з'єднання є багатоканальними з декількома фізичними радіоінтерфейсами, але тільки з однією MAC-адресою. Технологія включає логіку для розподілу даних по окремих радіоканалах у міру необхідності та управління їх потоком на низькому рівні. Низькорівневі операції приховані для високорівневих протоколів, тому не потрібно турбуватися про те, скільки радіоканалів використовується і яким чином. Важливою перевагою багатоканальної роботи порівняно з одноканальними широкосмуговими каналами є можливість передавати дані асинхронно по декількох каналах одночасно. Завдяки можливості асинхронної передачі даних по декількох каналах покращується пропускна здатність. І що дуже важливо – суттєво підвищується завадостійкість зв'язку: у разі необхідності повторної передачі даних внаслідок перешкод – повторна передача пакетів можлива по будь-якому радіоканалу. Перемикання каналів здійснюється динамічно, не розриваючи з'єднання. Також для підвищення ефективності та стабільності потоки даних і команд управління пристроями можуть бути рознесені різними радіоканалами [12], [14], [17], [19–21]. На рис. 1 показано схему багатоканального підключення.

У роботі [22] було проведено тестування й аналіз ефективності роботи системи в одноканальному та багатоканальних режимах. Конфігурації для тестів наведено на рис. 2, результати тестування – на рис. 3.

Результати тестування показали, що усі багатоканальні конфігурації, які працюють згідно IEEE 802.11be демонструють значно вищі показники, ніж одноканальна конфігурація (Case 1-1). Використання нових доступних ширини каналу 320 МГц і модуляції 4096-QAM дає можливість досягати пропускної здатності 30Гб/с.

Висновки. Збільшення кількості IoT-пристроїв, попит на додатки з високою пропускною спроможністю, підвищення вимог до надійності бездротового зв'язку та необхідність цифрової трансформації промислової та соціальної інфраструктури є основними факторами зростання ринку обладнання бездротового зв'язку [21]. Відмовостійкість і надійність бездротових мереж може бути якісно підвищена за рахунок використання багатоканального режиму роботи, збільшеної кількості просторових потоків, вдосконалених методів керування якістю обслуговування (QoS) нового стандарту IEEE 802.11be. Очікується суттєве покращення стабільності та надійності каналів зв'язку навіть у густонаселених агломераціях, або за складних атмосферних чи завадових умов. Пристрої Wi-Fi 7 широко використовуватимуться для під'єднання промислових датчиків, контролерів і роботів у рамках концепцій «розумного

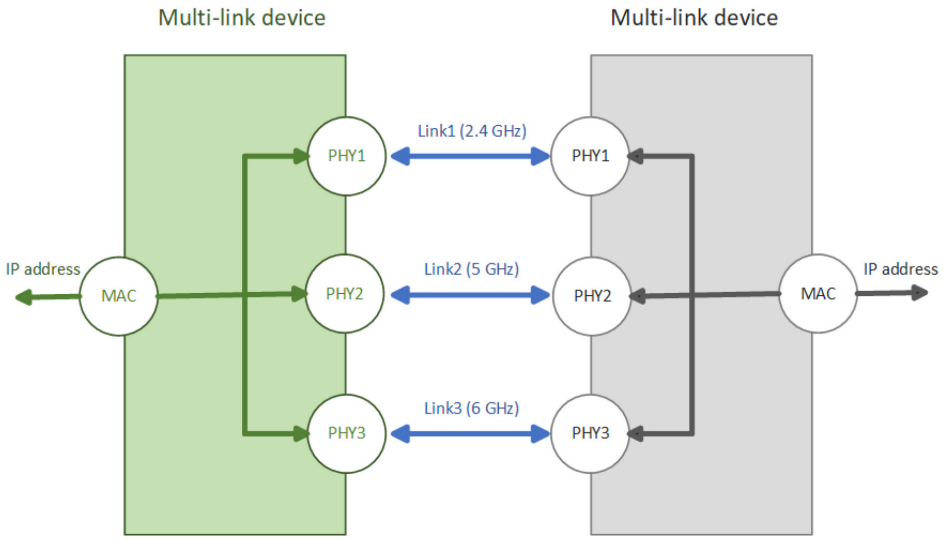
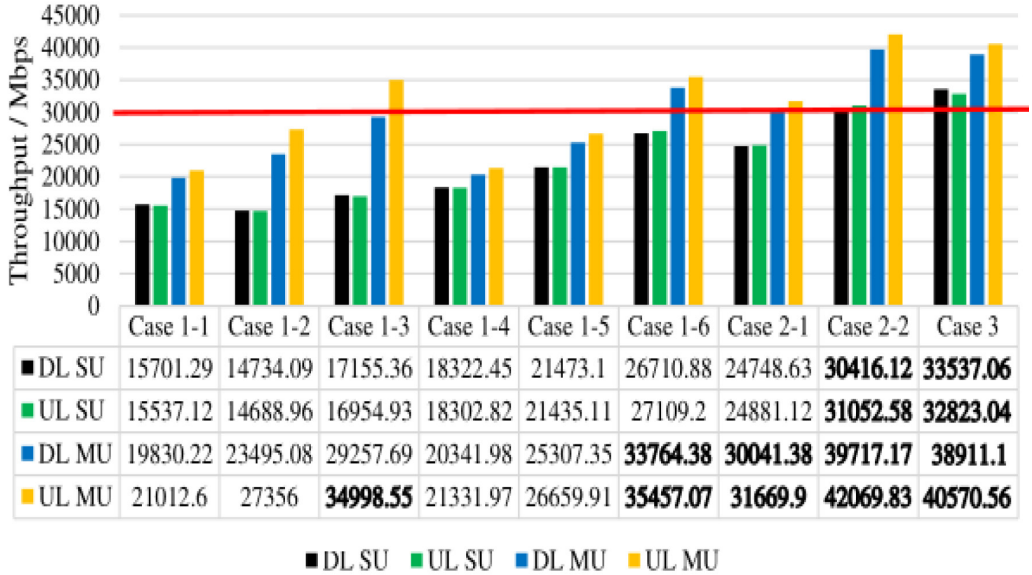


Рис. 1. Багатоканальна взаємодія [21]

Cases	Aggregation	Link	CBW (MHz)	QAM
Case 1-1	1024 ✓	1	320 ✓	4K ✓
Case 1-2	256	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-3	256	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 1-4	1024 ✓	2 (160 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	160	4K ✓
Case 1-5	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 1-6	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	1K
Case 2-1	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 2-2	1024 ✓	2 (320 MHz for link 1 + 320 MHz for link 2) ✓	320 ✓	4K ✓
Case 3	1024 ✓	3 (320 MHz for link 1 + 160 MHz for link 2 + 160 MHz for link 3) ✓	320 ✓	4K ✓

Рис. 2. Конфігураційні параметри [22]



	Case 1-1	Case 1-2	Case 1-3	Case 1-4	Case 1-5	Case 1-6	Case 2-1	Case 2-2	Case 3
DL SU	15701.29	14734.09	17155.36	18322.45	21473.1	26710.88	24748.63	**30416.12**	**33537.06**
UL SU	15537.12	14688.96	16954.93	18302.82	21435.11	27109.2	24881.12	**31052.58**	**32823.04**
DL MU	19830.22	23495.08	29257.69	20341.98	25307.35	**33764.38**	**30041.38**	**39717.17**	**38911.1**
UL MU	21012.6	27356	**34998.55**	21331.97	26659.91	**35457.07**	**31669.9**	**42069.83**	**40570.56**

Рис. 3. Пропускна спроможність [22]

міста», охорони здоров'я та Індустрії 4.0. Це сприятиме цифровій трансформації в усіх галузях промисловості.

Однак, незважаючи на оптимістичні перспективи, існують і проблеми, які необхідно буде вирішувати в міру просування нового стандарту:

– вартість: ринок стикається з високими стартовими витратами для WiFi 7, що може вплинути на рівень проникнення;

– технічна сумісність: необхідно враховувати сумісність з наявним обладнанням і мережами, щоб забезпечити плавний перехід для споживачів;

– вдосконалення стандарту: лише практичне масове впровадження пристроїв IEEE 802.11be дозволить виявити недоліки та вузькі місця, які можна буде усунути та оптимізувати у наступних поколіннях стандартів бездротового зв'язку.

Загалом, майбутнє пристроїв, які підтримують стандарт IEEE 802.11be, перспективне і вони можуть стати одним з основних сегментів ринку бездротових мереж.

Список літератури:

1. Seto K.C., Parnell S., Elmqvist T.A. Global Outlook on Urbanization. *Urbanization, Biodiversity and Ecosystem Services Challenges and Opportunities* / ed. by T. Elmqvist, M. Fragkias, J. Goodness et al. Dordrecht ; Heidelberg ; New York ; London : Springer, 2013. P. 1–12. DOI: 10.1007/978-94-007-7088-1

2. Li Q., Shangguan W., Cai B., Chai L. Traffic flow guidance and optimization of connected vehicles based on swarm intelligence. *IEEE 2019 Chinese Control Conference (CCC) (July 27–30, 2019)*. 2019. P. 2099–2104. DOI: 10.23919/ChiCC. 2019.8866595

3. Тягунова М. Ю., Карнаух Д. М. Доцільність розробки інтелектуальних систем регулювання руху на перехрестях. *Наукові праці ДонНТУ. Серія «Інформатика, кібернетика та обчислювальна техніка»*. 2024. № 1(38). С. 71–76. URL: https://doi.org/10.31474/1996-1588-2024-1-38-71-76

4. Faure E. V. FACTORIAL CODING WITH ERROR CORRECTION. *NU "Zaporizhzhia Polytechnic" the scientific journal "Radio Electronics, Computer Science, Control"*. 2017. № 3(42). P. 130–138. URL: https://doi.org/10.15588/1607-3274-2017-3-15

5. Wang C., Sklar D., Johnson D. Forward Error-Correction Coding. *The Aerospace Corporation magazine of advances in aerospace technology*. 2002. № 4. URL: https://web.archive.org/web/20120314085127/http://www.aero.org/ publications/crosslink/winter2002/04.html

6. Spasojevic Z., Burns J. Performance comparison of frequency flopping and direct sequence spread spectrum systems in the 2.4 GHz range. *11th IEEE International Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (September 18–21, 2000)*. 2000. Vol. 1. P. 426–430. DOI: 10.1109/PIMRC.2000. 881461

7. Hampton J. R. Introduction to MIMO communications. New York : Cambridge University Press, 2014. 300 p.

8. Zhang S., Zhang R. Capacity characterization for intelligent reflecting surface aided MIMO communication. *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2020. Vol. 38, № 8. P. 1823–1838.

9. Behrouz F-B., Hussein M. OFDM Inspired Waveforms for 5G. ECE Department, University of Utah and Idaho National Laboratory, 2016. 32 p. URL: https://www.osti.gov/servlets/purl/1357211

10. Bansal G., Hossain M. J., Bhargava V. K. Adaptive power loading for OFDM-based cognitive radio systems with statistical interference constraint. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2011. Vol. 10, № 9. P. 2786–2791. DOI: 10.1109/TWC.2011.072011.100397

11. Garcia-Rodriguez A., López-Pérez D., Galati-Giordano L., Geraci G. IEEE 802.11be: Wi-Fi 7 strikes back. *IEEE Communications Magazine*. 2021. Vol. 59, № 4. P. 102–108.

12. Deng C., Fang X., Han X., Wang X., Yan L., He R., Long Y., Guo Y. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: New Challenges and Opportunities. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2020. Vol. 22, № 4. P. 2136–2166.

13. Lopez-Perez D., Garcia-Rodriguez A., Galati-Giordano L., Kasslin M., Doppler K. IEEE 802.11be Extremely High Throughput: The next generation of Wi-Fi technology beyond 802.11ax. *IEEE Communications Magazine*. 2019. Vol. 57, № 9. P. 113–119. DOI: 10.1109/MCOM.001.1900338

14. Khorov E., Levitsky I., Akyildiz I. F. Current Status and Directions of IEEE 802.11be, the Future Wi-Fi 7. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8. P. 88664–88688. URL: https://ieeexplore.ieee.org/ document/9090146

15. Avdotin E., Bankov D., Khorov E., Lyakhov A. Resource allocation strategies for real-time applications in Wi-Fi 7. *2020 IEEE International Black Sea Conference on Communications and Networking (BlackSeaCom) (May 26-29, 2020)*. 2020. P. 1–6. DOI: 10.1109/BlackSeaCom48709.2020.9234994

16. Chauhan S., Sharma A., Pandey S., Rao K. N., Kumar P. IEEE 802.11be: A review on Wi-Fi 7 use cases. *9th International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (Trends Future Directions) (September 03-04, 2021)*. 2021. P. 1–7. DOI: 10.1109/ICRITO51393.2021.9596344

17. Jeknic A., Kocan E. Development Steps that Brought to Wi-Fi 7. *ETF Journal of Electrical Engineering*. 2023. Vol. 29, № 1. P. 65–79. DOI: https://doi.org/10.59497/jee.v29i1.266

18. Adame T., Carrascosa-Zamacois M., Bellalta B. Time-Sensitive Networking in IEEE 802.11be: On the Way to Low-Latency WiFi 7. *Sensors*. 2021. № 21(15). 20 p. URL: https://doi.org/10.3390/s21154954

19. Chen C., Chen X., Das D., Akhmetov D., Cordeiro C. Overview and Performance Evaluation of Wi-Fi 7. *IEEE Communications Standards Magazine*. 2022. Vol. 6, № 2. P. 12–18. DOI:10.1109/ MCOMSTD.0001.2100082

20. López-Raventós Á., Bellalta B. Multi-Link Operation in IEEE 802.11be WLANs. *IEEE Wireless Communications*. 2022. Vol. 29, № 4, P. 94–100. DOI: 10.1109/MWC.006.2100404

21. Карнаух Д. М., Тягунова М. Ю. Підвищення ефективності радіоканалів зв'язку при побудові цифрових мереж систем «інтернету речей». *Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій: Тези доповідей XII Міжнародної науково-практичної конференції (10–12 грудня 2024 р., м.Запоріжжя).* Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 500 с. – 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM); 12 см. – Назва з тит. екрана. ISBN 978-617-529-487-1. С. 29–33

22. Liu X., Dong Y., Li Y., Lin Y., Yang X., Gan M. IEEE 802.11be Wi-Fi 7: Feature Summary and Performance Evaluation. *arXiv (September 27)*. 2023. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.15951

Karnaukh D. M., Tiahunova M. Yu., Kyrychek H. H. METHODS AND CAPABILITIES TO IMPROVE THE EFFICIENCY OF WIRELESS DATA NETWORKS FOR IOT SYSTEMS

This article examines the current situation with the operation of electronic devices wireless telecommunication networks in conditions of a large number of obstacles in dense urban agglomerations, industrial parks, highlighting the current needs of society in this area, analyzing new technical capabilities for the development

of intelligent systems that use wireless devices of the Internet of Things (IoT) system, as well as the potential for the development of wireless communication in urban and industrial infrastructure. Finding optimal solution solutions for reliable communication between many devices that works in the conditions of significant industrial radio interference is crucial for the safe and effective regulation of urban traffic of cars and pedestrians, ensuring effective industrial automation.

The study is based on a detailed analysis of the IEEE 802.11be standard to determine the efficiency, reliability and performance of wireless telecommunications networks operating in industrial conditions. The study explores technologies such as Multi-Link Operations, OFDMA, QAM modulation, etc.

The paper considers the possibilities of increasing the resistance to interference and reducing the impact of radio interference for wireless telecommunication networks under the influence of natural and man-made factors of instability. It is shown that the use of the capabilities of the IEEE 802.11be standard allows achieving high bandwidth of communication channels with minimal network delays. Devices can use all available frequency resources in the 2.4 GHz, 5 GHz and 6 GHz bands, automatically using channels without interference.

The influence of the configuration of the operating mode of network devices of IEEE 802.11be standard (Multi-Link Operations, Frame aggregation, QAM modulation) on the bandwidth of communication channels is shown. The study emphasizes the prospects of using multi-link operating modes when working with several frequency ranges simultaneously.

The results provide actionable recommendations for improving the reliability, performance, and noise immunity of wireless telecommunication networks in locations where high levels of industrial interference may be present. The research can be used to design adaptive systems using many wireless IoT devices.

The fault tolerance and reliability of wireless networks can be qualitatively improved by using multi-link operations, an increased number of spatial streams, and improved quality of service (QoS) management methods of the new IEEE 802.11be standard. A significant improvement in the stability and reliability of communication channels is expected even in densely populated agglomerations, or under difficult atmospheric or interference conditions.

Key words: *wireless networks, IEEE 802.11be, Wi-Fi 7, IoT, noise immunity, throughput, multi-link operation.*

УДК 537.86
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/14

Кочмала В. Б.
Вінницький національний технічний університет

Пінаєв Б. О.
Вінницький національний технічний університет

Шпирко О. А.
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ МІКРОЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЇВ ДЛЯ ВИЗНАЧЕННЯ ТИПУ І ЯКОСТІ ДИЗЕЛЬНОГО ПАЛИВА

Сучасний розвиток паливно-енергетичної галузі вимагає впровадження новітніх технологій контролю якості пального. З'ясовано, що зростаючі вимоги до екологічності, ефективності та безпеки використання паливних ресурсів зумовлюють необхідність вдосконалення методів аналізу характеристик пального.

У статті розкрито та визначено один із ключових напрямків у цій сфері – впровадження мікроелектронних пристроїв для оперативного визначення фізико-хімічних властивостей пального. Ці пристрої дозволяють швидко і точно оцінювати склад, щільність, в'язкість, октанове та цетанове числа, наявність домішок і забруднень. Доведено, що застосування сенсорних технологій і спектроскопічних методів аналізу сприяє підвищенню достовірності результатів і мінімізації людського фактору.

Досліджено як штучний інтелект та машинне навчання відкривають нові можливості для прогнозування якості пального на основі великих масивів даних. Алгоритми аналізують інформацію з датчиків, моделюючи зміну характеристик під впливом різних факторів. Це дає змогу своєчасно виявляти відхилення від нормативних показників та запобігати використанню неякісного пального.

Автоматизовані системи контролю якості також набувають популярності серед нафтопереробних підприємств та автозаправних станцій. З'ясовано, що пристрої дозволяють в режимі реального часу здійснювати моніторинг складу та властивостей пального, забезпечуючи дотримання міжнародних стандартів ISO та Євро-6. Сучасні мікроелектронні системи контролю якості пального інтегрувано в мережі Інтернету речей (IoT), що забезпечує централізований збір і аналіз даних. Це дозволяє не лише оперативно реагувати на виявлені відхилення, але й прогнозувати можливі проблеми на ранніх стадіях.

У статті розкрито методи аналізу фізико-хімічних характеристик дизельного палива з використанням мікроелектронних пристроїв. Проведено аналіз сучасних підходів до вимірювання параметрів пального, визначено переваги та обмеження різних методів. Запропоновано рекомендації щодо покращення системи оцінки якості дизельного палива.

Ключові слова: *дизельне паливо, контроль якості, мікроелектронні пристрої, цетанове число, датчики, нафтопереробка.*

Постановка проблеми. Збільшення кількості промислових підприємств та розширення промислових потужностей потребує ефективного контролю якості використовуваного пального. Дизельні двигуни широко застосовуються у важкій техніці, оскільки забезпечують значну автономність та продуктивність. Проте контроль параметрів дизельного пального залишається важливим завданням, особливо з урахуванням екологічних стандартів. Мікроелектронні пристрої можуть суттєво покращити процес аналізу та моніторингу якості пального – це сприяє не лише оптимальній роботі двигунів, а й зменшенню шкідливих викидів в атмосферу, Крім того, інтеграція сенсорних технологій та алгоритмів обробки даних забезпечує автоматизацію контролю якості, що знижує ризик використання неякісного пального та підвищує надійність техніки.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Використання мікроелектронних пристроїв у контролі якості пального активно досліджується в науковій літературі. Зокрема, розглядає спектрометричні методи аналізу, аналізує застосування діелектричних сенсорів, а досліджує акустичні методи оцінки якості палива. Проте залишається відкритим питання ефективної інтеграції

цих методів у комплексні системи контролю, що зменшило б похибки вимірювань. Перспективним напрямком є розробка портативних пристроїв, які можна використовувати безпосередньо в польових умовах, що значно спростить та пришвидшить процес контролю якості пального.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз сучасних методів визначення типу та якості дизельного пального за допомогою мікроелектронних пристроїв та обґрунтування їх ефективності.

Виклад основного матеріалу. Дизельне паливо – це нафтовий продукт, отриманий дистиляцією при температурі від 220 °C до 380 °C. Ця похідна має ряд властивостей, які дозволяють використовувати її в машинах, що приводяться в рух двигунами, що працюють за дизельним циклом [3, с. 1]. Існує кілька основних видів базових компонентів дизельного пального. Традиційне нафтове дизельне паливо (петродизель) виробляють із сирої нафти шляхом фракційної перегонки. Біодизель отримують з рослинних олій або тваринних жирів методом переетерифікації, зокрема лужно-каталізованого переетерифікаційного процесу. Зелене дизельне паливо, також відоме як гідроочищена рослинна олія, виготовляється з тієї ж сировини, що й біодизель, але із застосуванням технологій гідроочищення або деоксигенації. В Україні найпоширенішим видом є петродизель – складна суміш вуглеводнів, отримана в результаті фракційної перегонки нафти. Вона складається із суміші аліфатичних вуглеводнів (C9–C20), ароматичних вуглеводнів, включаючи бензол і поліциклічних ароматичних вуглеводнів (PAHs) і олефінових вуглеводнів [4, с. 4].

Дизельне паливо впливає на робочі характеристики двигуна, такі як пускова швидкість, потужність, шум, гальмування на малих швидкостях, працездатність при низьких температурах, знос двигуна. Таким чином, якість дизельного палива є вирішальною та складною. З точки зору споживача дизельного палива, прийнятна вартість і безпроблемна робота дизельного двигуна, заправленого паливом, придбаним на АЗС, є важливими [5, с. 2].

Займистість дизельного пального є ключовим фактором, що визначає його експлуатаційні характеристики. Вона впливає на запуск двигуна, його потужність, економічність та надійність. Особливо помітний її вплив під час запуску в умовах низьких температур. При цьому займистість може по-різному позначатися на різних параметрах роботи двигуна (рис. 1).

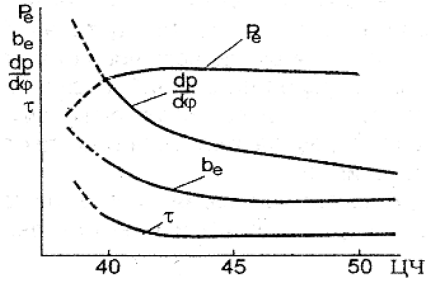


Рис. 1. Вплив цетанового числа на потужність, питому витрату палива, час пуску та жорсткість роботи дизеля

Зважаючи на вплив займистості пального на роботу двигуна, важливо враховувати, що подача пального насосом триває протягом усього періоду затримки його запалення. Тривалість цього процесу може становити від десяти до сорока градусів кута повороту колінчастого вала, тоді як сама затримка запалення займає лише кілька градусів. Точні значення залежать як від режиму роботи, так і від конструктивних особливостей двигуна. Затримка самозаймання визначається як час між розпиленням легкозаймистої речовини та початком процесу горіння після того, як відбулося самозаймання [12, с. 3]. Обидва елементи суттєво впливають на процес згоряння. Під час експериментальних досліджень було проведено численні прямі та непрямі вимірювання. Зокрема, шляхом прямих вимірювань визначали годинну витрату палива, крутний момент двигуна, частоту обертів, кут випередження впорскування, температуру двигуна та концентрацію шкідливих речовин у вихлопних газах [9, с. 5].

Збільшення займистості пального до певного рівня сприяє покращенню процесу горіння, підвищенню його ефективності, скороченню періоду затримки запалення та зменшенню жорсткості роботи двигуна, що позитивно впливає на його економічність (рис. 1). Однак при використанні пального з надмірно високою займистістю може зростати димність і погіршуватися економічність. Це пояснюється тим, що через малу затримку запалення і відносно низьку швидкість горіння відбувається плавне зростання тиску, внаслідок чого значна частина процесу переноситься на такт розширення.

Цетанове число є інтегральною характеристикою займистості пального, що визначає його здатність до горіння – чим вищий цей показник, тим легше пальне запалюється. Для визначення цетанового числа використовують спеціальні моторні установки, які дозволяють оперативно змінювати та контролювати ступінь стиснення, кут випередження

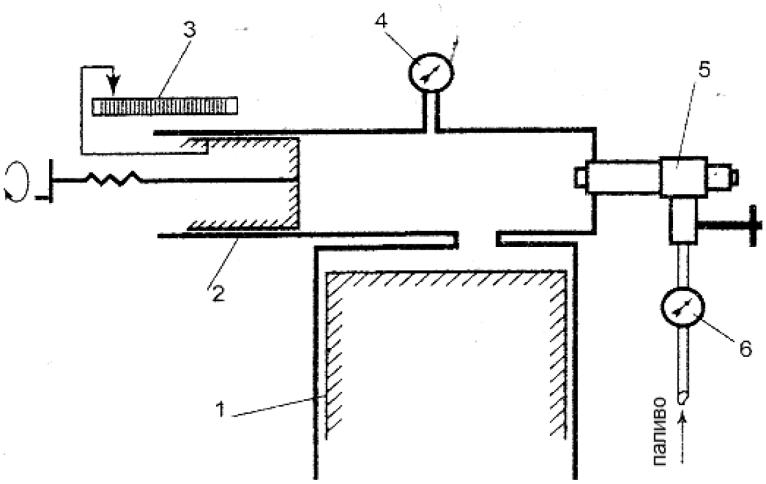


Рис. 2. Розділена камера згоряння з регульованим об'ємом дослідницької установки: 1 – поршень; 2 – допоміжний поршень; 3 – мікрометрична шкала; 4 – індикатор початку згоряння; 5 – форсунка; 6 – індикатор початку подачі палива

ження подачі пального та підтримувати «стандартний» режим роботи двигуна. Окрім цього, установка повинна бути оснащена обладнанням для фіксації моменту початку подачі та згоряння пального. На сьогодні найпоширенішим методом визначення цетанового числа є метод «збігу спалахів», що проводиться на спеціалізованих установках (рис. 2).

Установка складається з одноциліндрового чотиритактного дизельного двигуна, асинхронного електродвигуна, пристроїв для підтримки заданого режиму роботи, а також апаратури для вимірювання. Відмінною особливістю цього дизеля є можливість оперативної зміни ступеня стиснення безпосередньо під час роботи. Це реалізується за рахунок використання розділеної камери згоряння, об'єм якої можна регулювати, змінюючи положення допоміжного поршня 2. Переміщення допоміжного поршня контролюється за допомогою мікрометричної шкали 3. Визначити геометричний ступінь стиснення для кожного положення поршня можна за допомогою графіка, наведеного на рис. 3. Процес неповного згоряння палива всередині циліндра відповідає за утворення викидів CO, але зменшується при більших навантаженнях двигуна [6, с. 12].

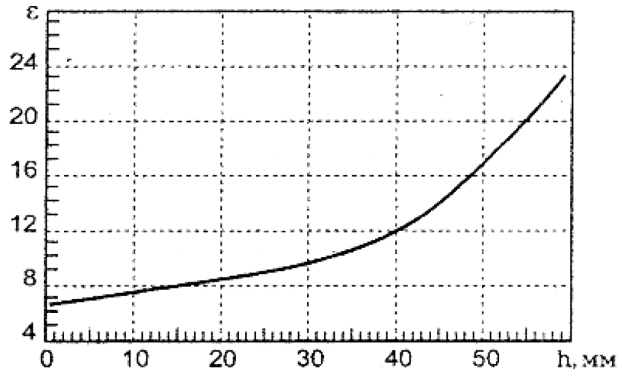


Рис. 3. Залежність ступеня стиснення *e* від показників мікрометра *h*

Основна концепція методу «збігів спалахів» полягає в наступному. Двигун налаштовують на «стандартний» режим роботи, встановлюючи певний ступінь стиснення, за якого займання пального в циліндрі відбувається безпосередньо у верхній мертвій точці (ВМТ). Далі підбирають суміш еталонних палив таким чином, щоб їх згоряння відбувалося аналогічним чином, без зміни ступеня стиснення. Це означає, що при використанні еталонної суміші займання має також відбуватися у ВМТ. Цетанове число досліджуваного пального визначається на основі вмісту еталонних палив у цій суміші.

Двигуни із запалюванням від стиснення вимагають палива з хорошими властивостями утворення горючої суміші. Ці властивості можуть включати відповідний хімічний склад, утворення найменших можливих крапель впорскованого палива та випаровування [11, с. 6].

Сучасний рівень розвитку технологій дозволяє стверджувати, що якість дизельного пального визначається трьома ключовими факторами: продуктивністю, придатністю для експлуатації та стабільністю.

Кількісні методи оцінки якості пального поділяються на дві основні групи. Перша включає хіміко-аналітичні методи, що базуються на спалюванні або інших видах окислення нафтопродуктів із подальшим аналізом утворених продуктів реакції. Друга група охоплює електрофізичні

апаратурно-аналітичні методи, які ґрунтуються на пропусканні електричних, електромагнітних чи акустичних сигналів через досліджувані зразки пального.

Серед різноманітних електромагнітних методів найбільш доступними та ефективними є імпендансні та радіочастотні, оскільки вони використовують просту й недорогу апаратуру та мікросхеми. Водночас електро-аналітичні та мікрохвильові методи забезпечують вищу точність порівняно з низькочастотними, але потребують більш складного обладнання. Принцип роботи цих пристроїв базується на зміні діелектричної проникності пального відповідно до його цетанового числа з урахуванням температурної корекції.

Одночасне використання інструментів прогнозування, таких як створені штучні нейронні мережі, дає змогу оцінити споживання палива на основі зроблених припущень та значень окремих змінних для автомобілів на етапі проектування. Введення нелінійності дозволяє моделювати складні дані. Приховані шари також мають параметри, звані ваговими коефіцієнтами, які змінюються в процесі навчання нейронних мереж [13, с. 18, 15, с, 14].

Аналіз даних датчиків за допомогою алгоритмів машинного навчання, що застосовуються з використанням процедур прогнозного технічного обслуговування, також може бути використаний для покращення технічного обслуговування обладнання транспортного засобу зі зниженням витрат через час зупинки для несправностей і ремонту [14, с. 2].

Спектрометричні методи, що використовують широкий діапазон частот для аналізу спектрів поглинання або пропускання пального, дозволяють частково знизити вплив складу сировини на визначення детонаційної стійкості. На відміну від раніше згаданих методів, ці підходи базуються на спостереженні інтенсивності численних смуг поглинання у інфрачервоному спектрі вуглеводнів, що дає змогу розраховувати октанове або цетанове число з урахуванням кількох факторів. Це значно зменшує похибки вимірювання при зміні сировини. Для ще більшої точності для кожного типу сировини створюється окрема калібрувальна модель. Спеціальні адаптивні алгоритми, що аналізують спектральні характеристики, автоматично обирають модель, яка найточніше відображає взаємозв'язок між спектральним поглинанням і октановим чи цетановим числом пального.

Нещодавно для контролю якості палива були розроблені портативні та деякі навіть мініатюрні спектрометри (miniNIR), які працюють переважно в мережевих форматах. Ця архітектура забезпечує стабільність, модульність, гнучкість і масштабованість гібридних систем. Тут середовище використовується для перенесення заряду, особливо для з'єднання між різними гібридними системами [7, с. 22]. Їхній ергономічний дизайн, що включає компактні розміри, зручність у використанні та відповідність принципам екологічної хімії, значно знижує час і вартість аналізу. Завдяки мініатюрним габаритам ці пристрої можуть застосовуватися в портативних кишенькових приладах. Однак, для забезпечення точності вимірювань, мініатюрне обладнання повинно відповідати прийнятим стандартам моніторингу якості й не поступатися за характеристиками стаціонарним спектроскопічним системам. Хоча їхнє використання для аналізу пального поки що не є широко поширеним, портативні та мініатюрні спектрометри вже застосовуються для кількісного визначення етанолу в бензині, біодизеля в сумішах дизель/біодизель, оцінки властивостей бензину та моніторингу реакції переетерифікації.

Було використано прототип портативного мініатюрного ближнього інфрачервоного спектрометра, що працює в спектральному діапазоні 1300–2100 нм (рис. 4) [1, с 5]. Цей прилад живиться напругою 5В і керується через USB-порт комп'ютера, спочатку використовує матрицю з шести незалежних світлодіодів, що працюють із такими хвильовими числами: 1300 нм, 1400 нм, 1600 нм, 1700 нм, 1900 нм і 2100 нм.

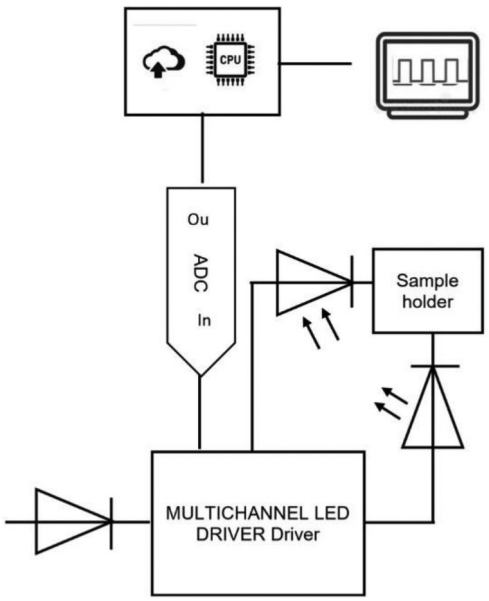


Рис. 4. Схема прототипу портативного інфрачервоного спектрометра

Цей пристрій живиться від джерела напруги 5 В і керується через USB-порт комп'ютера. Він використовує матрицю з шести незалежних світлодіодів, що працюють на хвильових числах 1300 нм, 1400 нм, 1600 нм, 1700 нм, 1900 нм і 2100 нм. Роздільна здатність пристрою становить 133 нм при довжині хвилі 1000 нм. Світлодіодна матриця синхронізована з вбудованим детектором попереднього підсилювача (InGaAs) з внутрішнім охолодженням. Для аналізу розчин зразка (16 мкл) наносили піпеткою в знімну кювету з оптичною довжиною 0,5 мм, яка фіксувалася між світлодіодним масивом і детектором. Спектральні смуги отримували шляхом усереднення 1000 сканувань із часом інтегрування 2,4 мс, що забезпечувало загальний час вимірювання 2,4 секунди на зразок.

Порівняно зі стаціонарним спектрометром, прототип представив розумні моделі, які могли передбачити цільовий забруднювач, з дещо нижчою точністю (між 68 % і 86 %), тоді як наявність біодизеля в дизельному паливі було передбачено з точністю 80 %.

Завдяки потенційній низькій вартості та розмірам поточного пристрою обладнання потенційно можна буде використовувати для першого аналізу забруднюючих речовин і сумішей біодизеля в дизельному паливі, а також для виконання другого раунду аналізу, якщо необхідно, із більш складним обладнанням для прогнозування концентрації забруднюючих речовин або вмісту біодизельного палива в дизельному паливі.

Цікаві електронно-акустичні підходи до оцінки якості палива. Відомо, що такі характеристики, як швидкість поширення звуку та коефіцієнт загасання звуку в середовищі, значною мірою залежать від його щільності. Вимірювання щільності корисно для визначення кількості та якості палива. Це важлива властивість переважно для систем безповітряного горіння, оскільки вона впливає на ефективність розпилення палива [8, с. 9].

Ультразвукові хвилі успішно використовувалися для тестування та аналізу рідин. Визначення густини, складу та температури рідин здійснювалося на основі швидкості звуку. Крім того, повідомлялося про ефективне застосування ультразвукового методу, який використовує швидкість звуку та коефіцієнт ослаблення, для характеристики різних видів харчових олій.

Було розроблено нову плату на основі карти розробки TDC1000-C2000EVM, ця карта може генерувати ультразвукові хвилі через підключений п'єзодатчик і може виявляти відбиття цих генерованих хвиль (рис. 5) [2, с. 5]. Обраний датчик працює на частоті 1 МГц і належить до ультразвукових датчиків закритого типу. Хоча для ультразвукових застосувань можуть використовуватися частоти в межах від 1 до 1000 МГц, частота 1 МГц є достатньою для вимірювання параметрів у рідинах. Для визначення параметрів у різних рідинах ультразвуковий датчик був встановлений у спеціальному слоті та підключений до плати датчика. Далі всі досліджувані рідини послідовно поміщали у вимірювальну посудину для проведення необхідних вимірювань. У цьому дослідженні як зразки використовували бензин, дизельне паливо, етанол і воду.

Для зв'язку з датчиком слід дотримуватися визначеної схеми потоку повідомлень і передавати дані згідно з протоколом датчика. У процесі вимірювань модуль спочатку підключається до датчика температури, після чого виконується вимірювання температури. Отримані температурні дані використовуються для розрахунку середнього значення, а далі розпочинається збирання даних з ультразвукового датчика. Ультразвукові дані фіксуються в режимі реального часу, і після певного

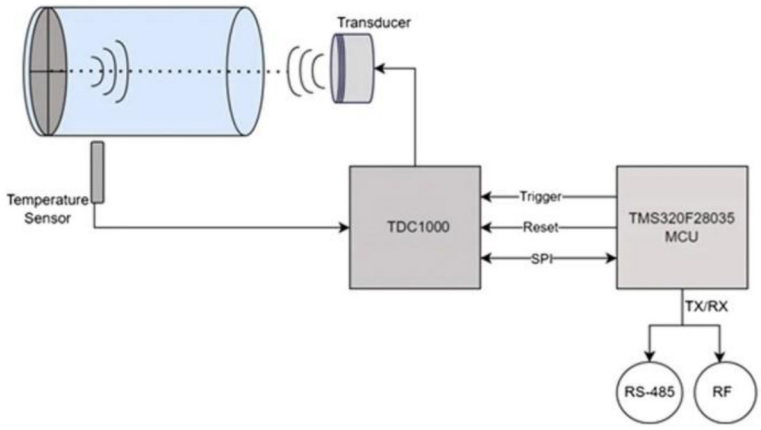


Рис. 5. Схема приладу на основі ультразвукового датчика

періоду часу визначається їхнє середнє значення, що дозволяє отримати інформацію про температуру та часові характеристики зразка.

Усі зразки для вимірювань тестували в мірній посудині об'ємом 500 мл. Спочатку вимірювання проводили при кімнатній температурі, а потім експериментальну установку розміщували в спеціальну тестову камеру з можливістю регулювання температури. Це дозволило здійснювати ультразвукові вимірювання параметрів бензину, дизельного палива, етанолу та води в діапазоні температур від –20 °C до +60 °C. Кожен зразок використовували лише один раз, оскільки повторне застосування могло спричинити хімічну деградацію через вплив екстремальних температур, що могло б вплинути на точність наступних вимірювань. Тому для кожного зразка проводилося лише одне випробування.

Серед усіх методів оцінки якості дизельного палива діелектричний метод заслуговує на особливу увагу. Діелектричні датчики виявляють зміни навколишнього середовища шляхом аналізу змін електричних властивостей. Для визначення коефіцієнта пропускання в діапазонах низьких, середніх і високих частот застосовуються різні методи та схеми. Важливим аспектом є врахування явищ поляризації електродів на низьких частотах, оскільки частота залежить від природи та електропровідності досліджуваного матеріалу.

Вимірювання здійснювали за допомогою діелектричного датчика, оснащеного відповідною електронною картою. Датчик працює через протокол RS485 зі швидкістю 9600 біт/с і реагує на різні команди. Вбудований температурний сенсор надає інформацію про температуру, а завдяки спеціальній конструкції пристрою отримуються дані щодо діелектричної проникності речовин у каналах. Дослідження проводили на зразках бензину, дизельного палива, етанолу та води. Для більшої точності отримані результати порівнювали з ультразвуковими вимірюваннями.

Діелектричний датчик помістили в випробувальну посудину, де мали вимірювати зразки, а потім послідовно виміряли діелектричні проникності зразків рідин, таких як бензин, дизельне паливо, етанол і вода. Вимірювання проводили при кімнатній температурі, а додаткові вимірювання проводили, змінюючи температуру навколишнього середовища від –20 °C до +60 °C. Під час випробування в холодильній камері через деякий час спостерігалися порушення рідкої форми дизельного палива.

Цей тест проводився з використанням автомобільного палива, що містить певну присадку. Такі присадки, як етанол, є речовинами, спрямованими на підвищення ефективності палива. У результаті випробувань, проведених з високими концентраціями присадок, зміни діелектричної проникності дизельного та бензинового палива в обох типах палива діелектричні проникності зменшуються зі зниженням температури. Незважаючи на низьку розчинність води в дизельному паливі та низку процедур, розроблених і необхідних стандартами, вміст води в паливі все одно може перевищувати допустиме значення [10, с. 4].

Висновки. Мікроелектронні методи аналізу дозволяють підвищити точність і швидкість контролю якості дизельного палива. Ці методи дають змогу оперативно виявляти відхилення у складі пального, що особливо важливо для забезпечення відповідності нормативним стандартам. Найперспективнішими є спектрометричні, діелектричні та акустичні методи. Подальші дослідження мають бути спрямовані на створення інтегрованих систем моніторингу, які поєднуватимуть кілька методів для підвищення точності аналізу.

Список літератури:

1. L. Monteiro, P. Zoio, B. Carvalho. Quality Monitoring of Biodiesel and Diesel/Biodiesel Blends: A Comparison between Benchtop FT-NIR versus a Portable Miniaturized NIR Spectroscopic Analysis. Scientific journal Processes Volume 11, Number 4, 2023. – pp. 1–16. ISSN: 2227-9717 https://doi.org/10.3390/pr11041071

2. M. Patlak, M. Cuncas, U. Taskiran. The Innovative Approach to Real-Time Detection of Fuel Types Based on Ultrasonic Sensor and Machine Learning. Arabian journal for Science and Engineering Volume 49, pages 16571–16591, 2024. ISSN: 2191-4281 https://doi.org/10.1007/s13369-024-09092-5

3. R. Costa-Felix, M. Figueiredo, A. Alvarenga. An ultrasonic method to appraise diesel and biodiesel blends. Scientific journal Fuel Volume 227, Number 1, 2018. – pp. 1–4. ISSN: 1873-7153 https://doi.org/10.1016/j.fuel.2018.04.077

4. M. Borecki, M. Geca, L. Zan. Multiparametric Methods for Rapid Classification of Diesel Fuel Quality Used in Automotive Engine Systems. Scientific journal Energies Volume 17, Number 16, 2024. – pp. 1–42. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en17164189

5. M. Borecki, P. Prus, M. Korwin-Pawlowski. Capillary Sensor with Disposable Optrode for Diesel Fuel Quality Testing. Scientific journal Sensors Volume 19, Number 9, 2019. – pp. 1–18. ISSN: 1424-8220 https://doi.org/10.3390/s19091980

6. N. Mengistu, M. Mekonen, Y. Ayalew. Experimental investigation on diesel engine performance and emission characteristics using waste cooking oil blended with diesel as biodiesel fuel. Scientific journal Discover Energy Volume 45, Number 26, 2024. – pp. 1–18. ISSN: 2730-7719

7. A. Riaz, M, R. Mohamed, M. Sarker. Review on Comparison of Different Energy Storage Technologies Used in Micro-Energy Harvesting, WSNs, Low-Cost Microelectronic Devices: Challenges and Recommendations. Scientific journal Sensors Volume 21, Number 15, 2021. – pp. 1–33. ISSN: 1424-8220 https://doi.org/10.3390/s21155041

8. K. Poyadji, M. Stylianou, A. Agapiou. Determination of Quality Properties of Low-Grade Biodiesel and Its Heating Oil Blends. Scientific journal Environments Volume 5, Number 9, 2018. – pp. 1–16. ISSN: 2076-3298 https://doi.org/10.3390/environments5090096

9. J. Matijošius, O. Orynycz, S. Kovbasenko. Testing the Indicators of Diesel Vehicles Operating on Diesel Oil and Diesel Biofuel. Scientific journal Energies Volume 15, Number 24, 2022. – pp. 1–10. 1996–1073 https://doi.org/10.3390/en15249263

10. Ł. Macioszek, D. Sobczyński. Moisture Content Assessment of Commercially Available Diesel Fuel Using Impedance Spectroscopy. Scientific journal Energies Volume 17, Number 8, 2024. – pp. 1–17. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en17081903

11. P. Łagowski, G. Wcisło, D. Kurczyński. Study of Combustion Process Parameters in a Diesel Engine Powered by Biodiesel from Waste of Animal Origin. Scientific journal Energies Volume 17, Number 23, 2024. – pp. 1–19. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en17235857

12. L. Chybowski, M. Szczepanek, T. Pusty. Evaluation of the Ignition Properties of Fuels Based on Oil Diesel Fuel with the Addition of Pyrolytic Oil from Tires. Scientific journal Energies Volume 18, Number 4, 2025. – pp. 1–12. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en18040860

13. J. Ziółkowski, M. Oszczypała, J. Małachowski. Use of Artificial Neural Networks to Predict Fuel Consumption on the Basis of Technical Parameters of Vehicles. Scientific journal Energies Volume 14, Number 9, 2021. – pp. 1–23. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en14092639

14. F. Delussu, F. Imran, C. Mattia. Fuel Prediction and Reduction in Public Transportation by Sensor Monitoring and Bayesian Networks. Scientific journal Sensors Volume 21, Number 14, 2021. – pp. 1–27. ISSN: 1424-8220 https://doi.org/10.3390/s21144733

15. M. Rykała, M. Grzelak, Ł. Rykała. Modeling Vehicle Fuel Consumption Using a Low-Cost OBD-II Interface. Scientific journal Energies Volume 16, Number 21, 2023. – pp. 1–23. ISSN: 1996-1073 https://doi.org/10.3390/en16217266

Kochmala V. B., Pinaev B. O., Shpirko O. A. ANALYSIS OF THE USE OF MICROELECTRONIC DEVICES FOR DETERMINING THE TYPE AND QUALITY OF DIESEL FUEL

The modern development of the fuel and energy sector requires the implementation of advanced technologies for fuel quality control. It has been established that the growing demands for environmental sustainability, efficiency, and safety in fuel resource utilization necessitate the improvement of methods for analyzing fuel characteristics.

The article explores and defines one of the key directions in this field – the implementation of microelectronic devices for the rapid determination of the physicochemical properties of fuel. These devices enable quick and accurate assessment of composition, density, viscosity, octane and cetane numbers, as well as the presence of impurities and contaminants. It has been proven that the application of sensor technologies and spectroscopic analysis methods enhances the reliability of results and minimizes human error.

The study examines how artificial intelligence and machine learning open new opportunities for predicting fuel quality based on large datasets. Algorithms analyze information from sensors, modeling changes in characteristics under various influencing factors. This allows for the timely detection of deviations from regulatory standards and prevents the use of substandard fuel.

Automated quality control systems are also becoming increasingly popular among oil refining enterprises and fuel stations. It has been established that these devices enable real-time monitoring of fuel composition and properties, ensuring compliance with international standards such as ISO and Euro-6. Modern microelectronic fuel quality control systems are integrated into the Internet of Things (IoT) networks, facilitating centralized data collection and analysis. This not only allows for prompt responses to detected deviations but also enables the prediction of potential issues at early stages.

The article outlines methods for analyzing the physicochemical characteristics of diesel fuel using microelectronic devices. A review of modern approaches to measuring fuel parameters has been conducted, identifying the advantages and limitations of various methods. Recommendations for improving the diesel fuel quality assessment system have been proposed.

Key words: *diesel fuel, quality control, microelectronic devices, cetane number, fuel analysis, fuel efficiency.*

УДК 621.397.42-883-047.58
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/15

Лактіонов О. І.
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Боряк Б. Р.
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Янко А. С.
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Михайліченко О. В.
Національний університет
«Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

ПРОЄКТУВАННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНОГО ПРОТОТИПУ КРІПЛЕННЯ ВІДЕОКАМЕРИ ТА ДОДАТКОВОГО ОБЛАДНАННЯ

У статті розглянуто проєктування та виготовлення мінімально функціонального прототипу кріплення для надійної фіксації відеокамери та супутнього обладнання. За допомогою системи автоматизованого проєктування (САПР) розроблено точну тривимірну модель, адаптовану до наявного обладнання, з кріпильними отворами М3 та вирізами для самостопорних гайок. Фіксація здійснюється міцним кронштейном на трубу 30 × 30 × 3 мм з урахуванням стандартів допусків і посадок, що гарантує точність та надійність з'єднання. Рішення є універсальним для фіксації різних відеокамер, включаючи Raspberry Pi Camera Module 3 та FPV камери.

Результати проведеного дослідження увінчалися успішним отриманням мінімально функціонального прототипу, який забезпечує надійне монтування відеокамери, відеопередавача та антени, що є необхідним для подальшого експериментального вивчення завдань комп'ютерного зору. Важливо відзначити, що порівняно з раніше розробленим прототипом корпусу лабораторного стенду, запропонована конструкція вже на етапі проєктування враховує потенційну необхідність розміщення пристроїв, відповідальних за дистанційну передачу значних обсягів відеоданих. З метою підвищення загальної надійності та механічної міцності конструкції, товщина її стінок була збільшена до 3 мм. Місце кріплення тримача антени отримало спеціальну фаску та округлення, що додатково посилює міцність і довговічність цього важливого елементу. Внутрішня частина корпусу також ретельно продумана та має отвори під гвинти, доповнені фасками для забезпечення їх прихованого монтажу, що покращує естетичний вигляд та запобігає випадковим пошкодженням.

Процес створення фізичної моделі відзначався ітераційним підходом, на початкових етапах якого виготовлялися спрощені макети кріплень з мінімальною товщиною стінок у 1 мм та низьким відсотком заповнення (15 %). Цей крок був спрямований на оперативну перевірку ключових розмірних характеристик майбутньої конструкції. Завдяки використанню сучасного 3D-принтера Bambu Lab A1, що працював на максимальній швидкості (100 %), загальний час виготовлення одного прототипу склав менше ніж три години, що демонструє ефективність застосування адитивних технологій для швидкого прототипування. Розроблена конструкція також закладає основу для майбутнього масштабування та інтеграції додаткових функціональних модулів, що стало можливим завдяки передбаченим кріпильним отворам, що робить її гнучким рішенням для різноманітних застосувань.

Ключові слова: *адитивні технології, прототип кріплення, ітеративне прототипування, модульне кріплення, відеокамера, відеопередавач, антена, комп'ютерний зір, 3D-друк, швидке прототипування.*

Постановка проблеми. Головною передумовою виготовлення продукції, за допомогою інструментів адитивних технологій, є існування попередньо створеної тривимірної моделі у форматах.stl,.stp чи інших.

При масштабуванні виробничого процесу тривимірний друк не є рентабельним, оскільки виготовивши прес-форму для штампування під тиском та використавши прес за годину часу можна виготовити значно більше продукції. Єдиним обмеженням є наявність вказаного устаткування, яке дороге та потребує висококваліфікованого працівника.

Якщо необхідно виготовити деталі у кількості десятки штук, то використання тривимірного друку є ефективнішим, бо не потребує наявності висококваліфікованого фахівця. Це надає можливість виготовити унікальну конструкцію деталі (наприклад кріплення відеокамери), де її необхідно лише накреслити відповідно до завдання.

Існуючі кріплення відеокамер та додаткового обладнання, зокрема відеопередавачів, антен, кронштейнів дороговартісні і не універсальні. Схожим рішенням є модель корпусу DJI Digital FPV Air Unit із напрацювань [1, с. 1], але вказаний корпус адаптований для повітряних дронів. Час виготовлення таких деталей, без використання адитивних технологій, нараховує дні чи навіть тижні. В умовах сьогодення це значний проміжок часу, де рішення необхідно виготовляти набагато швидше, оскільки процес розробки та виготовлення є ітераційним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчує значний інтерес до розробки кріплень для камер у складі роботизованих систем. Зокрема, у роботі [2, с. 482] досліджено робота-оператора зі штучним інтелектом, де одним із ключових елементів є панорамно-нахильний пристрій для кріплення камери, що монтується на шасі робота. Дослідження [3, с. 96] фокусується на системі комп'ютерного зору роботизованої системи, в якій кріплення камери виконує допоміжну функцію.

Близьким до представленої роботи є дослідження [4, с. 135], що вивчає модель рухомого кріплення для оптичних сенсорів мобільної роботизованої платформи, оснащеної автономною системою стабілізації, що є її основною перевагою.

Типові конструкції кріплень камер, як показано в [5, с. 1], передбачають універсальність застосування на різних рамах дронів і складаються з пластикових (elastand100) кронштейнів для сервоприводів та камер, карбонової пластини та сервоприводу tower pro mg90s micro servo. Інший підхід до кріплення камери [6, с. 2] полягає у використанні двох серводвигунів, що забезпечує унікальну конструкцію. Проте, функціональність обох зазначених кріплень [5, 6] не включає можливості використання відеопередавача.

Питання використання відеопередавача залишається поза межами розгляду в роботах [7, с. 35; 8, с. 156], які зосереджуються на програмній складовій, використовуючи в апаратній частині лише відеокамеру та одноплатний комп'ютер для експериментів у лабораторних умовах.

У роботі [9, с. 10798] представлено розроблені конструкції саморобних механізмів для зміни положення камери в просторі на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi та сервоприводів, з акцентом на розробці та тестуванні корпусу й рухомої платформи для лабораторних досліджень. Проєкт [10, с. 4] пропонує 3D-друкований корпус для камери Raspberry Pi з механізмом нахилу, що складається з двох сервоприводів для зміни положення камери у вертикальній та горизонтальній площинах з можливістю нижнього розміщення на механічній платформі.

Саморобну систему з оптичним скануванням розглянуто в [11, с. 5], де використано камеру на основі Raspberry Pi, змонтовану в корпусі з панорамним оглядом, приділяючи особливу увагу поєднанню корпусу з сервоприводом для зміни положення камери, що забезпечує мобільність та гнучкість у польових умовах. Розроблений корпус із функцією повороту камери представлено в [12, с. 3], де за основу взято модуль Raspberry Pi та сервоприводи для керування, з акцентом на енергетичній ефективності та точності стеження для використання в мобільних пристроях і роботизованих платформах.

Механізм зміни положення камери реалізовано в роботі [13, с. 2378], де описано створення Wi-Fi системи відеоспостереження на базі ESP32 з дистанційним керуванням напрямом об'єктива, зосереджуючись на апаратній реалізації за допомогою сервоприводів та програмному забезпеченні для з'єднання з браузером користувача. Можливість зміни положення відеокамери також реалізовано в [14, с. 14], де запропоновано систему з двома сервоприводами для орієнтації камери у вертикальній та горизонтальній площинах, керовану на основі відстеження положення голови користувача для динамічного налаштування кута огляду, що може бути застосовано в роботизованих платформах з відділеною вежею камери. У цій роботі представлено як апаратну

Рис. 1. Прототип корпусу лабораторного стенду для опанування основ комп'ютерного зору на базі одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 5

реалізацію корпусу, так і програмне забезпечення для керування камерою.

Постановка завдання. Метою дослідження є розробка та виготовлення першого функціонального прототипу кріплення відеокамери методом 3D-друку для перевірки можливості швидкого створення унікальних конструкцій із зменшенням часу та витрат порівняно з класичними технологіями.

Для досягнення мети у процесі дослідження використовується середовище розробки Solid Edge для створення унікальних конструкцій кріплення відеокамер й іншого обладнання враховуючи вимоги допусків і посадок. Друк здійснюється засобами Bambu Studio на принтері Bambu Lab A1.

Серед цільових підзавдань у дослідженні виділено врахування наявних додаткових компонентів, якими буде здійснюватися кріплення деталей, зокрема самостопорна гайка M3. Тому кріпильні отвори корпусу мають мати діаметр 3 мм та можливість прихованого кріплення гвинтів.

Корпус повинен мати кріплення для розміщення трьох відеокамер, зокрема Raspberry Pi Camera Module 3, передавача, антени. Також потрібно передбачити кріплення корпусу до об'єктів, де він буде використовуватися. Монтаж буде здійснюватися до труби профільної 30 × 30 × 3 мм. Для прискорення монтажу корпусу створити посадкові місця для вкладання стопорних гайок.

Виклад основного матеріалу. В рамках підготовчого етапу дослідження (листопад 2024 – лютий 2025 років) розроблено прототип корпусу лабораторного стенду, який включав кроковий двигун, драйвер, одноплатний комп'ютер Raspberry Pi 5 та набір камер, котрі монтувалися на спеціальне кріплення валу двигуна, рис. 1.

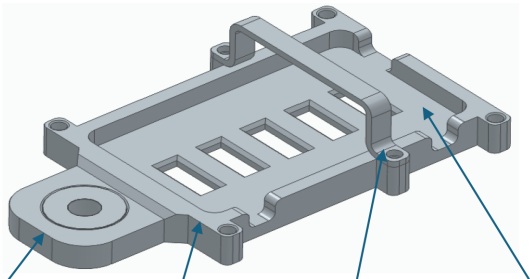
Але розроблене рішення та його функціонал зорієнтований на використання крокового електродвигуна Nema 17 та не враховує передачу відеосигналу на певну відстань. Щоб забезпечити вхідні умови запропоновано модель одного з перших базових рішень корпусу, рис. 2.

Як видно з рис. 2 базова модель кріплення корпусу включає підшипник на який зверху має кріпитися тримач антен, а з низу привідний двигун [15, с. 1]. Це дозволить рухати камерами по осі *X*. В тім, було ухвалено рішення спростити конструкцію кріплення й виключити підшипник.

У процесі досліджень та експлуатації зупинилися на наступній конструкції корпусу відеопередавача, рис. 3. Як видно з рис. 3 корпус відеопередавача з ліва на право має кріплення для тримача відеокамер, кріплення для кронштейну. Для фіксації антени створено направляючу із прорізами. Для поліпшення охолодження відеопередавача створено вентиляційні отвори та передбачено спеціальні кріплення для гвинтів. Це дозволяє утворити повітряний проміжок між відеопередавачем та корпусом корпусу.

Повне рішення для кріплення відеопередавача, камери та іншого обладнання подано на рис. 4.

Як видно з рис. 4 запропонована конструкція крім корпусу відеопередавача, що розглянуто



Підшипник MR 104 4x10x3 для кріплення тримача камер (умовне позначення)	Корпус для відеопередавача	Тримач відеопередавача	Місце кріплення для антени

Рис. 2. Базова модель кріплення корпусу відеопередавача та додаткового обладнання

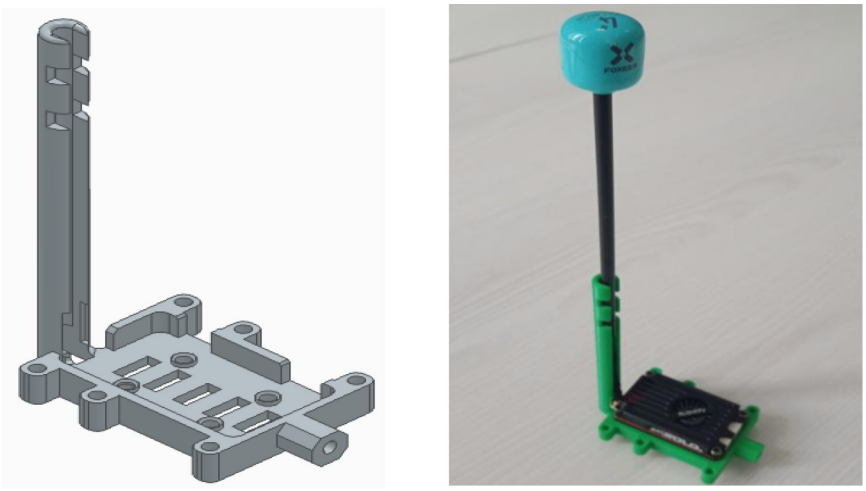


Рис. 3. Запропонована модель корпусу відеопередавача (ліворуч – цифровий двійник, праворуч – виготовлений прототип)

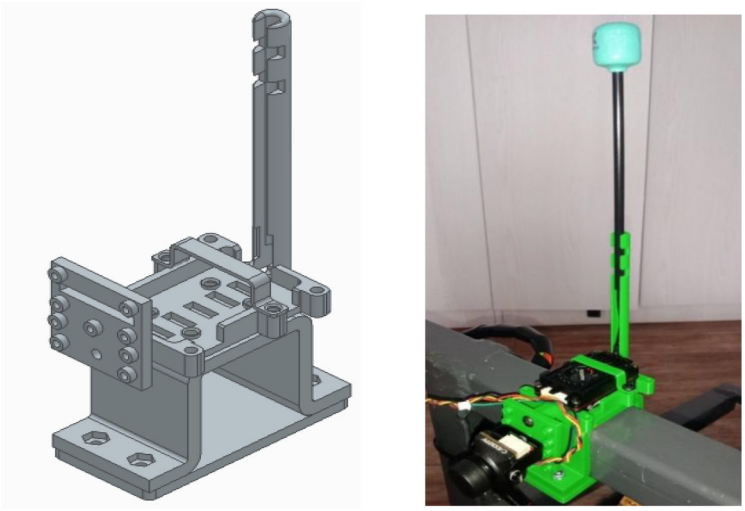


Рис. 4. Зовнішній вигляд першого мінімально функціонального прототипу кріплення відеокамери створеного методом 3D-друку (ліворуч – цифровий двійник, праворуч – виготовлений прототип)

на рис. 3, складається із кріплення камери та кронштейну кріплення всього пристрою на трубу 30x30x3 мм. При створенні кріплення камери розміри визначалися шляхом вимірювання та із офіційної документації [16, с. 1].

Варто відмітити, що запропоноване рішення має посадочні місця для гайок, де друк відбувався у кілька етапів. Першочергово друкували макет деталі товщиною 1 мм, щоб перевірити розміри, рис. 5.

Після перевірки якості друку та вимірювання розмірів проводився друк всіх деталей моделі корпусу. Перевагами створеної моделі корпусу є подвійне використання, де передбачається використання для різних завдань. До конструкції кріплення можуть бути приєднані інші модулі, це передбачено для майбутнього масштабування. У після воєнний період виготовлені корпуси можуть зберігатися на складі. Таким чином запропонована конструкція може бути використана для кріплення відеокамер, відеопередавача, антени для дослідження комп'ютерного зору тощо.

Наразі обмеженнями конструкції є відсутність механізму повороту камери та розміщення корпусу під кутом, щоб не потрапляла волога. Ці протиріччя будуть усунені у наступних версіях кріплень.

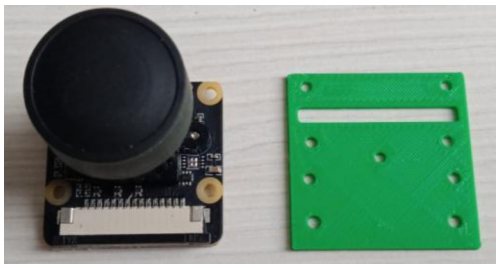


Рис. 5. Зовнішній вигляд відеокамери та макету деталі для перевірки якості друку та точності створених розмірів деталі

Висновки. Завдання виготовлення першого функціонального прототипу кріплення відеокамери методом 3D-друку вирішується шляхом розробки необхідної досліджуваної тривимірної моделі у системі проєктування відповідно до вхідних даних. Після перевірки вірності побудови моделі здійснюється друк деталі за допомогою принтера Bambu Lab A1. Тривалість друку одного прототипу триває менше трьох годин. Запропонована конструкція кріпиться на трубу 30 × 30 × 3 мм і дозволяє зафіксувати відеокамеру, відеопередавач та антену.

Список літератури:

1. Ben Smith. DJI Digital FPV Air Unit and Camera mount. *https://www.thingiverse.com*. URL: https://www.thingiverse.com/thing:4082399
2. Gatta G. D., Birch W. D., Rotiroti N. Reinvestigation of the crystal structure of the zeolite gobbinsite: A single-crystal X-ray diffraction study. *American Mineralogist*. 2010. Vol. 95, no. 4. P. 481–486. URL: https://doi.org/10.2138/am.2010.3390
3. Sukop M., Ferenčík P. Design of intelligent robotic cell with camera system. *Technical sciences and technologies*. 2019. no. 3(17). P. 96–104. URL: https://doi.org/10.25140/2411-5363-2019-3(17)-96-104
4. Ткачук А. Г., Безвесільна О. М., Кравчук А. Р. Проєктування моделі рухомого кріплення для оптичних сенсорів мобільної роботизованої платформи з автономною системою стабілізації. *Технічна інженерія*. 2023. no. 1(91). С. 133–139. URL: https://doi.org/10.26642/ten-2023-1(91)-133-139
5. Механізм повороту камери fpv коптера із універсальною установкою на всі рами (2085706200). *Bigl. ua – 108 872 427 Товарів від Перевірених Продавців з Усієї України!*. URL: https://bigl.ua/ua/p2085706200-mehanizm-povorotu-kameri
6. 1Set DC 4,8-5V Dual Servo Gimbal Halterung 29 × 29mm Kamera Pan/Tilt Ständer mit 2PCS 9G Lenkgetriebe für RC FPV Drone Kopf Tracker – AliExpress 26. *Aliexpress*. URL: https://www.aliexpress.com
7. Laktionov O., Yanko A., Hlushko A. Development of a hardware-software solution for detection of complex-shaped objects in video stream. *Technology audit and production reserves*. 2024. Vol. 6, no. 2(80). P. 35–40. URL: https://doi.org/10.15587/2706-5448.2024.319799
8. Boriak B., Yanko A., Laktionov O. Model of an automated control system for the positioning of radio signal transmission/reception devices. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024. Vol. 2024, no. 4. P. 156–167. URL: https://doi.org/10.32620/reks.2024.4.13
9. Mil-Homens D. A., Zachi A. R. L. Assembly and testing of a pan-tilt camera mechanism for robotics visual servoing applications. *Brazilian Journal of Development, Curitiba*, 2022, Vol. 8, no. 2, P. 10794–10805. URL: https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-156
10. Kuzey B., Yemenicioğlu E., Kuzucu, Ahmet. 2 Axis Gimbal Camera Design. 2007. P. 1–9. URL: https://doi.org/10.13140/2.1.3262.2886
11. Xi Z., Hopkinson C., Rood S. B., Barnes C., Xu F., Pearce D., Jones E. A Lightweight Leddar Optical Fusion Scanning System (FSS) for Canopy Foliage Monitoring. *Sensors*, 2019, no. 19(18), 3943. URL: https://doi.org/10.3390/s19183943
12. Tran Ph. C., Nguyen H. Tr., Nguyen A. Q., Le Th. Tr., Phan H. Ng., Nguyen C. X. Design control system for Pan-Tilt Camera for Visual Tracking based on ADAR method taking into account energy output. In *III International Conference "Energy Efficiency and Energy Saving in Technical Systems" (EEESTS-2021)*, article no. 02007, pp. 1–10. 2021. DOI: https://doi.org/10.1051/e3sconf/202127902007
13. Umare A., Ukey H., Umale O., Patil U.l, Umbarje O., Upase S., Khedekar L. Wi-Fi Pan Tilt Surveillance Camera Using ESP32. *International Journal for Research in Applied Science & Engineering Technology (IJRASET)*, 2023, Vol. 11(VI), P. 2375–2382. URL: https://doi.org/10.22214/ijraset.2023.53532
14. Design and implementation of a head tracking controlled pan and tilt vision system. URL: https://etd.lib.metu.edu.tr/upload/12616286/index.pdf
15. Підшипник MR 104 4*10*3. *https://podshipnik.ua*. URL: https://podshipnik.ua/ua/product/pidshypnyk-mr-104-4-10-3-00013963
16. Ширококутна камера Raspberry Pi Camera Module 3 Wide NoIR (120°, 12МП, Sony IMX708). URL: https://surl.li/vvtzza

Laktionov O. I., Boryak B. R., Yanko A. S., Mykhailichenko O. V. DESIGN OF A FUNCTIONAL PROTOTYPE FOR VIDEO CAMERA AND AUXILIARY EQUIPMENT MOUNTING

The article discusses the design and manufacturing of a minimally functional prototype mount for the reliable fixation of a video camera and related equipment. Using a computer-aided design (CAD) system, a precise three-dimensional model was developed, adapted to existing equipment, with M3 mounting holes and cutouts for self-locking nuts. Fixation is achieved with a sturdy bracket on a 30 × 30 × 3 mm tube,

considering standards for tolerances and fits, ensuring connection accuracy and reliability. The solution is versatile for fixing various video cameras, including the Raspberry Pi Camera Module 3 and FPV cameras. The research successfully resulted in a minimally functional prototype for mounting a video camera, video transmitter, and antenna, necessary for the experimental study of computer vision tasks. Notably, compared to a previously developed laboratory stand housing prototype, the current design already accounts for the potential placement of devices responsible for the remote transmission of significant volumes of video data. To enhance overall and mechanical reliability, the wall thickness was increased to 3 mm. The antenna holder mount features a specific chamfer and rounding, further strengthening the durability of this important element. The interior of the housing is also carefully designed with screw holes and countersinks for concealed mounting, improving aesthetics and preventing accidental damage. The physical model creation involved an iterative approach, initially producing simplified 1 mm thick mock-ups with a 15 % infill for rapid verification of key dimensions. Employing a high-speed Bambu Lab A1 3D printer (100 %), the total manufacturing time for a single prototype was less than three hours, demonstrating the effectiveness of additive technologies for rapid prototyping. The developed design also provides a foundation for future scaling and integration of additional functional modules, facilitated by the incorporated mounting holes, making it a flexible solution for diverse applications.

Key words: *additive technologies, mounting prototype, iterative prototyping, modular mounting, video camera, video transmitter, antenna, computer vision, 3D printing, rapid prototyping.*

УДК 621
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/16

Левченко Д. С.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Баранов Є. О.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Гаврилюк А. О.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Малий О. Ю.
Національний університет «Запорізька політехніка»

АВТОНОМНА НАВІГАЦІЯ ТА СИСТЕМИ ЗВ'ЯЗКУ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ АПАРАТІВ В УМОВАХ ОБМЕЖЕНОГО ЗВ'ЯЗКУ

Стаття присвячена дослідженню технологій автономної навігації та систем зв'язку безпілотних літальних апаратів (БпЛА) в умовах обмеженого зв'язку. Проаналізовано ключові виклики, з якими стикаються розробники автономних БпЛА: навігація без GPS-сигналу, прийняття рішень в невизначених умовах та забезпечення захищених каналів зв'язку при радіоелектронній протидії. Розглянуто альтернативні методи навігації – інерціальну навігацію, візуальну одометрію та технологію SLAM, що дозволяють БпЛА ефективно орієнтуватися у просторі без GPS. Досліджено сучасні алгоритми прийняття рішень на основі машинного навчання, нейронних мереж та глибокого навчання з підкріпленням, які забезпечують адаптивність БпЛА до динамічних середовищ та ефективне уникнення перешкод. Особливу увагу приділено технологіям стійкого зв'язку, включаючи адаптивні системи, MIMO, а також методам захисту від перехоплення і придушення сигналу: шифруванню даних, FHSS та DSSS. Розглянуті технології забезпечують надійний зв'язок БпЛА навіть в умовах активної радіоелектронної протидії. Вирішено питання інтеграції різних підсистем БпЛА та обробки великих обсягів даних у реальному часі. Запропоновано модель циклічного процесу обробки даних для ефективного прийняття рішень та виконання дій автономними БпЛА. Результати дослідження мають практичну цінність для розробників та операторів безпілотних систем. Розглянуті технології та методи можуть бути впроваджені для підвищення автономності, надійності та безпеки БпЛА у різноманітних сферах застосування – від цивільного моніторингу до військових операцій у складних умовах.

Ключові слова: *безпілотні літальні апарати (БпЛА), автономна навігація, системи зв'язку, обробка даних в реальному часі, штучний інтелект, інтеграція систем, енергоефективність, захист інформації, адаптивні алгоритми, сенсорні технології.*

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток технологій безпілотних літальних апаратів (БпЛА) відкриває нові горизонти їх застосування у різноманітних сферах людської діяльності, від сільського господарства до військової розвідки [1, с. 1672]. Однак, з розширенням можливостей БпЛА зростає і складність завдань, які вони повинні виконувати, особливо в умовах автономної роботи та обмеженого зв'язку.

Надійна автономна навігація БпЛА при відсутності GPS-сигналу стає критично важливою для операцій у закритих приміщеннях, міських умовах з високою забудовою, та зонах радіоелектронного придушення [2, с. 104283]. Це вимагає розробки ефективних алгоритмів прийняття рішень для автономного режиму, здатних адаптуватися до змін середовища та оптимізувати маршрут без постійного контролю оператора [3, с. 334].

Забезпечення захищеного зв'язку між БпЛА та наземними станціями в умовах обмеженої видимості або активних перешкод [4, с. 1] має особливе значення для військових та критичних цивільних місій. Інтеграція різних підсистем БпЛА (навігаційної, управління польотом, сенсорної та комунікаційної) потребує оптимальної взаємодії компонентів та ефективної обробки даних у реальному часі [5, с. 200], що напряму впливає на енергоефективність апаратів [6, с. 175].

Нормативно-правове регулювання автономних БпЛА також залишається проблемним питанням. Відсутність чітких правових рамок та стандартів безпеки створює перешкоди для впровадження передових технологій у цивільній сфері [7, с. 16], особливо з огляду на потенційні ризики для приватності та безпеки громадян.

Вирішення цих взаємопов'язаних проблем вимагає комплексного міждисциплінарного підходу, який враховуватиме технологічні, правові та етичні аспекти розробки та застосування БпЛА [8, с. 8].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Інтенсивний розвиток БпЛА супроводжується зростанням наукових досліджень у сфері автономної навігації та систем зв'язку, про що свідчать численні публікації останніх років.

Кім Дж.-Х., Лі М.-С. [9, с. 2220] запропонували використання глибоких нейронних мереж для розпізнавання перешкод у реальному часі, що значно підвищує автономність БпЛА в складних середовищах. Лук'янеко О. та Золотов Д. [10, с. 22] розробили удосконалені методи Visual SLAM для навігації без GPS-сигналу, які забезпечують високу точність позиціонування навіть при обмеженій обчислювальній потужності бортових систем.

Питання енергоефективності БпЛА досліджували Міллер Б. і Томпсон Р. [6, с. 231301], запропонувавши адаптивне управління бортовими системами, що дозволило збільшити тривалість польоту на 25–30 %. Лю Ц. та співавтори [12, с. 125] зосередились на методах криптографічного захисту каналів зв'язку, створивши протоколи з високою стійкістю до перехоплення та підміни сигналу.

Куман С. та співавтори [1, с. 1680] провели порівняльний аналіз методів автономної навігації БпЛА та визначили їх оптимальні комбінації для різних сценаріїв застосування. Вілсон А. і Браун Дж. [8, с. 10] розробили комплексну модель регулювання автономних БпЛА, що враховує як технічні особливості систем, так і соціальні наслідки їх впровадження.

Серед вітчизняних досліджень варто відзначити роботу Леонової та співавторів [12, с. 105], які вивчали практичні аспекти застосування БпЛА в будівництві та логістиці, а також дослідження Зуєва і Карамана [17, с. 88], присвячене використанню БпЛА для моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури.

Постановка завдання. Незважаючи на значні досягнення в окремих аспектах проблеми, залишається невирішеним питання комплексної інтеграції різних підсистем БпЛА для забезпечення їх стабільної роботи в умовах обмеженого зв'язку та відсутності GPS-сигналу [14, с. 12].

Виклад основного матеріалу. Методи навігації без GPS набувають критичного значення для автономних БпЛА [13, с. 6131]. Інерціальна навігація на основі акселерометрів та гіроскопів дозволяє відстежувати рух БпЛА відносно початкової точки, визначаючи положення та орієнтацію в просторі без зовнішніх сигналів. Візуальна одометрія, що базується на аналізі послідовності зображень з бортових камер, ефективна в середовищах з чіткими візуальними орієнтирами [11, с. 320].

Технологія SLAM (Simultaneous Localization and Mapping) дозволяє БпЛА одночасно створювати карту невідомого середовища та визначати своє положення в ньому. SLAM використовує комбінацію сенсорних даних для побудови точної 3D-моделі оточення в реальному часі [17, с. 90].

Алгоритми прийняття рішень, що використовують методи машинного навчання та нейронні мережі, дозволяють БпЛА адаптуватися до динамічних середовищ [9, с. 2223]. Ці системи аналізують дані з усіх доступних джерел для визначення оптимального курсу дій, ефективно реагуючи на зміни середовища [15, с. 12].

Системи уникнення перешкод використовують ультразвукові датчики, стереокамери та лідари для виявлення та класифікації об'єктів, швидкої оцінки загроз та прийняття рішень щодо маневрування [17, с. 90]. Комплексна інтеграція цих компонентів створює систему автономної навігації, що дозволяє БпЛА виконувати складні місії з мінімальним втручанням людини (рис. 1).

Системи зв'язку та передачі даних забезпечують обмін інформацією між БпЛА та наземними станціями управління [14, с. 12]. Технології стійкого зв'язку включають адаптивні системи, які автоматично перемикаються між різними частотними діапазонами та протоколами залежно від умов середовища [16, с. 98].

Технологія MIMO (Multiple Input Multiple Output) використовує кілька антен для передачі та прийому сигналів, ефективно протидіючи перешкодам [14, с. 11]. Для зв'язку на великих відстанях або в умовах відсутності прямої видимості застосовуються супутникові системи зв'язку.

Для захисту від перехоплення використовуються алгоритми шифрування даних, такі як AES. Проти придушення сигналу застосовуються технології FHSS (Frequency Hopping

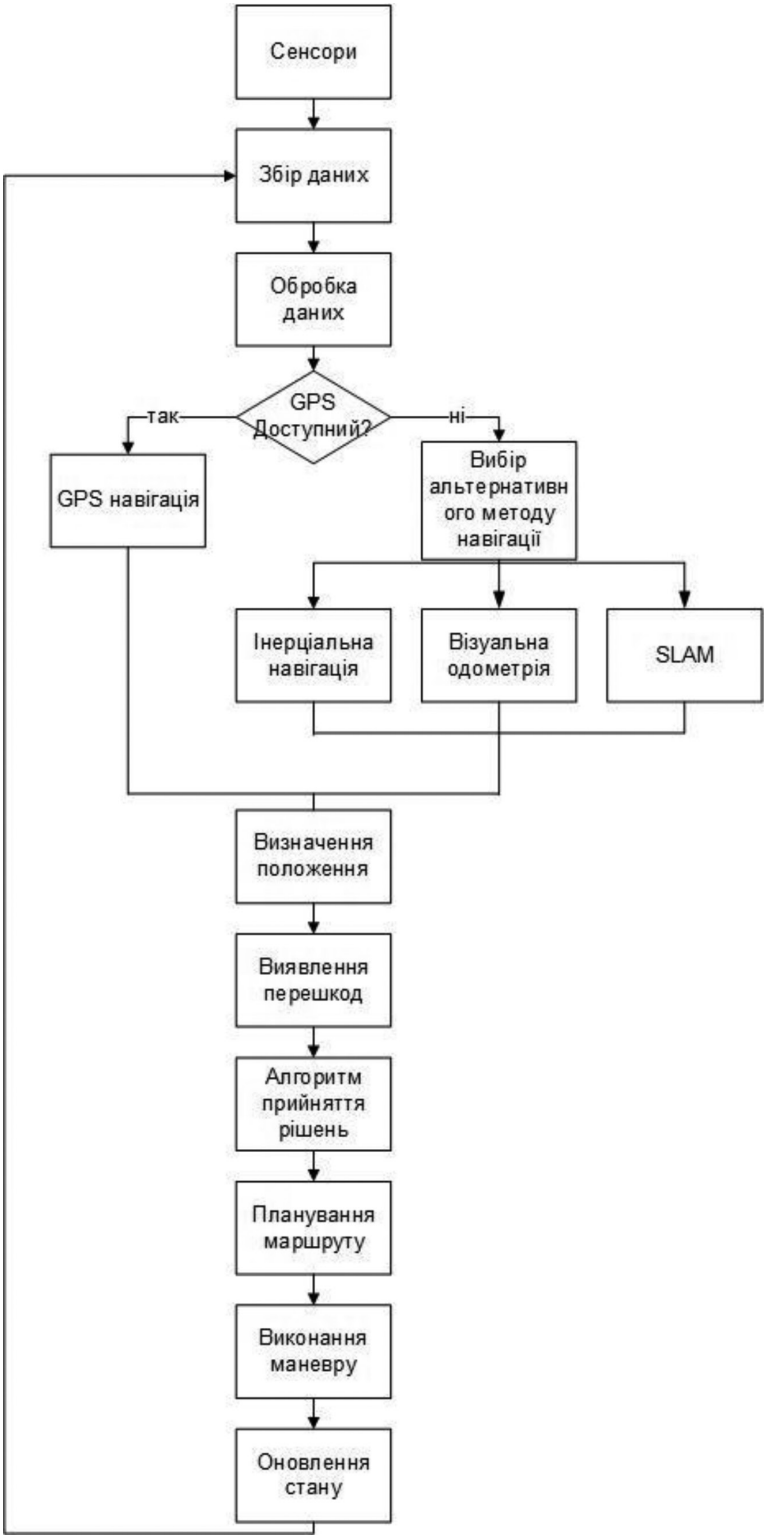


Рис. 1. Процес автономної навігації БпЛА

Spread Spectrum) та DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) [12, с. 47]. Направлені антени та формування променя зменшують ймовірність перехоплення та підвищують стійкість до перешкод [14, с. 13]. Сучасні БпЛА оснащуються системами виявлення та протидії радіоелектронному втручанню (рис. 2).

Таблиця 1 надає огляд ключових аспектів автономної навігації та систем зв'язку БпЛА.

Ключовим фактором ефективності БпЛА є інтеграція різних підсистем та обробка даних у реальному часі [18, с. 16]. Цей процес включає збір даних з різних сенсорів, їх фільтрацію, аналіз та виконання дій на основі проаналізованих даних (рис. 3).

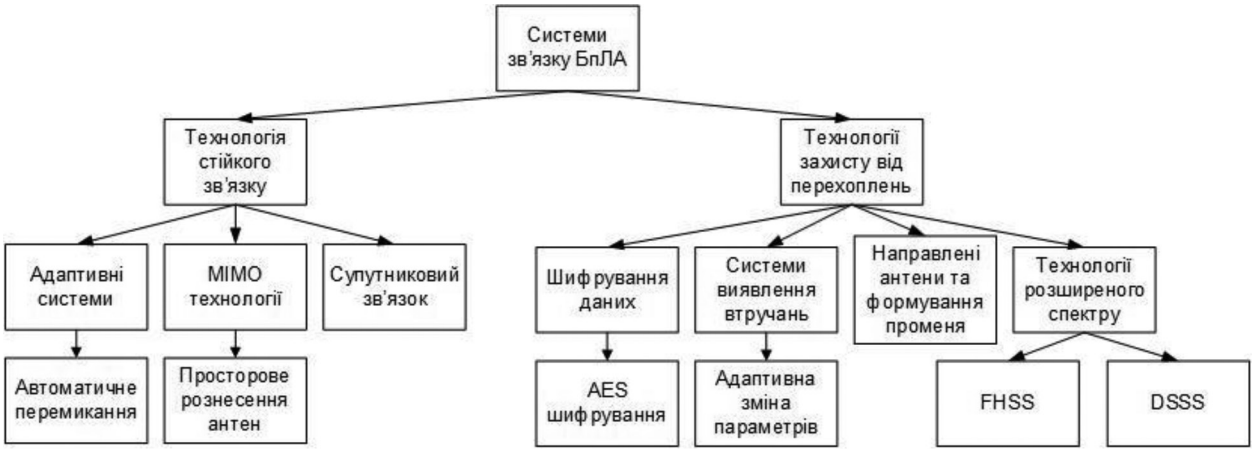


Рис. 2. Системи зв'язку БпЛА

Таблиця 1

Автономна навігація та системи зв'язку БПЛА

Категорія	Підкатегорія	Ключові технології та методи
Автономна навігація БПЛА	Методи навігації без GPS	– Інерціальна навігація (акселерометри, гіроскопи) – Візуальна одометрія – SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)
	Алгоритми прийняття рішень	– Машинне навчання – Нейронні мережі – Глибоке навчання з підкріпленням – Аналіз даних у реальному часі
	Системи уникнення перешкод	– Ультразвукові датчики – Стереокамери – Лідари – Алгоритми обробки даних в реальному часі
Системи зв'язку та передачі даних	Технології стійкого зв'язку	– Адаптивні системи зв'язку – MIMO (Multiple Input Multiple Output) – Просторове рознесення антен – Супутниковий зв'язок
	Захист від перехоплення та придушення сигналу	– Шифрування даних (AES) – FHSS (Frequency Hopping Spread Spectrum) – DSSS (Direct Sequence Spread Spectrum) – Направлені антени та формування променя – Системи виявлення та протидії радіоелектронному втручанню

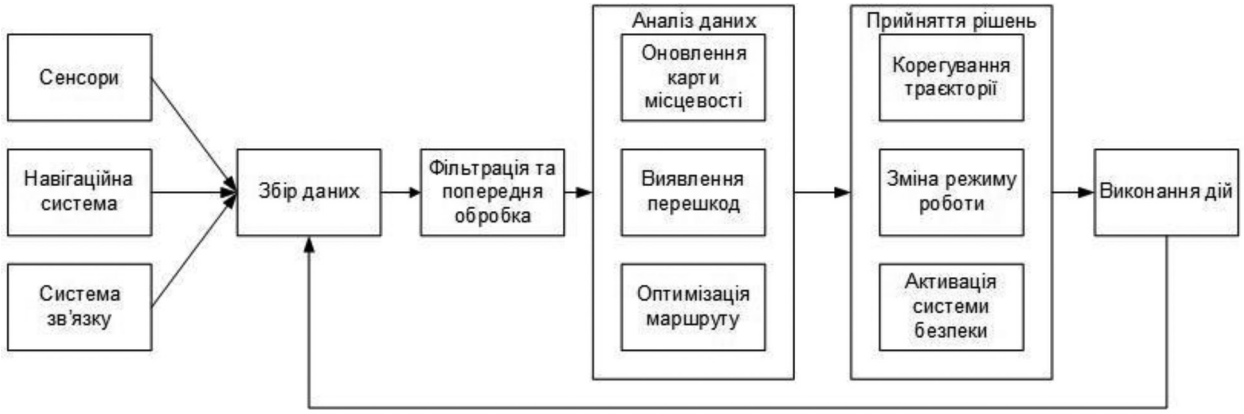


Рис. 3. Процес обробки даних в реальному часі

Ефективність обробки даних залежить не лише від потужності бортового комп'ютера, але й від оптимізації алгоритмів та архітектури системи [15, с. 15].

Висновки. У результаті проведеного дослідження визначено ключові аспекти автономної навігації та систем зв'язку БпЛА в умовах обмеженого зв'язку. Проаналізовано сучасні підходи до навігації без GPS-сигналу, включаючи інерціальну навігацію, візуальну одометрію та технологію SLAM, які забезпечують ефективне позиціонування в складних умовах. Встановлено, що адаптивні алгоритми на основі машинного навчання та нейронних мереж відіграють критичну роль у забезпеченні автономності БпЛА, дозволяючи ефективно уникати перешкод та оптимізувати траєкторію руху. Досліджено технології надійного та захищеного зв'язку, включаючи адаптивні системи, MIMO, методи шифрування даних, FHSS та DSSS. Запропоновано модель циклічного процесу обробки даних в реальному часі, яка забезпечує оптимальну взаємодію між навігаційною системою, системою прийняття рішень та комунікаційними модулями. Аналіз свідчить про необхідність мультидисциплінарного підходу до розробки автономних БпЛА, який поєднує досягнення в галузі штучного інтелекту, радіотехніки, сенсорних технологій та енергоефективних систем. Результати дослідження можуть бути використані при проектуванні нових поколінь БпЛА з підвищеним рівнем автономності та надійності.

Список літератури:

1. Kumar S., Dutta K., Sharma P. Autonomous navigation techniques for unmanned aerial vehicles: A comprehensive review. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2022. Vol. 58, No. 3. P. 1671–1694.

2. Zhang Y., Liu H. Vision-based navigation for UAVs in GPS-denied environments: Challenges and solutions. *Robotics and Autonomous Systems*. 2023. Vol. 159. P. 104283.

3. Wang J., Liu Y., Chen H. Decision-making algorithms for autonomous UAVs: From reactive to deliberative approaches. *Journal of Artificial Intelligence Research*. 2022. Vol. 74. P. 329–367.

4. Kim J.-H., Lee M.-C., Lee T.-S. Generalized UAV deployment for UAV-assisted cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/twc.2023.3345839

5. Li R., Wang S., Long D. Integrated system design for multi-functional UAVs: Balancing performance and energy efficiency. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2023. Vol. 28, No. 1. P. 186–217.

6. Miller B., Thompson R. Energy optimization strategies for extended UAV missions. *Journal of Power Sources*. 2022. Vol. 531. P. 231301.

7. Lukyanov O.E., Zolotov D.V. Methodological support for the training of UAV designers and operators. *Vestnik. Aerospace and Mechanical Engineering*. 2021. Vol. 20, No. 1. P. 14-28. URL: https://doi.org/10.18287/2541-7533-2021-20-1-14-28

8. Wilson A., Brown J. Ethical and legal challenges in autonomous UAV operations: A framework for responsible innovation. *Science and Engineering Ethics*. 2023. Vol. 29, No. 2. P. 1–23.

9. Kim J.-H., Lee M.-C., Lee T.-S. Generalized UAV deployment for UAV-assisted cellular networks. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2024. P. 1. URL: https://doi.org/10.1109/twc.2023.3345839 (date of access: 04.03.2025).

10. Johnson M.T., Rivera L. Advanced control mechanisms for swarm UAV coordination. *Journal of Aerospace Engineering*. 2023. Vol. 35, No. 2. P. 112-130. URL: https://doi.org/10.1061/jae.2023.35.2.112 (date of access: 04.03.2025)

11. Smith J., Garcia M. Advances in AI-driven UAV path planning for complex environments. *International Journal of Robotics Research*. 2023. Vol. 42, No. 5. P. 765–782. URL: https://doi.org/10.1109/ijrr.2023.7654321 (date of access: 04.03.2025).

12. Liu C., Xu J. A flight control system for quadrotor plant protection UAV based on RBF-PID algorithm. *Applied and Computational Engineering*. 2023. Vol. 20, No. 1. P. 220–230. URL: https://doi.org/10.54254/2755-2721/20/20231101 (date of access: 04.03.2025).

13. UAV-to-UAV communications in cellular networks / Azari M.M. et al. *IEEE Transactions on Wireless Communications*. 2020. Vol. 19, No. 9. P. 6130–6144. URL: https://doi.org/10.1109/twc.2020.3000303 (date of access: 04.03.2025).

14. Dobrokvashina A.S. Development and testing of the graphical user interfaces for UAV. *Bulletin. Series Information Science. Information Security. Mathematics*. 2024. No. 1. P. 8–20. URL: https://doi.org/10.28995/2686-679x-2024-1-8-20 (date of access: 04.03.2025).

15. A functional encryption technique in UAV integrated HetNet: a proposed model / Sharma D. et al. *International Journal of Simulation: Systems, Science & Technology*. 2019. URL: https://doi.org/10.5013/ijssst.a.20.s1.07 (date of access: 04.03.2025).

16.Derkachev V., Bakhchevnikov V., Bakumenko A. Multi-rotor UAV classifier // *Engineering Sciences*. 2023. No. 2. P. 90–99. URL: https://doi.org/10.18522/2311-3103-2023-2-90-99 (date of access: 04.03.2025).

17.Зуєва А., Караман Д. Система моніторингу об'єктів електроенергетичної інфраструктури з використанням БпЛА. Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. 2022. Т. 5, № 51. С. 87–91. URL: https://doi.org/10.26906/sunz.2018.5.087 (дата звернення: 04.03.2025).

18.Регулювання крену БпЛА із застосуванням прогнозуючої моделі / Денисенко М. та ін. *Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць*. 2023. Т. 1, № 71. С. 15–18. URL: https://doi.org/10.26906/sunz.2023.1.015 (дата звернення: 04.03.2025).

Levchenko D. S., Baranov Ye. O., Gavryliuk A. O., Malyi O. Yu. AUTONOMOUS NAVIGATION AND COMMUNICATION SYSTEMS OF UNMANNED AERIAL VEHICLES IN LIMITED CONNECTIVITY CONDITIONS

The article is devoted to the study of technologies for autonomous navigation and communication systems of unmanned aerial vehicles (UAVs) in conditions of limited connectivity. The key challenges faced by developers of autonomous UAVs are analyzed: navigation without GPS signal, decision-making in uncertain conditions, and provision of secure communication channels during electronic countermeasures.

Alternative navigation methods are considered – inertial navigation, visual odometry, and SLAM technology, which allow UAVs to effectively navigate in space without GPS. Modern decision-making algorithms based on machine learning, neural networks, and deep reinforcement learning are studied, which ensure UAV adaptability to dynamic environments and effective obstacle avoidance.

Special attention is paid to reliable communication technologies, including adaptive systems, MIMO, as well as methods of protection against signal interception and suppression: data encryption, FHSS, and DSSS. These technologies provide reliable communication for UAVs even in conditions of active electronic countermeasures.

The issue of integrating different UAV subsystems and processing large amounts of data in real-time has been resolved. A model of a cyclical data processing process for effective decision-making and execution of actions by autonomous UAVs is proposed.

The research results have practical value for developers and operators of unmanned systems. The considered technologies and methods can be implemented to increase the autonomy, reliability, and safety of UAVs in various fields of application – from civil monitoring to military operations in challenging conditions.

Key words: *unmanned aerial vehicles (UAVs), autonomous navigation, communication systems, real-time data processing, artificial intelligence, system integration, energy efficiency, information security, adaptive algorithms, sensor technologies.*

УДК 621.391.8
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/17

Михалевський Д. В.
Вінницький національний технічний університет

Василишин В. І.
Харківський національний університет
повітряних сил імені Івана Кожедуба

Макогон В. І.
Вінницький національний технічний університет

Макогон О. С.
Вінницький національний технічний університет

АНАЛІЗ ТРАФІКУ У БЕЗПРОВІДНИХ КАНАЛАХ СТАНДАРТУ WI-FI НА БАЗІ ЦИКЛІВ ПЕРЕДАЧІ КАДРІВ

У роботі проведено дослідження випадкових закономірностей сеансів передачі трафіку в безпровідних каналах стандарту Wi-Fi, які залежать від великої кількості факторів впливу. Така особливість створює певні обмеження існуючих методів аналізу трафіку при проектуванні та оптимізації сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж. Для вирішення такого недоліку, проведено аналіз процесу передачі трафіку на канальному рівні та узгоджено із статистичними характеристиками циклів передачі й прийому кадрів на базі алгоритмів моніторингу стандарту Wi-Fi. Встановлено, що такий процес характеризується довготривалим зменшенням значень автокореляційної функції та випадковим розподілом інтервалів між циклами передачі кадрів, що може приводити до максимального завантаження ресурсів мережі. Особливо це спостерігається при існуванні факторів впливу та виникнення значної кількості помилок із створенням сеансів перезапиту або втрати кадрів.

Отримано, вирази циклів передачі та прийому кадрів на основі стаціонарного випадкового процесу із використанням алгоритму моніторингу, що дозволяє визначати основні статистичні параметри та передбачати виникнення певного роду випадкових подій. Запропоновано визначати основні закономірності циклів передачі кадрів на основі коефіцієнта квадратичної або лінійної функції регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень. Отримано аналітичні вирази, які пов'язують взаємозв'язок фактору самоподібності з процесами передачі та прийому кадрів, як випадкового розподілу інтервалів. Це дає змогу значно спростити виявлення випадкових подій в певні інтервали часу та виконання над ними дій статистичного аналізу незалежно, як на вхідному, так і на вихідному трафіках. Практична реалізація такого підходу не потребує використання додаткових вузлів та засобів машинного навчання, що значно спрощує аналіз та збільшує швидкість отримання результату. Достовірність результатів за отриманими виразами залежить від періоду оцінювання або кількості циклів моніторингу, а також врахування факторів впливу.

Ключові слова: *аналіз трафіку, безпровідні канали, мережі стандарту Wi-Fi, самоподібний процес, статистичний аналіз.*

Постановка проблеми. Як відомо, трафік який передається у сучасних теле- та інфокомунікаційних мережах характеризується особливими випадковими закономірностями, які досить складно передбачити та оцінити із високою достовірністю [1]. В першу чергу, це зумовлено значним розвитком інформаційних технології та постійним ростом потреб користувачів у підвищенні якості послуг. Тенденція значного збільшення об'ємів інформації приводить до необхідності збільшення пропускної здатності каналів передачі та застосування нових методів розподілу й оптимізації сеансів передачі пакетів. Це необхідно враховувати при проектуванні сучасних корпоративних телекомунікаційних мереж, створюючи додаткові вузли для покращення покриття та ефективного розподілу потоків інформації.

Процес передачі трафіку, як правило, можна представити як функцію, яка залежить від часу [2]. На практиці таку залежність можна отримати на базі засобів моніторингу із фіксованими циклами вимірювання. В такому випадку, визначається

часовий ряд статистичного оцінювання параметрів функції. Аналіз швидкої чи повільної зміни властивостей функції в певні періоди дозволяє встановлювати міру випадковості. Проте, у безпровідних каналах існують різного роду фактори, які змінюють характеристики процесів передачі трафіку [3]. Такі фактори мають безпосередній вплив на отримання математичних моделей систем та процесів передачі трафіку, особливо систем із самоподібністю. Тому, врахування імовірності появи факторів впливу, в будь-який момент часу, в процесі сеансів передачі трафіку, є обов'язковим, що приведе до змін наближених характеристик функції розподілу процесу передачі трафіку та підвищить достовірність кінцевого результату.

Таким чином, для встановлення реальних характеристик процесів передачі трафіку у безпровідних мережах, необхідно дослідити процеси передачі трафіку на відповідність законам самоподібності та визначити вплив зовнішніх та внутрішніх факторів на достовірність оцінювання, що є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як відомо [3], сеанси передачі трафіку у безпровідних мережах стандарту Wi-Fi характеризуються існуванням інформаційних втрат на канальному та фізичному рівні. Це приводить до виникнення затримок і перевантажень службовою інформацією та зниження якості послуг для кінцевих пристроїв. Такі недоліки виникають із-за існування різноманітних факторів впливу у середовищі передачі. В такому випадку, керування ресурсами мережі, моніторинг та технічне обслуговування вимагає додаткових методів та засобів для забезпечення оптимального доступу до мережі та підвищення ефективності сеансів передачі кадрів [4]. В якості засобу аналізу можна використовувати Raspberry Pi, як окремий моніторинговий пристрій для оцінювання енергетичних та інформаційних параметрів мережі.

Для задач аналізу трафіку широкого поширення отримали складні моделі на базі машинного навчання [5]. Однак у мережах із високою пропускною здатністю потоки можуть надходити набагато швидше, ніж параметри результатів аналізу, особливо для складних моделей із високими затратами обчислювальних ресурсів. В такому випадку, доцільно застосовувати системи адаптивного обслуговування із використанням масштабування. Це передбачає використання додаткових механізмів балансування між високою швидкістю обслуговування та високою точністю із мінімальними затримками.

Використання додаткових апаратних та програмних засобів аналізу має вплив на часові характеристики передачі інформації у мережі та вносить похибки при оцінюванні інформаційних параметрів. З іншого боку, у середовищі постійно присутні джерела інтерференційних завад [6, 7], кількість яких збільшується із щільністю населення. Дію таких завад неможливо компенсувати та досить складно передбачити, але їх можна враховувати під час коригування сеансів передачі кадрів. Встановлено, що використання каналів із вузькою смугою підвищує ефективність сеансів передачі кадрів в умовах існування значної кількості факторів впливу та інтерференційних завад, особливо зі збільшенням відстані між абонентом та точкою доступу. Найбільш неприйнятний фактор – існування суміщеного інтерференційного каналу, де механізм боротьби за частотний ресурс буде працювати максимально, в результаті чого значно підвищується імовірність появи колізій та помилок у циклах передачі кадрів.

Наведені вище фактори впливу, необхідно враховувати під час виконання задач аналізу параметрів і характеристик безпровідних мереж на етапах проектування та експлуатації. Аналізуючи процеси передачі кадрів, які є механізмом передачі пакетів [8], можна визначати пропускну здатність, можливість забезпечення доступу до високоякісних послуг, особливості розподілу трафіку, оцінювання параметрів якості обслуговування та ін. Тому, оцінювання параметрів процесів передачі та прийому кадрів можна звести до визначення показника Херста. Враховуючи, що такий показний не завжди дає точні результати, в роботі [9] було запропоновано використовувати опис інтервалу часу між пакетами на основі розподілів Парето або Вейбулла та визначення циклів передачі пакетів у системі на базі формули Норроса. Це дало можливість підвищення достовірності отриманих результатів параметра Херста.

В роботі [10] запропоновано використання квадратичних та кубічних інтерполяційних функцій для підвищення точності прогнозування трафіку для автоматичного керування буферними пристроями. Це дає можливість простого та ефективного прогнозування піків трафіку з використанням методів екстраполяції.

Постановка завдання. Метою роботи є підвищення ефективності оцінювання трафіку у безпровідних каналах стандарту Wi-Fi на основі базових закономірностей, що пов'язують цикли передачі кадрів та процеси самоподібності.

Виклад основного матеріалу. В більшості випадків, аналіз трафіку в сучасних телекомунікаційних мережах є складним і важким завданням. Найбільш оптимальним та узагальненим способом опису сеансів передачі трафіку, можна вважати процес самоподібності, який можна описати імовірнісними характеристиками. В нашому випадку, розглядається трафік який передається у безпровідних мережах стандарту WI-FI, тому доцільно розглянути процес передачі трафіку виходячи із параметрів переданих N_{T_x} та прийнятих N_{R_x} кадрів [1]. Для спрощення, іншими параметрами та факторами знехтуємо. Використовуючи засоби моніторингу, фрагмент середньостатистичної інтенсивності трафіку у безпровідній мережі стандарту Wi-Fi 6 можна представити як на рис. 1.

Як видно із рис. 1, параметри N_{T_x} та N_{R_x} мають випадковий характер. Тоді, враховуючи [1], процес передачі та прийому кадрів, можна записати як стаціонарний випадковий процес, який можна узгодити із циклами моніторингу:

$$N_{T_x}(t) \approx N_{T_x}(nT), \quad N_{R_x}(t) \approx N_{R_x}(nT). \qquad (1)$$

Сумарна кількість кадрів за цикл моніторингу становить:

$$N = N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT) = (N_{T_x} + N_{R_x})(nT), \qquad (2)$$

де T – період циклу моніторингу; n – кількість циклів моніторингу для отримання відповідної достовірності процесу.

Кореляційна функція запишеться так:

$$r(k) = \frac{\overline{(N(nT+k)-\overline{N})(N(nT)-\overline{N})}}{\sigma^2}, \qquad (3)$$

де $\overline{N}$ – середньостатистичне значення стаціонарного процесу, яке можна розрахувати за виразом:

$$\overline{N} = \frac{1}{n}\left(\sum_{i=1}^{n} N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT)\right), \qquad (4)$$

σ – дисперсія стаціонарного процесу, яка визначається як

$$\sigma^2 = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT) + N_{R_x}(nT) - \overline{N})^2.$$

Враховуючи [11], самоподібний процес характеризується довготривалим зменшенням значень автокореляційної функції та випадковим розподілом інтервалів між сеансами передачі кадрів. Якщо, в одному і тому ж інтервалі часу, виникають певного роду випадкові події, то це приводить до максимального завантаження ресурсів мережі. Для каналу стандарту Wi-Fi, поява таких подій показано на рис. 2, окремо для переданих та прийнятих кадрів

Такі піки трафіку можуть виникати в будь-який момент часу, передбачення яких, дає можливість підвищити ефективність керування ресурсами мережі, розвантажуючи відповідні вузли і канали. Тоді, для такого випадкового процесу кореляційна функція може мати наступний вигляд [12]:

$$r_H(k) = \frac{\sigma^2((k+1)^{2H} - 2k^{2H} + (k-1)^{2H})}{2}, \qquad (6)$$

де H – показник Херста, який показує ступінь самоподібності та визначається так:

$$H = 1 - \frac{m}{2}, \quad \text{де} \quad 0 < m < 1. \qquad (7)$$

Найбільш поширеним визначенням коефіцієнту Херста є метод нормованого розмаху [13], який базується на статистичному аналізі. Згідно методу, відношення відхилення трафіку від середньостатистичного значення до стандартного відхилення має вигляд квадратичної функції. Врахо-

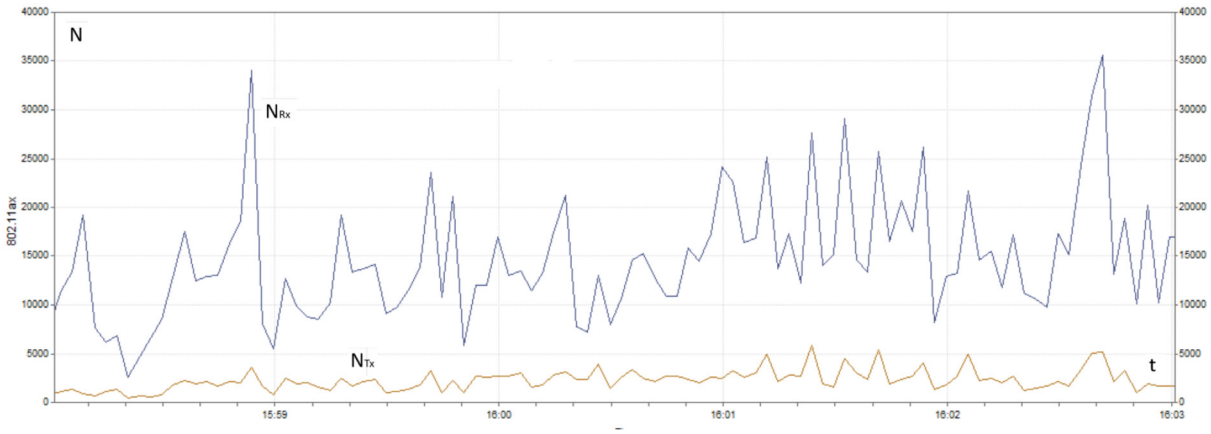
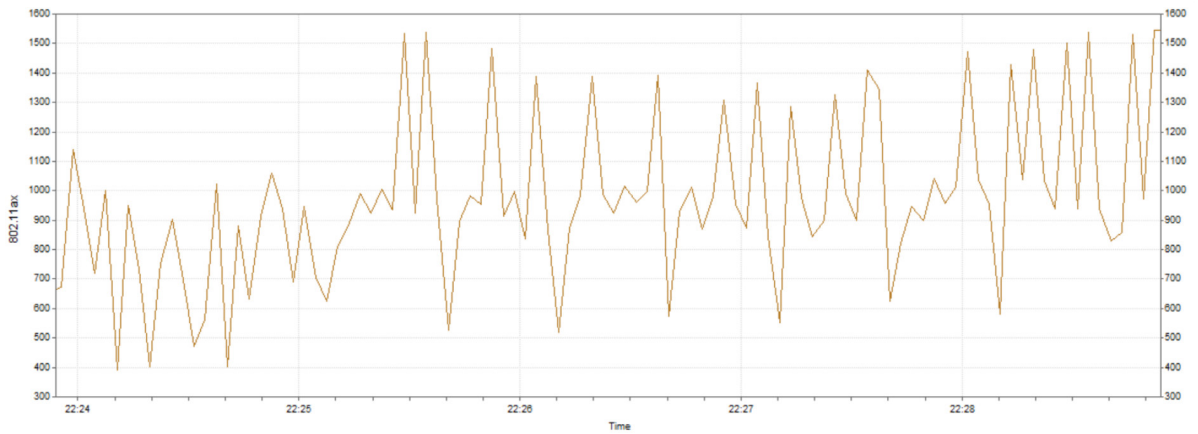
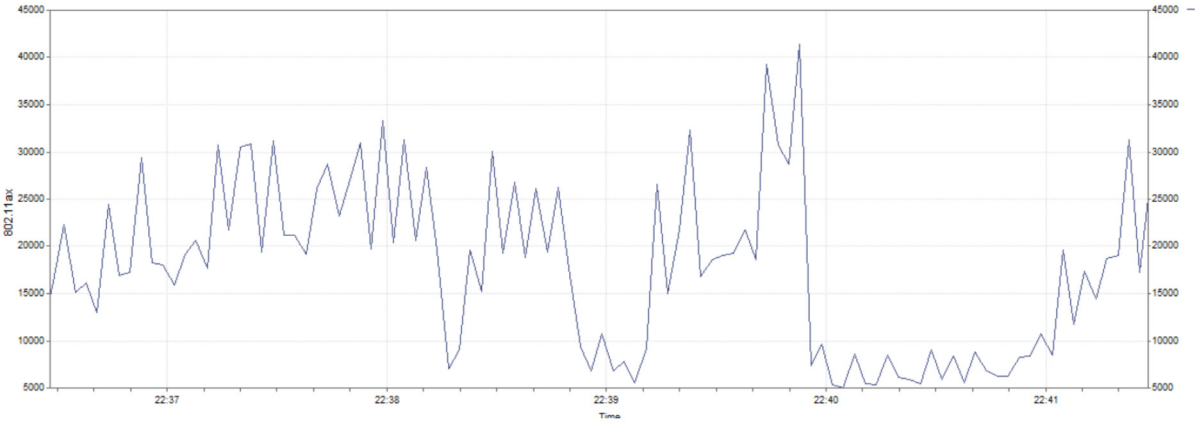


Рис. 1. Середньо-статистична інтенсивність сеансів передачі та прийому кадрів у безпровідній мережі стандарту Wi-Fi



а



б

Рис. 2. Фрагмент пікового завантаження ресурсів мережі для параметра N_{T_x} (а) та параметра N_{R_x} (б)

вуючи вирази (2), (4) і (5), для сеансів передачі та прийому кадрів можна записати наступне співвідношення нормованого розмаху:

$$\frac{\max(N(nT)-\overline{N})-\min(N(nT)-\overline{N})}{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT)+N_{R_x}(nT)-\overline{N})^2}\approx a(nT)^H. \quad (8)$$

Звідки визначається коефіцієнт Херста як:

$$H\approx\log_{nT}\left(\frac{\max(N(nT)-\overline{N})-\min(N(nT)-\overline{N})}{a\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(N_{T_x}(nT)+N_{R_x}(nT)-\overline{N})^2}\right). \quad (9)$$

Враховуючи флуктуації трафіку в безпровідному каналі, як на рис. 2, середньостатистичне значення піку можна розрахувати так:

$$N_{\max}=\frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m}\left(\max_i\left(\sum_{j=1}^{k}N_{Rx}(kT)\right)+\max_i\left(\sum_{j=1}^{k}N_{Tx}(kT)\right)\right), \quad 10)$$

де m – кількість піків, отриманих під час моніторингу; k – кількість циклів моніторингу під час тривалості піку.

В результаті задача визначення основних закономірностей, що пов'язують цикли передачі кадрів та процеси самоподібності зводиться до визначення коефіцієнта квадратичної або лінійної функції на основі регресійного аналізу результатів експериментальних досліджень рядів $N_{T_x}(nT)$ і $N_{R_x}(nT)$ із використанням власних засобів моніторингу абонентських пристроїв. Достовірність оцінювання за співвідношеннями (9) і (10) залежить від періоду оцінювання або кількості циклів моніторингу nT, а також врахування факторів впливу. Для процесів передачі та прийому кадрів у безпровідному каналі стандарту Wi-Fi отримання достовірності 0.98, передбачає мінімальну кількість циклів моніторингу 360 і більше, що відповідає границям більше 0,5 для параметра Херста. Це видно і на базі експериментальних досліджень, якщо порівнювати рис. 1 та рис. 2. На рис. 2, за рахунок певних випадкових подій з'явилось значне відхилення від середньостатистичного значення, тому, в подальшому такі відхилення із високою імовірністю будуть повто-

рюватись, завантажуючи ресурси мережі до максимуму.

Висновки. Таким чином, аналіз трафіку у безпровідних мережах стандарту Wi-Fi, показує, поряд із зовнішніми та зовнішніми факторами впливу необхідно розглядати випадкові процеси, які пов'язані із явищами самоподібності. Для цього, отримано аналітичні вирази, які пов'язують взаємозв'язок фактору самоподібності з циклами передачі та прийому кадрів. Це дає змогу значно спростити виявлення випадкових подій в певні інтервали часу та виконання над ними дій статистичного аналізу незалежно, як на вхідному, так і на вихідному трафіках. Підвищення ефективності оцінювання трафіку досягається за рахунок використання статистичного аналізу параметрів циклів передачі та прийому кадрів, без використання додаткових вузлів та засобів машинного навчання, що значно спрощує аналіз та збільшує швидкість отримання результату.

Список літератури:

1. Mykhalevskiy D. V., Kychak V. M. Development of Information Models for Increasing the Evaluation Efficiency of Wireless Channel Parameters of 802.11 Standard. Latvian Journal of Physics and Technical Sciences. 2019. 56(5), Pp. 22–32. DOI: 10.2478/lpts-2019-0028

2. Habib M. A., Iturria-Rivera P. E., Ozcan Y., Elsayed M., Bavand M., Gaigalas R., Erol-Kantarci M. Transformer-Based Wireless Traffic Prediction and Network Optimization in O-RAN. WS03 ICC 2024 Workshop, IEEE 2023. Pp. 1–6 DOI: 10.48550/arXiv.2403.10808

3. Mykhalevskiy D., Vasylkivskyi N., Horodetska O. Development of a mathematical model for estimating signal streng that the input of the 802.11 standard receiver. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. Vol. 6, Issue 9 (90). Pp. 38–43. DOI: 10.15587/1729-4061.2017.114191

4. Safri M. N. H. M., Nik W. N. S. W., Mohamad Z., Mohama M. Wireless Network Traffic Analysis and Troubleshootingusing Raspberry Pi. International Journal of Engineering & Technology. 2018, № 7(2.15). Pp. 58–60. DOI: 10.14419/ijet.v7i2.15.11213

5. Liu S., Shaowang T., Wan G., Chae J., Marques J., Krishnan S., Feamster N., ServeFlow: A Fast-Slow Model Architecture for Network Traffic Analysis. arXiv: 2402.03694. 2024. Pp. 1–26. DOI: 10.48550/arXiv.2402.03694

6. Михалевський Д. В., Красота Р. О., Гузь М. Д. Передача трафіку у мережах Wi-Fi при дії інтерференційних завад. Sword. 2014. № 4(37) Том 5. С. 13–16.

7. Михалевський Д. В., Номировська В. В., Постернак О. М. Дослідження передачі інформації в умовах суміщеного та сусіднього інтерференційного каналів для стандарту 802.11n. Вимірювальна та обчислювальна техніка в технологічних процесах. 2015. № 2. С. 155–159.

8. Михалевський Д. В., Городецька О. С. Оцінка ефективної швидкості передачі інформації для сімейства стандартів 802.11х у діапазоні 2.4 ГГц. Sword. 2015. В. 3(40). Том 3. С. 43–47.

9. Лєвєнберг Є. В. Точність розрахунку показника Херста та імовірності очікування обслуговування пакетів само подібного трафіка. Наукові праці ОНАЗ ім. О. С. Попова. 2019. № 1. С. 80–86.

10. Стрелковська І. В., Соловська І. М., Макоганюк А. О., Северин М. В. Прогнозування характеристик самоподібного трафіку за допомогою сплайн-екстраполяції. Вісник Унівеситету «Україна». 2019. № 1(22), С. 188–195. DOI 10.36994/2707-4110-2019-1-22-21

11. Андрієнко В. М. Інструменти моніторингу фондових ринків. Причорноморські економічні студії. 2016. Вип. 9(1). С. 131–134.

12. Стрихалюк Б. М. Фрактальний спосіб прогнозування потоків у мультисервісних мережах. Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». 2009. № 645. С. 88–94.

13. Шуллє Ю. А. Аналіз графіків електричних навантажень промислових підприємств методом нормованого розмаху (R/S-аналіз) Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2015. № 2. С. 50–56.

Mikhalevsky D. V., Vasylyshyn V. I., Makogon O. S., Makogon V. I. ANALYSIS OF TRAFFIC IN WIRELESS CHANNELS OF THE WI-FI STANDARD

In this paper studies the random patterns of traffic transmission sessions in wireless channels of the Wi-Fi standard, which depend on a large number of influencing factors. This feature creates certain limitations of existing methods of traffic analysis in the design and optimization of modern corporate telecommunications networks. To solve this drawback, the traffic transmission process was analyzed at the channel level and coordinated with the statistical characteristics of the frame transmission and reception cycles based on the Wi-Fi standard monitoring algorithms. It was found that such a process is characterized by a long-term decrease in the values of the autocorrelation function and a random distribution of intervals between frame transmission cycles, which can lead to maximum load on network resources. This is especially observed in the presence of influencing factors and the occurrence of a significant number of errors with the creation of re-query sessions or frame loss.

Expressions of frame transmission and reception cycles based on a stationary random process using a monitoring algorithm were obtained, which allows determining the main statistical parameters and predicting the occurrence of a certain type of random events. It is proposed to determine the main patterns of frame transmission cycles based on the coefficient of the quadratic or linear function of the regression analysis of the results of experimental studies. Analytical expressions were obtained that relate the relationship of the self-similarity factor to the processes of frame transmission and reception, as a random distribution of intervals. This makes it possible to significantly simplify the detection of random events in certain time intervals and perform statistical analysis on them independently, both on the incoming and outgoing traffic. The practical implementation of such an approach does not require the use of additional nodes and machine learning tools, which significantly simplifies the analysis and increases the speed of obtaining the result. The reliability of the results according to the obtained expressions depends on the evaluation period or the number of monitoring cycles, as well as taking into account the influence factors.

Key words: *traffic analysis, wireless channels, Wi-Fi networks, self-similar process, statistic alanalysis.*

УДК 621.39:519.816
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/18

Пивовар О. С.
Хмельницький національний університет

Кучерук О. Я.
Хмельницький національний університет

Кисіль Т. М.
Хмельницький національний університет

НЕЧІТКИЙ БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО ПРИЙНЯТТЯ РІШЕННЯ ДЛЯ ВИБОРУ ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ

Стаття присвячена питанню раціонального вибору телекомунікаційного обладнання. В роботі зазначено, що кращим підходом для вирішення таких питань є методи багатокритеріального прийняття рішень. Переважна кількість та обсяг глобальних наземних транспортних мереж на сучасний день реалізовано на основі оптичних технологій передачі даних. З початку нового тисячоліття оптичні технології поступово витісняють традиційні мідні технології також і в мережах абонентського доступу. Цьому, в першу чергу, сприяла поява технології пасивних оптичних мереж PON. Побудова економічно ефективних PON вимагає науково обґрунтованого підходу до вибору відповідного обладнання, зокрема, оптичних лінійних терміналів. В таких ситуаціях найбільш доцільним є застосування методів та методик багатокритеріального прийняття рішень (MCDM). Враховуючи, що більшість рішень в галузі техніки приймаються в умовах невизначеності, то варто використовувати методи Fuzzy MCDM. Реалізація нечіткої логіки в поєднанні з методами MCDM стає все більш популярною і є потужним інструментом для вирішення складних проблем прийняття рішень. Методи Fuzzy MCDM надають структуру з більшою гнучкістю для вирішення проблем, які виникають через брак або неточність інформації. Найбільшою проблемою щодо застосування методів MCDM у практичних застосуваннях є труднощі визначення найкращого методу для даної досліджуваної проблеми, оскільки застосування різних методів MCDM може призвести до різних рейтингів. Тому варто використовувати більше одного методу одночасно. У статті розглянуто використання методів Fuzzy MCDM для побудови моделі оптимального вибору телекомунікаційного обладнання в умовах нечіткої інформації на основі поєднання методів Fuzzy MCDM, на прикладі вибору оптичного лінійного терміналу. Продемонстровано застосування трьох нечітких підходів MCDM (Fuzzy SWARA + Fuzzy TOPSIS, Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS і Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS) для вибору оптичного лінійного терміналу. Визначено найкращу альтернативу в кожному підході та порівняно результати.

Ключові слова: *оптичні мережі, оптичний лінійний термінал, методи Fuzzy MCDM, Fuzzy MARCOS, Fuzzy ARAS.*

Постановка проблеми. Існування та подальший розвиток сучасного суспільства у всіх аспектах спряжений із невід'ємною потребою в досконалому обміні інформацією відповідно постійно зростаючим обсягам інформаційних повідомлень та вимогам щодо надійності їх доставки адресатам. Реалізація цих завдань неможлива без розробки та раціонального використання техніки та технологій прогресивних мереж нового покоління, що органічно передбачають можливість масштабування та удосконалення в рамках мережевої інфраструктури передачі даних.

Природні, технічні та економічні обмеження використання проводових (мідних) технологій щодо забезпечення потреб систем електронних комунікацій обумовлені високим рівнем загасання сигналів в мідних лініях, чутливістю до електромагнітних завад, необхідністю додаткового захисту, зростанням вартості кольорових металів, тощо. Завдяки цим факторам переважна кількість та обсяг глобальних наземних транспортних мереж вже реалізовано на основі оптичних технологій передачі даних [1].

З початку нового тисячоліття оптичні технології поступово витісняють традиційні мідні технології також і в мережах абонентського доступу (AN – англ. Access Network). Цьому, в першу чергу, сприяла поява технології пасивних оптич-

них мереж PON (англ. Passive optical network), що дозволила використати переваги оптичного з'єднання із збереженням доступності його прокладання безпосередньо до абонентських терміналів [2].

Підвищена пропускна спроможність оптичного з'єднання в абонентських мережах, високий рівень надійності та захисту від несанкціонованого доступу дозволяє не тільки врахувати перспективи подальшого збільшення інформаційного навантаження абонентського каналу передачі але і розширити коло абонентів та пристроїв доступу із урахуванням покращеної енергоефективності, можливості використання технологій інтернету речей IoT (англ. Internet of Things), розподілених технологій локальних обчислень HPC (англ. High Performance Computing) та збереження даних DDB (англ. Distributed DataBase), широкого застосування штучних нейронних мереж (ШНМ, англ. Artificial Neural Networks, ANN) та систем штучного інтелекту (ШІ, англ. Artificial Intelligence, AI), тощо.

На даний час більшість нових кабельних мереж електронних комунікацій будується виключно на базі оптоволоконних ліній передачі. Інфраструктура таких мереж невпинно зростає відповідно попиту зростає і зацікавленість провідних комерційних фірм та структур щодо підтримки оптоволоконних з'єднань відповідним мережевим та абонентським устаткуванням [3]. В рамках технології PON це в першу чергу відноситься до лінійних терміналів OLT (англ. Optical Line Terminal) багатоканальної передачі даних та кінцевих пристроїв доступу – ONT (англ. Optical Network Terminal), номенклатура та можливості яких постійно зростають.

На даний час лідерами у виробництві активного та пасивного телекомунікаційного устаткування PON є фірми ADTRAN, Inc.: Calix, Inc., Huawei Technologies Co., Ltd.; Mitsubishi Electric Corporation; Motorola Solutions, Inc., що пропонують комплексні технічні рішення на розгортання та обслуговування мереж PON, однак на ринку також присутнє кабельне та лінійно-термінальне устаткування і від інших виробників, що не поступається за якістю. Тактико-технічні характеристики такого устаткування можуть доволі сильно відрізнятись, що автоматично спрямовує розробника мережі на певний напрям використання.

Намагання з боку виробників нав'язати комплексне технічне рішення щодо розгортання PON не завжди призводить до виправданих капіталовкладень з боку провайдерів в конкретних випадках, тому, побудова економічно ефективних PON вимагає застосування науково обґрунтованого підходу до вибору відповідного обладнання, зокрема, оптичних лінійних терміналів (OLT). Вибір OLT з боку провайдера для застосування в певній PON ґрунтується на його потребах із врахуванням параметрів та характеристик OLT заявлених виробником, однак, відповідальним розробникам мережі слід керуватись певною прозорою та однозначною методологією прийняття рішень для здійснення оптимального вибору не тільки на базі розгляду групи тактико-технічних характеристик але також із застосуванням експертних оцінок. В таких ситуаціях найбільш доцільним є застосування методів та методик багатокритеріального прийняття рішень MCDM (англ. Multiple Criteria Decision Making).

На даний час доцільність свого існування в різних галузях довели декілька десятків методів MCDM, що допомагають зробити процес прийняття рішень більш чітким, раціональним та однозначним. Вони можуть бути використані в різноманітних завданнях ранжирування, сортування, оптимального вибору на основі пакету критеріальних ознак для обраного ряду альтернатив, що забезпечує прозорий системний підхід багатокритеріальної оптимізації складних проблем прийняття рішень [4; 5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В попередніх дослідженнях [6–8] автори (С. Підченко, О. Кучерук, О. Пивовар та ін.) вже розглядали проблему раціонального вибору обладнання при проектуванні телекомунікаційних мереж. Цьому питанню присвячено також роботи й інших науковців, зокрема, А. Жанасбаєва, А. Тохметов, А. Амірова [9], В. Безрук [10], Л. Мельнікова та ін. [11], М. Колісник [12].

У ситуаціях прийняття рішень у реальному світі застосування класичних методів MCDM може зіткнутися з серйозними практичними обмеженнями через критерії, які, можливо, містять неточність або нечіткість інформації, оскільки зазвичай важко точно виразити оцінки за допомогою реальних чисел через брак даних або суб'єктивні та неточні експертні судження [13]. Більшість, якщо не всі, рішення в галузі техніки приймаються в умовах невизначеності. У багатьох випадках оцінки критеріїв можуть бути виражені лише якісно або за допомогою лінгвістичних термінів, що, безумовно, вимагає використання більш відповідного методу прийняття рішень. Використання теорії нечітких множин дозволяє

включити інформацію, що не піддається кількісному вимірюванню.

Нечіткі багатокритеріальні методи прийняття рішень (Fuzzy MCDM) дозволяють мати справу з проблемами MCDM, де в матриці рішень присутні невизначеність та/або неточність [14]. Основна перевага застосування методів Fuzzy MCDM полягає в тому, що вони надають структуру з більшою гнучкістю для вирішення проблем, які виникають через брак або неточність інформації [15, 16].

Методи Fuzzy MCDM активно використовуються останні два десятиліття. Зокрема, методи Fuzzy MCDM використовувались для вибору постачальника [16, 17], вибору програмного забезпечення [18], оцінки якості веб-сайтів [19]; вибору додатків IoT [20], вибору місця для встановлення важкого механізованого моста [21].

Однак, незважаючи на значну кількість методів MCDM, найбільшою проблемою щодо застосування цих методів у практичних застосуваннях є труднощі визначення найкращого методу для даної досліджуваної проблеми. Оскільки, жоден метод не є ідеальним і застосування різних методів MCDM може призвести до різних рейтингів. Таким чином, не можна визначити найбільш підходящий метод для вирішення проблеми [22, 23]. Тому, щоб переконатися, що обрана альтернатива є найкращою, вчені зазвичай використовують більше одного методу одночасно.

Постановка завдання. Метою статті є: побудова моделі оптимального вибору телекомунікаційного обладнання в умовах нечіткої інформації на основі поєднання методів Fuzzy MCDM, на прикладі вибору оптичного лінійного терміналу.

Виклад основного матеріалу. В попередньому дослідженні [8] для вибору оптичного лінійного терміналу авторами було застосовано метод Fuzzy TOPSIS та для визначення важливості критеріїв метод Fuzzy SWARA. В роботі представлено детальний опис зазначених методів та поняття й властивості трикутних нечітких чисел. В даному дослідженні пропонується використати для вибору оптичного лінійного терміналу три методи Fuzzy MCDM, а саме Fuzzy TOPSIS, Fuzzy MARCOS та Fuzzy ARAS.

Алгоритм методу Fuzzy MARCOS [21, 24].

Крок 1: Першим кроком у всіх методах FMCDM є побудова початкової нечіткої матриці прийняття рішень. Моделі MCDM включають визначення набору з n критеріїв і m альтернатив.

$$\tilde{X} = \begin{array}{c} \\ \tilde{A}_1 \\ \tilde{A}_2 \\ \vdots \\ \tilde{A}_m \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 & \cdots & \tilde{C}_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix} \end{array},$$

де m – кількість альтернатив; n – кількість критеріїв; $\tilde{A}_i$ – i-та альтернатива; $\tilde{C}_j$ – j-й критерій; $\tilde{x}_{ij}$ – оцінка i-ї альтернатива по j-му критерію, лінгвістичні змінні, які описуються трикутними нечіткими числами $\tilde{x}_{ij} = (a_{ij}, b_{ij}, c_{ij})$.

Крок 2: Побудова розширеної нечіткої матриці прийняття рішень. До матриці додаються нечітка ідеальна альтернатива ($\tilde{A}(ID)$) та нечітка антиідеальна альтернатива ($\tilde{A}(AI)$):

$$\tilde{X} = \begin{array}{c} \\ \tilde{A}(AI) \\ \tilde{A}_1 \\ \tilde{A}_2 \\ \cdots \\ \tilde{A}_m \\ \tilde{A}(ID) \end{array} \begin{array}{c} \begin{array}{cccc} \tilde{C}_1 & \tilde{C}_2 & \cdots & \tilde{C}_n \end{array} \\ \begin{bmatrix} \tilde{x}_{ai1} & \tilde{x}_{ai2} & \cdots & \tilde{x}_{ain} \\ \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \\ \tilde{x}_{id1} & \tilde{x}_{id2} & \cdots & \tilde{x}_{idn} \end{bmatrix} \end{array}.$$

Залежно від типу критеріїв, $\tilde{A}(AI)$ і $\tilde{A}(ID)$ визначаються згідно умов:

$$\tilde{A}(AI) = \begin{cases} \min\limits_i \tilde{x}_{ij},\ j \in B \\ \max\limits_i \tilde{x}_{ij},\ j \in C \end{cases} \text{ та } \tilde{A}(ID) = \begin{cases} \max\limits_i \tilde{x}_{ij},\ j \in B \\ \min\limits_i \tilde{x}_{ij},\ j \in C \end{cases},$$

де B – група benefit-критеріїв, а C – група cost-критеріїв.

Крок 3: Побудова нормалізованої нечіткої матриці $\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]_{m \times n}$, , де:

$$\tilde{n}_{ij} = (a_{\tilde{n}_{ij}}, b_{\tilde{n}_{ij}}, c_{\tilde{n}_{ij}}) = \begin{cases} \left(\dfrac{a_{\tilde{x}_{ij}}}{c_{\tilde{x}_{idj}}}, \dfrac{b_{\tilde{x}_{ij}}}{c_{\tilde{x}_{idj}}}, \dfrac{c_{\tilde{x}_{ij}}}{c_{\tilde{x}_{idj}}} \right), j \in B \\ \left(\dfrac{a_{\tilde{x}_{idj}}}{c_{\tilde{x}_{ij}}}, \dfrac{a_{\tilde{x}_{idj}}}{b_{\tilde{x}_{ij}}}, \dfrac{a_{\tilde{x}_{idj}}}{a_{\tilde{x}_{ij}}} \right), j \in C \end{cases}.$$

Крок 4: Обчислення зваженої нечіткої матриці $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}$ де

$$\tilde{v}_{ij} = (a_{\tilde{n}_{ij}} \cdot w_{j1}, b_{\tilde{n}_{ij}} \cdot w_{j2}, c_{\tilde{n}_{ij}} \cdot w_{j3}),$$

$$\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \ldots, \tilde{w}_n), \quad \tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3}).$$

Крок 5: Розрахунок рівня корисності альтернатив:

$$\tilde{K}_i^- = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{ai}} = \left(\frac{a_{s_i}}{c_{s_{ai}}}, \frac{b_{s_i}}{b_{s_{ai}}}, \frac{c_{s_i}}{a_{s_{ai}}} \right),$$

$$\tilde{K}_i^+ = \frac{\tilde{S}_i}{\tilde{S}_{id}} = \left(\frac{a_{s_i}}{c_{s_{id}}}, \frac{b_{s_i}}{b_{s_{id}}}, \frac{c_{s_i}}{a_{s_{id}}} \right),$$

де $\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{n} \tilde{v}_{ij}$.

Крок 6: Розрахунок нечіткого вектору $\tilde{T} = [\tilde{t}_i]_m$, де $\tilde{t}_i = \tilde{K}_i^-(+)\tilde{K}_i^+$ ((+) – сума нечітких чисел [8]). Після чого визначається нечітке число $\tilde{D} = \max_i \tilde{t}_i$ та проводиться дефазифікація числа $\tilde{D}$ за допомогою виразу

$$df_{crisp} = \frac{a_{\tilde{D}} + 4 \cdot b_{\tilde{D}} + c_{\tilde{D}}}{6}.$$

Крок 7. Визначення функцій корисності $f(\tilde{K}_i^+)$ і $f(\tilde{K}_i^-)$::

$$f(\tilde{K}_i^+) = \frac{\tilde{K}_i^-}{df_{crisp}} = \left(\frac{a_{k_i^-}}{df_{crisp}}, \frac{b_{k_i^-}}{df_{crisp}}, \frac{c_{k_i^-}}{df_{crisp}} \right);$$

$$f(\tilde{K}_i^-) = \frac{\tilde{K}_i^+}{df_{crisp}} = \left(\frac{a_{k_i^+}}{df_{crisp}}, \frac{b_{k_i^+}}{df_{crisp}}, \frac{c_{k_i^+}}{df_{crisp}} \right).$$

Крок 8. Проводиться дефазифікація $\tilde{K}_i^-$, $\tilde{K}_i^+$, $f(\tilde{K}_i^+)$ і $f(\tilde{K}_i^-)$ аналогічно дефазифікації числа $\tilde{D}$.

Крок 9: Визначення функції корисності альтернатив $f(K_i)$:

$$f(K_i) = \frac{K_i^+ + K_i^-}{1 + \frac{1 - f(K_i^+)}{f(K_i^+)} + \frac{1 - f(K_i^-)}{f(K_i^-)}}.$$

Крок 10: Ранжування альтернатив на основі значень функцій корисності. Чим більше значення $f(K_i)$ тим краще, тобто найкраща альтернатива має більше значення функції корисності.

Алгоритм методу Fuzzy ARAS [16].

Крок 1: Формування нечіткої матриці рішень.

Крок 2: Формування розширеної нечіткої матриці рішень шляхом додавання рядка з оптимальними значеннями кожного критерію у вигляді:

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{x}_{01} & \tilde{x}_{02} & \cdots & \tilde{x}_{0n} \\ \tilde{x}_{11} & \tilde{x}_{12} & \cdots & \tilde{x}_{1n} \\ \tilde{x}_{21} & \tilde{x}_{22} & \cdots & \tilde{x}_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ \tilde{x}_{m1} & \tilde{x}_{m2} & \cdots & \tilde{x}_{mn} \end{bmatrix}.$$

Оптимальні значення критеріїв розраховується наступним чином:

$$\tilde{x}_{0j} = \begin{cases} \max_i \tilde{x}_{ij}, \, j \in B \\ \min_i \tilde{x}_{ij}, \, j \in C \end{cases},$$

де B – група benefit-критеріїв, а C – група cost-критеріїв.

Крок 3: Нормалізація розширеної нечіткої матриці рішень $\tilde{N} = [\tilde{n}_{ij}]$:

$$\tilde{n}_{ij} = \frac{\tilde{x}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} \tilde{x}_{ij}} \text{ для benefit-критеріїв; } \tilde{n}_{ij} = \frac{1/\tilde{x}_{ij}}{\sum_{i=0}^{m} 1/\tilde{x}_{ij}}$$

для cost-критеріїв.

Крок 4: Побудова зваженої нормалізованої матриці рішень $\tilde{V} = [\tilde{v}_{ij}]_{m \times n}$:

$$\tilde{v}_{ij} = \tilde{n}_{ij}(*)\tilde{w}_j, ,$$

де (*) – добуток нечітких чисел [8], $\tilde{W} = (\tilde{w}_1, \tilde{w}_2, \ldots, \tilde{w}_n)$ – вектор вагових коефіцієнтів критеріїв, $\tilde{w}_j = (w_{j1}, w_{j2}, w_{j3})$.

Крок 5: Розрахунок значень функції оптимальності i-ї альтернативи:

$$\tilde{S}_i = \sum_{j=1}^{n} \tilde{v}_{ij}$$

та застосовується дефазифікація по центру області, тобто: $S_i = \frac{1}{3}(a_{\tilde{S}_i} + b_{\tilde{S}_i} + c_{\tilde{S}_i})$.

Крок 6: Розрахунок ступеня корисності альтернативи K_i:

$$K_i = \frac{S_i}{S_0},$$

де S_i та S_0 – значення функції оптимальності. Як найкращу альтернативу слід обрати альтернативу з максимальною ступеня корисності K_i.

В роботі [8] для вибору оптичного лінійного терміналу авторами було застосовано комбінацію методів Fuzzy SWARA+ Fuzzy TOPSIS. За допомогою методу Fuzzy SWARA було визначено вагові коефіцієнти критеріїв, а за методом Fuzzy TOPSIS визначено найкращу альтернативу. В якості альтернатив було розглянуто такі оптичні лінійні термінали: A_1 – BDCOM P3600-04; A_2 – BDCOM GP3600-08B; A_3 – BDCOM GP3600-16B; A_4 – BDCOM P3600-16E; A_5 – BDCOM P3600-08E.

Як критерії вибору було обрано наступні характеристики оптичних лінійних терміналів: C_1 – кількість PON портів; C_2 – пропускна здатність

Таблиця 1

Нечітка матриця рішень [8]

	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5	$\tilde{w}_j$
C_1	(3; 5; 7)	(3; 6,3; 9)	(7; 9; 9)	(7; 9; 9)	(5; 7; 9)	(0,152; 0,246; 0,360)
C_2	(5; 7; 9)	(3; 6,3; 9)	(5; 7; 9)	(7; 9; 9)	(5; 8,3; 9)	(0,010; 0,034; 0,093)
C_3	(1; 4,3; 7)	(7; 9; 9)	(7; 9; 9)	(3; 6,3; 9)	(3; 6,3; 9)	(0,002; 0,011; 0,047)
C_4	(3; 6,3; 9)	(7; 9; 9)	(5; 8,3; 9)	(5; 7,7; 9)	(5; 8,3; 9)	(0,061; 0,123; 0,216)
C_5	(3; 7; 9)	(7; 9; 9)	(5; 8,3; 9)	(3; 7; 9)	(5; 8,3; 9)	(0,004; 0,020; 0,066)
C_6	(3; 7; 9)	(5; 8,3; 9)	(7; 9; 9)	(5; 8,3; 9)	(5; 7,7; 9)	(0,001; 0,007; 0,037)
C_7	(5; 7,7; 9)	(5; 7,7; 9)	(5; 7,7; 9)	(5; 8,3; 9)	(5; 8,3; 9)	(0,000; 0,004; 0,026)
C_8	(3; 6,3; 9)	(7; 9; 9)	(7; 9; 9)	(3; 6,3; 9)	(5; 7; 9)	(0,381; 0,493; 0,600)
C_9	(3; 5,7; 9)	(7; 9; 9)	(7; 9; 9)	(3; 6,3; 9)	(3; 6,3; 9)	(0,024; 0,062; 0,130)

Таблиця 2

Результати дослідження

Метод		Альтернатива				
		A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
Fuzzy SWARA+ Fuzzy TOPSIS	оцінка	0,008	0,782	0,945	0,421	0,502
	ранг	5	2	1	4	3
Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS	оцінка	0,568	1,021	1,157	0,812	0,811
	ранг	5	2	1	3	4
Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS	оцінка	0,809	0,960	0,991	0,904	0,912
	ранг	5	2	1	4	3

backplane; C_3 – таблиця MAC адрес; C_4 – таблиця маршрутизації IPv4; C_5 – таблиця маршрутизації IPv6; C_6 – живлення (AC power supply); C_7 – вага; C_8 – Uplink інтерфейси; C_9 – типи модулів PON, що підтримуються.

Нечітка матриця рішень та вагові коефіцієнти критеріїв одержані в попередньому дослідженні представлено в таблиці 1.

Застосування комбінації методів Fuzzy SWARA+ Fuzzy TOPSIS дало наступні результати [8]: $A_3 \succ A_2 \succ A_5 \succ A_4 \succ A_1$.

В ході даного дослідження було здійснено ранжування альтернатив та вибір кращої альтернативи за допомогою комбінації методів Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS та Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS, згідно алгоритмів описаних вище. Результати застосування трьох методів наведено в табл. 2.

Ранжування альтернатив за значеннями функції корисності $f(K_i)$, згідно Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS, дає наступні результати: $A_3 \succ A_2 \succ A_4 \succ A_5 \succ A_1$.

За результатами застосування Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS ранжування альтернатив виглядає наступним чином: $A_3 \succ A_2 \succ A_5 \succ A_4 \succ A_1$.

В ранжуваннях за трьома методами є певні відмінності щодо альтернатив A_4 та A_5, проте найкращою альтернативою згідно всіх застосованих методів є A_3.

Висновки. Реалізація нечіткої логіки в поєднанні з методами MCDM стає все більш популярною і є потужним інструментом для вирішення складних проблем прийняття рішень.

В статті продемонстровано застосування трьох нечітких підходів MCDM (Fuzzy SWARA + Fuzzy TOPSIS, Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS і Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS) для вибору оптичного лінійного терміналу.

Визначено, що найкращою альтернативою є альтернатива A_3 (оптичний лінійний термінал BDCOM GP3600-16B). Проте, порядок альтернатив в ранжуваннях за різними методами дещо відрізняється. Тому варто застосовувати не один метод при ранжуванні та виборі кращої альтернативи.

В даному дослідженні для інтерпретації лінгвістичних змінних використовувались трикутні нечіткі числа. У подальших дослідженнях планується використати трапецієподібні нечіткі числа і порівняти результати моделювання з результатами, отриманими в цьому дослідженні.

Список літератури:

1. Matthew Nance Hall, Klaus-Tycho Foerster, Stefan Schmid, Ramakrishnan Durairajan A Survey of Reconfigurable Optical Networks. *Optical Switching and Networking*. https://surl.gd/tojwei

2. Mustafa H. Ali, Hazim M. ALkargole, Tariq A. Hassan A Review of immigration obstacles to PON-FTTH and its evolution around the world *TELKOMNIKA Telecommunication, Computing, Electronics and Control*. Vol. 19, No. 2, April 2021, pp. 645–663. DOI: 10.12928/TELKOMNIKA.v19i2.16444

3. Ankur Tiwari, Raj Kumar, Abhishek Saxena Future trends in fiber optics communication / *International Journal of Engineering Applied Sciences and Technology. 2020*. Vol. 4, Issue 10, Pages 203–207.

4. Turskis, Z.; Keršuliene, V. SHARDA–ARAS: A Methodology for Prioritising Project Managers in Sustainable Development. *Mathematics*. 2024. 12, 219. https:// doi.org/10.3390/math12020219

5. Thinh, H.X., Mai, N.T. Comparison of two methods in multi-criteria decision-making: application in transmission rod material selection. 2023. *EUREKA*: *Physics and Engineering*. № 6, P. 59–68. https://doi.org/10.21303/2461-4262.2023.00304

6. Pidchenko S., Kucheruk O., Pyvovar O., Stetsiuk V., Mishan V. A multi-criteria approach to decision-making in telecommunication network components selection. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2023, no. 1(105), pp. 155–165. DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2023.1.13

7. Pidchenko S., Kucheruk O., Drach I., Pyvovar O. Multi-criteria model for selection of optical linear terminals based on FUZZY TOPSIS method. *Radioelectronic and Computer Systems*. 2024, no. 1(109), pp. 65–75. DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2024.1.06

8. Підченко, С., Кучерук, О., Пивовар, О., Іванов, О., & Горященко, К. (2024). Метод вибору термінального обладнання пасивних оптичних мереж на основі нечіткого багатокритеріального прийняття рішень. *Herald of Khmelnytskyi National University. Technical Sciences*. 339(4), 448–457. https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-339-4-67

9. Zhanasbayeva A. Methods for substantiating decisions on the choice of the composition of telecommunications equipment. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*. 2021. Vol.99, no 22. P. 5582–5591.

10. Bezruk V. Multicriteria selection of the optimal design options of telecommunication facilities. *IAPGOS*. 2018. no. 4, P. 16–19. DOI: https://doi.org/10.5604/01.3001.0012.8014

11. Мельнікова Л.І., Лінник О.В., Кривошапка Н.В., Барсук В.А. Застосування евристичної процедури багатокритеріальної оптимізації до вибору варіанта мовного кодеку в IP-мережі. *Проблеми телекомунікацій*. 2020. – № 1(26). – С. 23–32.

12. Kolisnyk M. Vulnerability analysis and method of selection of communication protocols for information transfer in internet of things systems *Radioelectronic and Computer Systems*. 2021. – № 1(97). – P. 133–149. DOI: https://doi.org/10.32620/reks.2021.1.12

13. Agnieszka Tubis, Sylwia Werbińska-Wojciechowska Fuzzy TOPSIS in selecting logistic handling operator: case study from Poland. *Transport*, 2023, 38(1): p. 12–30.

14. Blanca Ceballos, Mar´ıa Teresa Lamata, David A. Pelta Fuzzy Multicriteria Decision-Making Methods: A Comparative Analysis. *International journal of intelligent systems*, Vol. 00, 1–17 (2016). DOI 10.1002/int.21873

15. Alaa Alden Al Mohamed, Sobhi Al Mohamed and Moustafa Zino Application of fuzzy multicriteria decision-making model in selecting pandemic hospital site. *Future Business Journal* (2023) 9:14 https://doi.org/10.1186/s43093-023-00185-5

16. Petrović G., Mihajlović J., Ćojbašić Ž., Madić M., Marinković D. Comparison of three fuzzy mcdm methods for solving the supplier selection problem. *Facta universitatis. Series: Mechanical Engineering*. 2019. – Vol. 17, № 3. – P. 455 – 469.

17. Sun H. Zhang B., Ni W. A Hybrid Model Based on SEM and Fuzzy TOPSIS for Supplier Selection. *Mathematics*. 2022. – № 10. – 3505. DOI: https://doi.org/10.3390/math10193505

18. Salimov V. Application of TOPSIS Method with Trapezoidal Fuzzy Numbers. *Science Review*. – 2021. – № 1(36). DOI: https://doi.org/10.31435/rsglobal_sr/30012021/7377

19. Jefmański B. Rozmyta metoda TOPSIS jako narzędzie identyfikacji determinant jakości usług i produktów. *Handel wewnętrzny*. 2013. – № 5(346). – S. 28–41.

20. Alojaiman B. A Multi-Criteria Decision-Making Process for the Selection of an Efficient and Reliable IoT Application. *Processes*. 2023. – № 11. – 1313. DOI: https://doi.org/10.3390/pr11051313

21. Duško Z. Tešić, Darko I. Božanić, Dragan S. Pamučar, Jamalud Din DIBR – Fuzzy MARCOS model for selecting a location for a heavy mechanized bridge. *Vojnotehnički glasnik* / *Military technical courier*. 2022, Vol. 70, Issue 2, p. 314–339.

22. Susmita Bandyopadhyay A Novel Multi-Criteria Decision Analysis Technique Considering Various Essential Characteristics / DOI: https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-608280/v1

23. Basílio, M. P., Pereira, V., Costa, H. G., Santos, M., Ghosh, A. A Systematic Review of the Applications of Multi-Criteria Decision Aid Methods (1977–2022). *Electronics*, 2022, no. 11, iss. 11, article no. 1720. DOI: 10.3390/electronics11111720.

24. Miomir Stanković, Željko Stević, Dillip Kumar Das, Marko Subotić and Dragan Pamučar A New Fuzzy MARCOS Method for Road Traffic Risk Analysis / *Mathematics*. 2020, *8*(3), 457; https://doi.org/10.3390/math8030457

Pyvovar O. S., Kucheruk O. Ya., Kysil T. M. A FUZZY MULTIPLE-CRITERIA DECISION-MAKING APPROACH TO SELECTING TELECOMMUNICATIONS EQUIPMENT

The article is devoted to the issue of rational choice of telecommunications equipment. The paper notes that the best approach to solving such issues is the methods of multi-criteria decision-making. Currently, the vast majority of global terrestrial transport networks are based on optical data transmission technologies. Since the early 2000s, optical technologies have been gradually replacing traditional copper technologies in subscriber access networks. This was primarily facilitated by the emergence of passive optical networking (PON) technology. Building cost-effective PONs requires a scientifically sound approach to the selection of appropriate equipment, in particular, optical line terminals. In such situations, the most appropriate approach is to use multi-criteria decision-making (MCDM) methods and techniques. Given that most decisions in engineering are made under conditions of uncertainty, it is advisable to use Fuzzy MCDM methods. The implementation of fuzzy logic in combination with MCDM methods is becoming increasingly popular and is a powerful tool for solving complex decision-making problems. Fuzzy MCDM methods provide a framework with greater flexibility to address problems that arise due to insufficient or inaccurate information. One of the main challenge in applying MCDM methods in practical applications is the difficulty of determining the best method for the problem under study, as applying different MCDM methods can lead to different rankings. Therefore, it is worth using more than one method at a time. The article considers the use of Fuzzy MCDM methods for selecting an optical line terminal. The purpose of the study is to build a model for the optimal selection of telecommunications equipment under conditions of fuzzy information based on a combination of Fuzzy MCDM methods, using the selection of an optical line terminal as a case study. This article presents three fuzzy MCDM approaches (Fuzzy SWARA + Fuzzy TOPSIS, Fuzzy SWARA + Fuzzy MARCOS and Fuzzy SWARA + Fuzzy ARAS) for selecting an optical line terminal. The best alternative in each approach is identified and the results are compared.

Key words: *optical networks, optical line terminal, Fuzzy MCDM, Fuzzy MARCOS, Fuzzy ARAS methods.*

УДК 621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/19

Приймак С. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кравчук С. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

МЕТОД ПІДВИЩЕННЯ ДОСТУПНОСТІ VOIP-СИСТЕМ

У статті розглянуто актуальну проблему підвищення доступності VoIP-систем (Voice over IP), які забезпечують голосовий зв'язок через IP-мережі без використання традиційної телефонної інфраструктури. Автори аналізують основні виклики, пов'язані з експлуатацією VoIP-систем, зокрема необхідність забезпечення безперервності сервісу, відмовостійкості, масштабованості та ефективності використання ресурсів.

Запропонований метод підвищення доступності VoIP-системи базується на використанні безкоштовного програмного забезпечення Kamailio (сервер сигналізації SIP), RTPengine (обробка медіа-трафіку) та Redis (швидка база даних для зберігання RTP-транзакцій). Реалізована архітектура включає механізми автоматичного резервування серверів сигналізації та медіа-шлюзів, балансування навантаги та безшовного перемикання на резервні вузли у разі відмови одного або декількох компонентів.

Це суттєво відрізняється від традиційних підходів, де відмова одного з ключових елементів (сервер сигналізації або медіа-шлюз) призводить до негайного завершення всіх активних з'єднань.

Авторами було виконано експериментальне моделювання роботи системи, яке підтвердило її високу ефективність: навіть у разі відмови 50 % компонентів система зберігає працездатність і не перериває активні голосові виклики. Також проведено аналіз традиційних підходів до побудови VoIP-систем та їхніх недоліків, зокрема залежність від окремих вузлів і неможливість збереження існуючих викликів у разі відмови сервера сигналізації або медіа-шлюзу.

Отримані результати можуть бути корисними для розробників і операторів VoIP-мереж, а також підприємств, які використовують IP-телефонію для критично важливих комунікацій. Запропонована система дозволяє мінімізувати ризики переривання зв'язку, підвищити якість обслуговування користувачів і забезпечити високу надійність роботи VoIP-сервісів.

Ключові слова: *VoIP система, SIP, RTP, висока доступність, надійність.*

Постановка проблеми. Постійна потреба в наявності якісного голосового трафіку через пакетні мережі, зокрема IP-мережі, підтримує високий інтерес розробників до удосконалення технології голос через Інтернет-протокол VoIP (Voice over IP) [1, 2]. Дана технологія не використовує традиційну комутовану телефонну мережу загального користування PSTN (public switched telephone network); натомість виклики здійснюються через мережу передачі даних Інтернет-протоколу.

На даний час, існують певні обмеження в сучасних архітектурах IP-телефонії, що орієнтовані на надання високоякісних телефонних послуг, особливо в умовах великих навантажень, коли необхідно забезпечувати стабільну роботу, як-от в організаціях, де користувачі активно використовують ці послуги [3, 4]. Такі обмеження можуть призвести до того, що організація, аби покращити якість обслуговування і уникнути переривань у роботі, змушена обирати власні рішення, які часто вимагають значних фінансових вкладень. Основні труднощі, з якими стикаються організації, що застосовують програмні рішення з відкритим вихідним кодом для телефонії, полягають у забезпеченні безперервної роботи в умовах високої паралельності при наявності великих обсягів запитів.

Сьогодні багато уваги приділяється наступним дослідженням, пов'язаним із подальшим розвитком VoIP-систем.

1. Висока доступність: VoIP-системи повинні забезпечувати безперервний доступ до зв'язку навіть у випадках відмов або збоїв [5, 6]. Зазвичай, це досягається за допомогою методів резервування, кластеризації серверів та використання кількох маршрутів для передачі даних.

2. Вимоги якості обслуговування (QoS): однією з основних проблем доступності VoIP-

систем є забезпечення стабільної якості передачі голосу, що включає низьку затримку, мінімальні втрати пакетів та відсутність переривань [7]. Це досягається через розподіл ресурсів, планування трафіку та адаптацію до змін у мережі.

3. Надійність і відмовостійкість: VoIP-системи мають бути захищені від різного роду збоїв, включаючи відмову серверів, збої мережі та напади DDoS (distributed denial-of-service). Дослідження в цій сфері спрямовані на розробку механізмів швидкого відновлення після збоїв.

4. Безпека: оскільки VoIP-системи функціонують через Інтернет, вони стають вразливими до атак, таких як підміна IP-адрес, перехоплення викликів, атаки на сервери реєстрації (сервери SIP (Session Initiation Protocol)) та DDoS-атаки. Підвищення доступності часто включає захист від цих ризиків через шифрування даних, автентифікацію користувачів та інші методи захисту.

5. Масштабованість: зі зростанням кількості користувачів та обсягу трафіку VoIP-системи повинні залишатися стабільними та забезпечувати високу якість зв'язку без переривань. Тому дослідження також охоплюють розробку архітектур, які можуть масштабуватися відповідно до потреб.

6. Ефективність використання ресурсів: оптимізація використання мережних і обчислювальних ресурсів є важливою складовою підвищення доступності. Сучасні дослідження охоплюють різні методи компресії голосових даних, управління пропускною здатністю та мінімізації енергоспоживання.

Оскільки все більше компаній переходять на IP-телефонію, зростає потреба у забезпеченні безперебійної роботи VoIP-систем. Тому зростає актуальність досліджень у сфері підвищення доступності VoIP-систем, що обумовлена широким поширенням таких систем як в особистому, так і комерційному середовищі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [9] розглянуто приклад побудування VoIP-системи з шифруванням голосового та сигнального трафіку в режимі реальному часі, в [10] приділено увагу побудуванню безпечної комп'ютерної мережі для VoIP-системи та наведені типові показники навантаги серверів VoIP, але в жодній з цих робот не розглянуто аспекти стійкості до збою програмних та апаратних елементів VoIP-системи. В [11] розглянуто декілька методів підвищення доступності VoIP-системи, але жоден з них не виконує резервування існуючих голосових потоків RTP. У випадку реалізації запропонованої нами системи вплив на сервіси відсутній навіть при відмові 50 % її компонентів. Представляє інтерес для поліпшення VoIP-систем підходи на базі безкоштовного програмного забезпечення Kamailio, RTPengine та Redis [17]. Але у відомих роботах їх застосування недостатньо вивчене.

Постановка завдання. Метою даної роботи є розробка методу підвищення доступності VoIP-системи, створеної на базі безкоштовного програмного забезпечення Kamailio, RTPengine та Redis, яка дасть змогу обробляти існуючі та нові голосові виклики без впливу на сервіс в разі відмови 50 % елементів системи.

Виклад основного матеріалу дослідження. На даний час VoIP-системи широко використовуються в мережах мобільного та фіксованого зв'язку для обробки голосового трафіку [13]. Класична схема VoIP-системи наведена на рис. 1 [14].

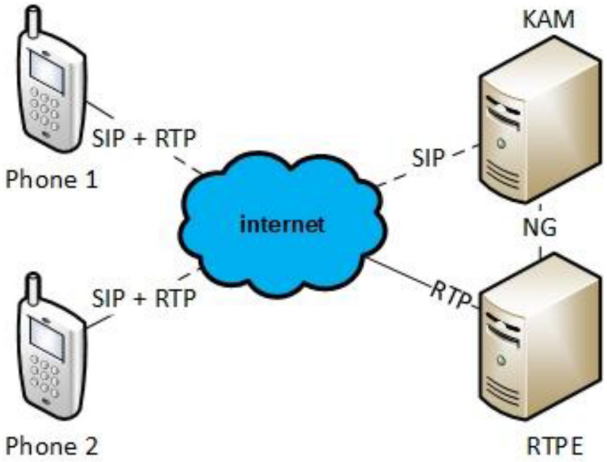


Рис. 1. Класична схема VoIP системи

Система складається з серверу сигналізації «KAM» та медіа-шлюзу «RTPE», які відповідають за опрацювання сигнального (SIP) та голосового (RTP) трафіку, відповідно, та двох абонентських терміналів з підтримкою протоколу SIP – Phone 1, Phone 2. Підвищити доступність системи, структура якої наведена на рис. 1, неможливо, та у разі відмови одного з її компонентів ми отримаємо вплив на сервіс у вигляді відмови обробки голосового або сигнального трафіку. Зазвичай в таких системах використовують програмне забезпечення, яке об'єднує сигнальний та медіа сервери, на кшталт Asterisk, Freeswitch на операційній системі Linux. В окремих випадках використовують віртуальне середовище WMVare, VirtualBox, HyperV, Docker або інше.

Високодоступною VoIP-системою називається система голосового зв'язку, яка використо-

вує IP-пакети для передачі голосу (відео, тощо) та спроектована для забезпечення безперервного функціонування, навіть у випадку збою окремих, як програмних так і апаратних компонентів, або мережних проблем. Основна мета такої системи – мінімізувати час простою, забезпечити стійкість до відмов, балансування навантаження, а також дублювання та резервування ресурсів [14].

Схему високодоступної VoIP-системи можна представити наступним чином, як показано на рис. 2.

Система складається з наступних компонентів:

– сервер сигналізації – KAM1, KAM2, відповідає виключно за обробку сигналізації, в данному випадку SIP;

– медіа шлюз – RTPE1, RTPE2, відповідає виключно за опрацювання голосового RTP трафіку;

– In-memory DB – REDIS, база данних для RTP транзакцій;

– абонентські термінали з підтримкою протоколу SIP – Phone 1, Phone 2.

В якості серверу сигналізації обираємо програмний SIP сервер Kamailio, а медіа шлюзом виступає RTP engine [15] – програмний продукт керування RTP трафіком. База даних REDIS [17] використовується для маніпуляцій (накопичення, видалення) RTP транзакцій.

Між серверами сигналізацій KAM1 та KAM2 присутній логічний канал зв'язку, так званий DMQ interface [15] для обміну ідентифікаторами SIP транзакцій (SIP call id) [1], в той самий час сервера керують медіа шлюзами (RTPE1, RTPE2) за протоколом NG [15]. В той самий час медіашлюзи RTPE1 та RTPE2 обмінюються RTP транзакціями за допомогою БД Redis за протоколом pub/sub [17]. Час перемикання активного вузла сервера на гарячий резерв становить 1 с.

Розглянемо сценарії обробки голосового виклику: як відомо, голосовий виклик в VoIP-мережі складається з декількох компонент:

– сигналізації (в даному випадку SIP);

– голосового потоку даних (RTP).

В схемі, наведений на рис. 2, по замочуванню встановлені такі пріоритети: сервер сигналізації KAM1 керує медіа шлюзами RTPE1 (основний) та RTPE2 (резервний), так само KAM2 керує медіа шлюзами RTPE2 (основний) та RTPE1 (резервний). Обидва медіа шлюзи використовують базу даних REDIS, яка служить для моніторингу активності між екземплярами RTPengine та виконує аварійне перемикання сесій з одного екземпляра на інший.

В даній реалізації лише одна пара KAM+RTPE може бути активною та опрацьовувати голосові виклики, інша пара знаходиться в режимі гарячого резерву.

У випадку 100 % функціональності системи голосовий виклик опрацьовується наступним

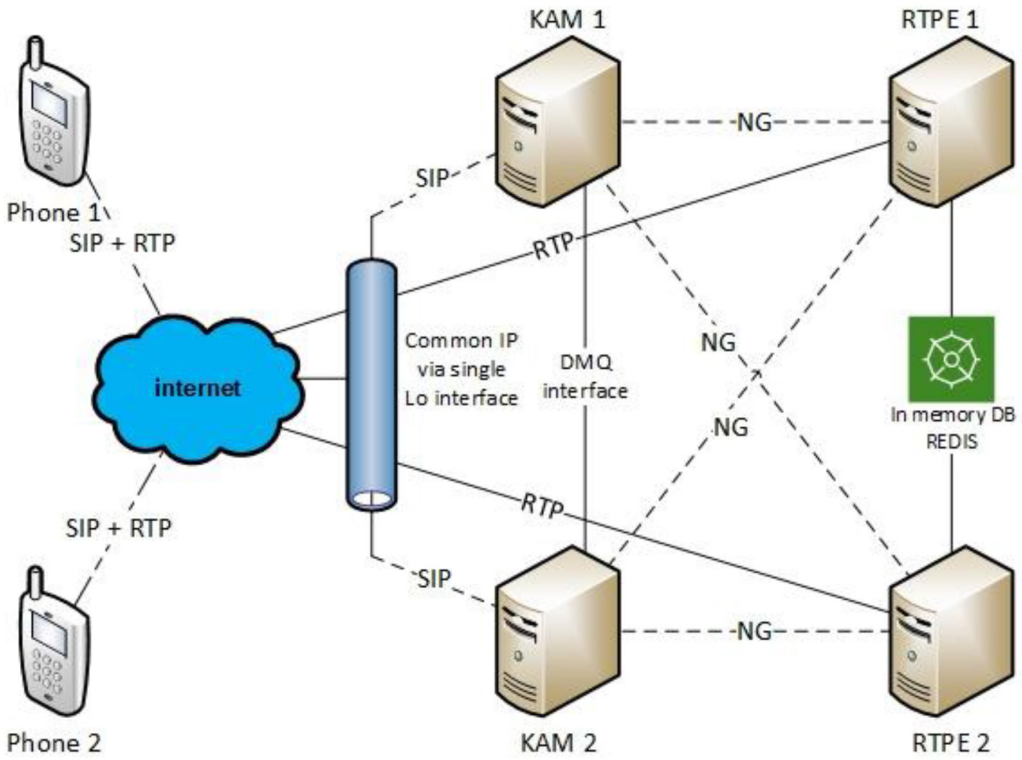


Рис. 2. Схема високодоступої VoIP системи

чином: сигналізацію опрацьовує КАМ1 та в той самий час він керує RTPE1, який в свою чергу відповідає за встановлення голосового RTP потоку між абонентами Phone1 та Phone2. В разі закінчення виклику одним з абонентів, КАМ11 надає команду на припинення RTP потоку RTPE1 та з'єднання розривається.

Загальну доступність системи можна оцінити за допомогою формули [14]:

$$A = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR},$$

де MTBF (Mean Time Between Failures) – середній час між відмовами; MTTR (Mean Time to Repair) – середній час відновлення після збою.

Розрахунок доступності в нашому випадку можна виконати, виходячи з наступних даних:

– MTBF для класичної та високодоступної схеми традиційно приймають довжиною два тижні або 336 год. (1209600 с);

– MTTR для класичної системи становить 60 хв., або 3600 с. Саме стільки часу вимагає розгортання серверу з резервної копії;

– MTTR для високодоступної системи становить 1 с, це час перемикання активного вузла сервера на гарячий резерв.

Тоді чисельно доступність класичної системи буде:

$$A = 1\,209\,600/(1\,209\,600 + 3600) = 99{,}7\ \%,$$

а доступність високодоступної системи:

$$A = 1\,209\,600/(1\,209\,600 + 1) = 99{,}9999\ \%.$$

Розглянемо випадки, коли будемо мати відмову одного або декількох елементів системи:

1. З'єднання було успішно встановлено за алгоритмом, описаним вище, але згодом маємо відмову сервера сигналізації КАМ1. Голосовий потік продовжує функціонувати, але такий виклик «ніколи» не завершився б у разі відсутності КАМ2, який контролює SIP транзакції сервера КАМ1 по логічному каналу «DMQ interface». Таким чином КАМ2 «підхоплює» усі активні сигнальні транзакції КАМ1.

2. З'єднання було успішно встановлено за алгоритмом, описаним вище, але згодом маємо відмову RTPE1. В такому випадку, завдяки додатковому алгоритму та наявності бази даних REDIS, RTPE2 бере на себе «доопрацювання» голосового RTP потоку в той самий час як SIP Server 1 продовжує обробляти сигналізацію.

Об'єктом дослідження є проведення двох експериментів:

А. Збереження голосового виклику та його коректне опрацювання після програмного або апаратного збою сигнального сервера КАМ1, який керує цим викликом.

Б. Збереження голосового виклику та його коректне опрацювання після програмного або апаратного збою медіа шлюза RTPE1, який опрацьовує голосовий потік.

Суть проведення експерименту *А* в наступному:

1) абонент Phone1 здійснює виклик абонента Phone2 в системі, наведеній на рис. 2;

2) після успішного встановлення з'єднання між цими абонентами ми штучно вносимо відмову сигнального серверу КАМ1, власне вимикаємо віртуальний комп'ютер;

3) оскільки всі SIP-транзакції «віддзеркалюються» в сигнальному сервері КАМ2, а ПЗ Keepalive впроваджує коректний статус сигнального сервера (в даному випадку КАМ2 змінює свій статус з резервного на основний) та продовжує керувати всіма транзакціями, раніше отриманими від КАМ1;

4) в разі отримання сервером КАМ2 сигнальних повідомлень в рамках SIP-транзакції, яка була створена КАМ1, КАМ2 відшукує цю транзакцію у власній БД та продовжує обробляти цей виклик.

Сигнальний трейс голосового виклику описаного вище, наведено на рис. 3, момент відповіді сигнального серверу КАМ2 позначено міткою [takeover].

Суть проведення експерименту *Б* в наступному:

1) абонент Phone1 здійснює виклик абонента Phone2 в системі, наведеній на рис. 2;

2) SIP транзакція буде опрацьована сигнальним сервером КАМ1, а голосовий потік формується медіа шлюзом RTPE1;

3) після успішного встановлення з'єднання між цими абонентами ми штучно вносимо відмову сигнального серверу RTPE1, власне вимикаємо віртуальний комп'ютер;

4) REDIS відстежує вихід з ладу медіа шлюзу RTPE1 та виконує аварійне перемикання сесій на RTP2;

5) RTPE2 виконує обробку RTP трафіка для існуючих та нових голосових викликів.

На рис. 3 наведено голосовий виклик між абонентами Phone1 та Phone2 через високодоступну VoIP систему, яка складається з абонентських SIP-терміналів Phone1 та Phone2, серверів сигналізації КАМ1 та КАМ2 та SIP proxy, який в данному випадку виконує роль ретранслятора SIP повідомлень та надає можливість зібрати повний трейс сигнального обміну між вищезазначеними еле-

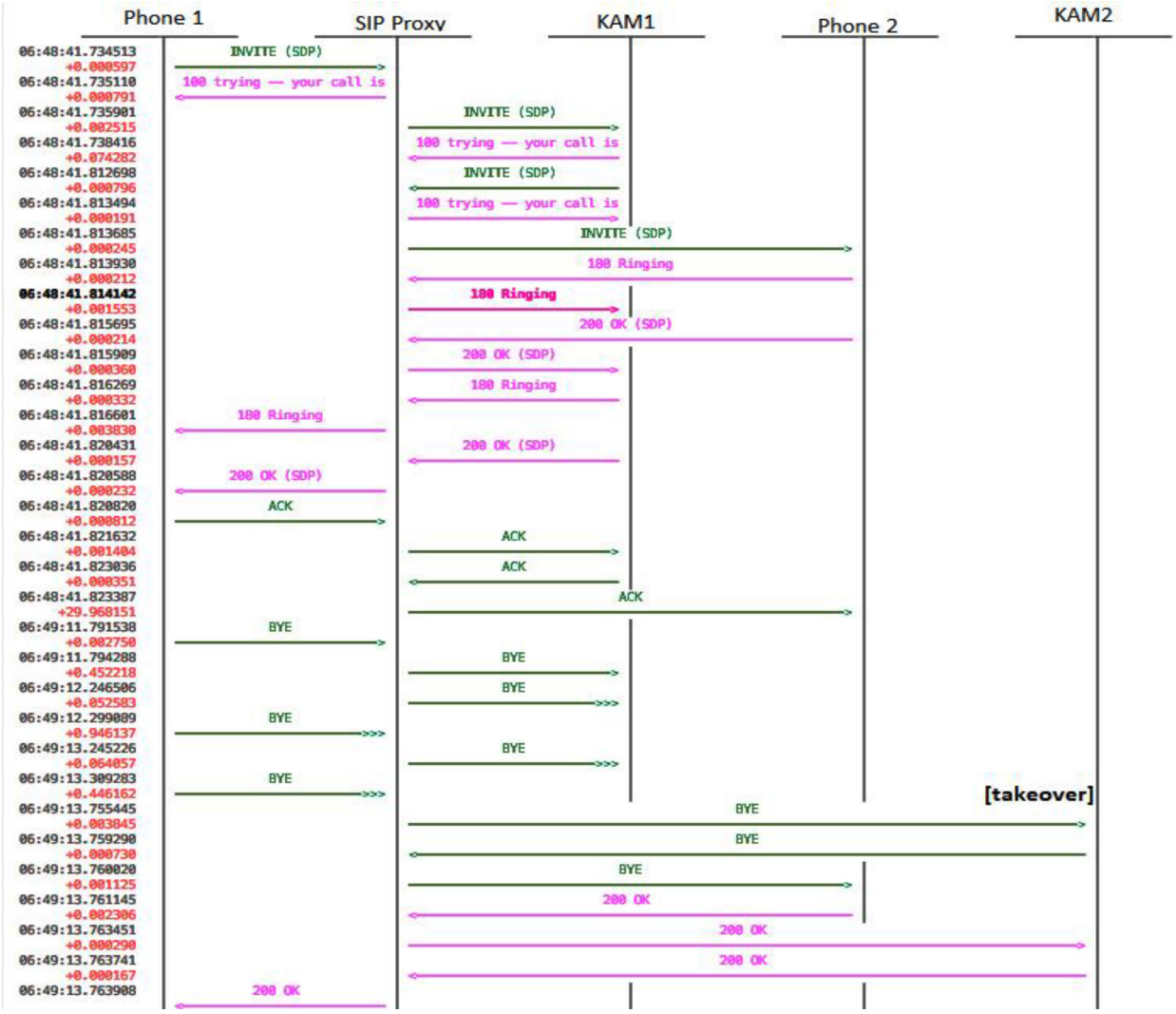


Рис. 3. Сигнальний трейс голосового виклика (Voice call signal trace) з подальшою відмовою сигнального сервера КАМ1

ментами системи. Розглянемо більш детально як саме проходить голосовий виклик.

На момент 06:48:41.734513 від абонента Phone1 надходить SIP-повідомлення **INVITE**, мета якого створити нову сесію голосового зв'язку з унікальним ідентифікатором **call-id** [1]. У відповідь на **INVITE**, абонент Phone1 отримує повідомлення **100 Trying** (запит у обробці) від SIP Proxy, який в свою чергу ретранслює повідомлення **INVITE** до сигнального серверу КАМ1, що є активним за замовченням. КАМ1 у свою чергу перевіряє внутрішню таблицю маршрутизації, знаходить IP адресу абонента Phone2, змінює його в полі «**To:**» повідомлення **INVITE**, та пересилає його до SIP Proxy в момент часу 06:48:41.812698.

Після отримання **INVITE**, SIP Proxy пересилає його кінцевому абоненту Phone2 та у відповідь отримує повідомлення **180 Ringing** (викликаємо абонента), яке в свою чергу транслюється сигнальному серверу КАМ1.

В 06:48:41.815692 від абонента Phone2 до SIP Proxy надходить повідомлення **200 OK** (абонент відповів на виклик), яке далі транслюється на сигнальний сервер КАМ1 і далі кінцевому абоненту Phone1. Отримавши повідомлення **200 OK** про те, що абонент прийняв голосовий виклик, Phone1 відсилає підтвердження у вигляді повідомлення **ACK**, яке в свою чергу транслюється кінцевому абоненту Phone2 через SIP Proxy та КАМ1 (часовий інтервал 06:48:41.820820 – 06:48:41.823387).

Вносимо штучну відмову сигнального сервера КАМ1 (вимикаємо віртуальну машину).

В 06:49:11.791538 абонент відправляє до SIP Proxy повідомлення про завершення виклику **BYE**, яке транслюється до сигнального серверу КАМ1.

Не отримавши ніякоі відповіді від сигнального серверу КАМ1, SIP Proxy відправляє повідомлення **BYE** до серверу КАМ2, який в свою чергу ідентифікує транзакцію по SIP call-id, раніше отрима-

ного через DMQ інтерфейс від серверу КАМ1 та пересилає його кінцевому абоненту Phone2.

В свою чергу абонент Phone2 відправляє повідомлення про підтвердження завершення виклику **200 ОК** до абонента Phone1 по ланцюгу Phone2 – SIP Proxy – КАМ2 – SIP Proxy – Phone1.

Таким чином ми бачимо, що після відмови сигнального серверу КАМ1 SIP-діалог не обривається, а в 06:49:13.755445 продовжується оброблятися сигнальним сервером КАМ2. Переключення на гарячий резерв виконується в автоматичному режимі, завдяки чому вплив на сервіс з'єднання відсутній.

Висновки. Створена структурна модель високодоступної VoIP-системи, яка зазначена на рис. 2, і шляхом використання програмного забезпечення для віртуалізації комп'ютерних систем виконано її моделювання. Доступність змодельованої системи становить 99,9999 %, і навіть в разі відмови 50 % компонентів системи всі існуючі та нові голосові виклики продовжують опрацьовуватися.

Представлено метод підвищення доступності VoIP-системи у разі відмови одного або декількох її компонентів, який відрізняється від традиційних підходів збереженням всіх існуючих медіа-викликів в разі відмови одного або декількох компонентів та використанню безкоштовного програмного забезпечення. Основна відмінність даного методу полягає в тому, що при відмові одного з двох серверів (КАМх та RTPEx) система не втрачаємо жодного встановленого виклику та має змогу опрацьовувати нові. Схема системи має єдину точку входу (IP адрес для прийому/відправки викликів з/на зовні), яка є незмінною в разі відмови елементів системи.

Представлені типові сценарії відмов компонентів сигнального серверу КАМ1 та медіа шлюзу RTPE1.

Список літератури:

1. Rosenberg J., Schulzrinne H., Camarillo G., Johnston A., Peterson J., Sparks R., Handley M., Schooler E. SIP: Session Initiation Protocol. RFC 3261. Internet Engineering Task Force (IETF) 2002, 269p.

2. Alo U. R., Nweke H. F., Voice over Internet Protocol (VOIP): Overview, Direction And Challenges. Journal of Information Engineering and Applications, Vol.3, No.4, pp.18-28, 2013, URL: https://www.researchgate.net/publication/342_Voice_over_Internet_Protocol_VOIP_Overview_Direction_And_Challenges

3. Vetoshko I. P., Kravchuk S. O. Possibilities of improving the voice services quality in 5G networks. Information and Telecommunication Sciences. 2023. Vol.14, No 2. pp. 9-16, https://doi.org/10.20535/2411-2976.22023.9-16

4. Ahson M. VoIP Handbook: Applications, Technologies, Reliability, and Security. Ilyas, CRC Press, 2009. 472 p.

5. Habraken J. Practical Cisco Routers. QUE USA, 1999. 315 p.

6. Roy O. P., Kumar V. A Survey on Voice over Internet Protocol (VoIP) Reliability Research. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 6th International Conference on Computers Management & Mathematical Sciences (ICCM 2020) Vol. 1020, 2020. pp. 12–19 Nirjuli, India, DOI 10.1088/1757-899X/1020/1/012015.

7. Snir Y., Ramberg Y., Strassner J., Cohen R., Policy Quality of Service (QoS) Information Model, RFC 3644. Internet Engineering Task Force (IETF), 2003. 73p.

8. Schulzrinne H., Casner S., Frederick R. RTP: A Transport Protocol for Real-Time Applications. RFC 3550. Internet Engineering Task Force (IETF), 2003. 104 p.

9. Tulemu W., Design of an asterisk-based VoIP system and the implementation of security solution across the VoIP network. World Journal of Advanced Research and Reviews, 2024, Vol.1, № 23(01), P.875–906 DOI: https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.23.

10. Tobiloba K. A., Building a Secure Asterisk-Based VoIP System Design and Implementation, Researchgate, 2023. Vol. 4, № 9(82). p. 4–11. URL: https://www.researchgate.net/publication/388707610

11. Martin A., Gamess E., Urribarri D., Gómez J. A Proposal for A High Availability Architecture for VoIP Telephone Systems based on Open Source Software. (IJACSA) International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2021. Vol. 9, No. 9, 20. 2023. URL: https://thesai.org/Downloads/Volume9No9/Paper_1-A_Proposal_for_a_High_Availability_Architecture.pdf

12. The Sipwise C5 CE Handbook mr8.5.10. 400p. URL: https://www.sipwise.com/doc/mr8.5.10/handbook-ce.pdf.

13. Wu W. Packet Forwarding Technologies. Auerb Publications. 2008. 446 p.

14. Ahmed A., Madani H., Siddiqui T., Voip Performance Management and Optimization, Cisco Press. 2010. 448 p.

15. Mierla D. C., Modroiu E. R. "SIP Routing with Kamailio" 2022 356p.

16. Pal S., Gadde R., Latchman H.A. On The Reliability of Voice Over IP Telephony. Computer Science, Engineering. 2011. URL: https://www.iiis.org /CDs2011/CD2011IMC/CCCT_2011/PapersPdf/TA224EV.pdf.
17. Carlson J.L. Redis in action. 2013. 320 p.

Priymak S.O., Kravchuk S.O. METHOD OF INCREASING THE AVAILABILITY OF VOIP SYSTEMS

The article reveals methods of increasing VoIP (Voice over IP) system availability. Authors analyzed main challenges associated with the operation of VoIP systems, in particular the need to ensure service continuity, fault tolerance, scalability and resource efficiency. Method given for increasing the availability of a VoIP system is based on use of free software: Kamailio (SIP signaling server), RTPengine (media traffic processing), Redis (in-memory database for storing RTP transactions) and Linux Ubuntu as a host operating system. Implemented architecture reflects automatic failover of signaling servers and media gateways, load balancing and seamless switching to backup node in case of failure of one or more components. The approach given is drastically differs from others, where failure of one of the key elements (signaling server or media gateway) leads to immediate termination of all active connections. Authors performed experimental simulation of the system by deploying high availability schema depicted on pic.1 into virtual environment and confirmed its high efficiency: even in the event of 50 % components failure, the system remains operational and does not interrupt any active voice call. An analysis of existing traditional approaches in creation of VoIP systems has been conducted and it reveals inability to save existing calls in the event of signaling server or media gateway failure. Obtained results may be useful for developers and operatonal staff of VoIP fixed or mobile telecom networks as well as enterprises which using IP telephony for communications. Given system allows to minimize the risks of communication interruption, improving the quality of user service and ensuring high reliability of VoIP services.

Key words: *VoIP system, SIP, RTP, high availability, reliability.*

УДК 621.396.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/20

Сайко В. Г.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Зінченко М. О.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В. О.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Солодовник В. І.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Криволапов Я. В.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Криволапов Г. Я.
Київський столичний університет імені Бориса Грінченка

МОДЕЛЬ ІНТЕГРОВАНОГО МЕРЕЖЕВОГО КОМПЛЕКСУ ЗВ'ЯЗКУ З ВИКОРИСТАННЯМ БПЛА ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИРІШЕННЯ ЦІЛЬОВИХ ЗАВДАНЬ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Інтеграція безпілотних літальних апаратів (БПЛА) у систему управління бойовими діями відкриває нові можливості для вдосконалення військових тактик. Завдяки універсальності та ефективності, БПЛА можуть стати незамінним інструментом у сучасних бойових умовах, сприяючи покращенню координації між механізованими підрозділами та підвищенню загальної боєздатності військ. Застосування БПЛА значно розширює можливості збройних сил, забезпечуючи високий рівень контролю та доступу до інформації на полі бою. У роботі представлено результати розробки моделі мережі з використанням БПЛА, де елементи програмно-конфігурованих мереж (SZDN) повністю реалізовані на базі безпілотників. Це спрямовано на підвищення ефективності виконання завдань бронетанковими підрозділами. Запропоновано архітектуру мережі, яка включає інтеграцію технологій SDN, у якій окремі БПЛА виконують функції SDN-комутаторів, а контроль здійснюють прив'язані БПЛА, що належать до повітряного сегмента мережі й здатні взаємодіяти між собою. Визначено у межах цієї архітектури БПЛА наступний поділ на кластери: кожен кластер має головний вузол, через який здійснюється зв'язок з іншими кластерами. У інфраструктурі комплексу також передбачено наявність прив'язної висотної телекомунікаційної платформи, що складається з наземного і повітряного модулів, з'єднаних кабелем-тросом, який забезпечує як механічний зв'язок, так і передачу інформації між модулями [23]. *Окрім того, наведено методику моделювання мережі на основі БПЛА із підтримкою технологій SDN/NFV у середовищі Matlab, яка дозволяє оптимізувати управління мережевими ресурсами та необхідний обсяг обчислювальних потужностей для кожного віртуального пристрою, що виконує спеціалізовані завдання.*

Ключові слова: *БПЛА, технологія SDN/NFV, мобільні мережі, прив'язна висотна телекомунікаційна платформа.*

Постановка проблеми. Інтеграція БПЛА до структури управління бойовими діями відкриває нові горизонти для військових тактик. Їх універсальність та ефективність роблять їх незамінними інструментами у сучасному бойовому контексті, дозволяючи покращити взаємодію між бронетанковими підрозділами та підвищувати загальну боєздатність армійських формувань [1, 2]. Загалом БПЛА значно посилюють можливості сучасних збройних сил, забезпечуючи високий ступінь контролю та інформації на полі бою. Практика застосування безпілотної авіації у останніх військових конфліктах продемонструвала її рівнозначну ефективність. Сучасні БПЛА різної

розмірності та цільового призначення широко використовувалися у бойових операціях, серед яких особливе місце займають операції в Іраку та Афганістані, під час яких загальний наліт БПЛА становив 894 335 годин [3, 4]. У війні між Україною та російською федерацією наліт безпілотних авіаційних систем перевищив у рази більше. Аналіз військовими фахівцями показав, що широкомасштабне впровадження БПЛА, створюваних з урахуванням нових технологій, значно змінює способи ведення військових операцій [3]. З цієї точки зору представляє особливий інтерес аналіз існуючих рішень у галузі інтеграції ресурсів БПЛА та наземних мереж зв'язку, які побудовані на базі програмно-конфігурованих мереж SDN.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Мережі безпілотних літальних апаратів на основі SDN останнім часом привертають дедалі більшу увагу дослідників у всьому світі [5]. Архітектура SDN може забезпечити гнучке керування мережами БПЛА [6]. Розгортання технології SDN у мережах БПЛА дозволяє останнім ефективно виконувати завдання у встановлений термін. Далі розглянемо різні архітектурні рішення на основі SDN, відомі з літератури мереж БПЛА.

Автори в [7] запропонували систему на основі SDN для управління зв'язком між БПЛА. Основна мета цієї системи – покращити використання мережевих ресурсів, зменшити затримку та збільшити пропускну спроможність мережі БПЛА. Контролер SDN відіграє роль централізованого керуючого пристрою, який забезпечує зберігання, обробку та необхідне керування в мережі. У [8] запропоновано алгоритм централізованої диференціальної маршрутизації трафіку (TDR) на основі двох різних контролерів: (i) контролера координації та (ii) контролера кластера SDN. TDR спрямований на забезпечення необхідного рівня якості обслуговування QoS та характеристик надійності для з'єднань, чутливих до затримок. Як правило, БПЛА організовані у вигляді кількох кластерів. У кожному кластері контролер SDN кластера управляє передачею даних, плануванням мережевих ресурсів та взаємодією з усіма БПЛА в кластері. На наступному рівні розташований прив'язний дирижабль, який контролює всі області, в яких усі БПЛА повинні знати своє становище та швидкість. Нове рішення для маршрутизації пакетів запропоновано в [9] на основі гібридної технології SDN, розгорнутої серед групи БПЛА та пристроїв IoT. Деякі БПЛА можуть належати мережі SDN та враховувати правила переадресації SDN відповідно до топології мережі. Ці БПЛА також мають можливість переходу з SDN на розподілений традиційний протокол маршрутизації. В роботі [10] запропоновано структуру багатошляхової маршрутизації на основі SDN для мереж БПЛА. Контролер SDN використовується поверх цієї структури, щоб уникнути перекриття маршрутів. БПЛА, у свою чергу, працюють як програмні комутатори і можуть виконувати команди передачі даних відповідно до директив контролера. В [11] запропоновано архітектуру мережі мобільних датчиків на основі SDN для надійної передачі даних у роях БПЛА. Метою цієї архітектури є подолання обмежень мереж БПЛА, таких як обчислювальні проблеми та обмежений розподіл ресурсів каналу.

Постановка завдання. Метою роботи є обґрунтування структури розподіленої сетецентричної системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів і розробка моделі побудови мережевої інфраструктури з використанням БПЛА, в якій елементи програмно-конфігурованих мереж повністю реалізовані на БПЛА, для підвищення ефективності вирішення цільових завдань бронетанковими підрозділами.

Виклад основного матеріалу дослідження.

1. Загальні положення щодо аспектів впровадження мереж з використанням БПЛА

Програмно-конфігуровані мережі (SDN) є архітектурою з адаптивним і динамічним управлінням, де площина даних відокремлена від площини управління. Це дозволяє програмувати мережу та абстрагувати рівень додатків та сервісів від рівня мережевої інфраструктури [12, 13]. SDN розглядається як підхід до проектування мережі, що забезпечує управління ресурсами та обробку даних через програмне адміністрування та відкриті інтерфейси. Цей підхід дозволяє ізолювати управління від мережевого рівня, що сприяє ефективнішому розподілу ресурсів. Далі проаналізуємо використання SDN у мережах безпілотних літальних апаратів (БПЛА) [15, 16]. Проблеми проектування мереж БПЛА

При розробці мереж БПЛА виникають такі основні проблеми:

- Високе навантаження на мережу. Підвищений попит на певні типи трафіку може призвести до навантаження мережі та збільшення енергоспоживання.
- Переривання зв'язку та фрагментація мережі. Висока мобільність БПЛА викликає часті розриви з'єднань.
- Обмежені ресурси [14]. Мережі БПЛА стикаються з нестачею обчислювальних потуж-

ностей та складностями взаємодії з наземними сегментами, такими як базові станції або вузли сенсорних полів.

2. Аспекти побудови мережі БПЛА з підтримкою SDN/NFV технологій для рішення цільових задач спеціального призначення

2.1. Архітектура мереж БПЛА

Мережі БПЛА є бездротовими мережами і складаються з двох сегментів [4]:

– літаючого, організованого як одиночними БПЛА, так і їх групами;

– наземного.

На особливу увагу заслуговує те, що і наземний, і літаючий сегменти можуть бути реалізовані архітектурно як однорангові, так ієрархічні (або кластерні) мережі. При цьому як головний вузол кластерів наземного сегменту можуть виступати окремі БПЛА.

Для організації нормально функціонуючої мережі БПЛА потрібно визначити, як взаємодіятимуть БПЛА із наземним сегментом. Взаємодія кількох БПЛА вимагатиме також організації в літаючому сегменті мережі зв'язку між окремими безпілотними літаючими апаратами. Безпілотні літаючі апарати цієї мережі можуть взаємодіяти один з одним за допомогою наземних станцій керування. Існує безліч прикладів архітектури мереж БПЛА, але серед них найпоширеніші наступні три архітектури (у яких БПЛА взаємодіють одна з одною завдяки базовим станціям): централізовану, кластерну та стільникову.

1. Централізована архітектура. У цій архітектурі декілька БПЛА обмінюються інформацією з однією наземною базовою станцією, тобто при взаємодії БПЛА між собою всі пакети даних передаються через наземну базову станцію. Переваги відмовостійкість при збоях окремих БПЛА, паралельне виконання завдань, покращення обчислювальних та запам'ятовувальних характеристик. Недоліки: пропорційність пропускної спроможності мережі щільності БПЛА, високі затримки, а також уразливість базових наземних станцій.

2. Архітектура кластеризації. У даній архітектурі літаючий сегмент розбитий на кілька кластерів, в якій один з БПЛА вибирається як головний вузол і забезпечує взаємодію всіх БПЛА в межах одного кластера, а також взаємодію БПЛА кластера з наземною базовою станцією. Переваги архітектури – підтримка БПЛА з різними характеристиками зв'язку та польоту. Недоліки: можливість поділу БПЛА (неможливості БПЛА одного кластера взаємодіяти з БПЛА іншого кластера) при частковому або повному пошкодженні базової станції.

3. Стільникова архітектура Ця архітектура поділяє наземний сегмент на кілька осередків, у кожній з яких використовується власна унікальна смуга частот, що дозволяє запобігти впливу завад від інших осередків. БПЛА можуть взаємодіяти як з використанням базових станцій, так і без їх допомоги. Проблеми: висока вартість наземних базових станцій та їх можливе пошкодження.

На рис. 1 зображено архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технології програмно-конфігурованих мереж, в якій як комутатори SDN виступають окремі БПЛА, а як контролери SDN – прив'язані БПЛА, що відносяться до літаючого сегменту мережі та мають здатність взаємодіяти між собою. Також у цій архітектурі БПЛА розділені за кластерами, у кожному з яких один БПЛА виконує роль головного вузла, через який учасники даного кластеру здійснюють взаємодію з БПЛА з іншого кластера. Іншими словами, взаємодія БПЛА з різних кластерів здійснюється завдяки обміну інформацією між головними вузлами кластерів, які можуть взаємодіяти один з одним безпосередньо, через базові станції, в якості яких виступають прив'язані БПЛА. Обмін даними між БПЛА в даній архітектурі в межах одного кластера може здійснюватися без участі головного вузла. Також на рівні додатків представленої на рис. 1 мережі мережеві функції можуть бути представлені у вигляді програмних модулів.

Застосування концепції віртуалізації мережевих функцій дозволить підвищити продуктивність обробки трафіку, що передається мережами БПЛА [17]. При реалізації мережевої архітектури із спільним використанням БПЛА та концепції NFV вирішуються наступні технічні питання:

1. Для абстрактного представлення мережевої структури можна віртуалізувати не лише основні функції, але й різні засоби апаратного забезпечення пристроїв мережі БПЛА.

2. Прозоре масштабування мережі та розподіл ресурсів завдяки застосуванню концепції NFV.

3. Зниження обсягів споживання електроенергії безпілотними літальними апаратами.

4. Завдяки віртуалізації основних функцій та апаратних ресурсів можна зменшити витрати, що виникають при розгортанні додаткових апаратних пристроїв, які використовуються при виконанні певних поставлених завдань.

3. Прив'язні висотні телекомунікаційні платформи на основі безпілотних літальних апаратів

Таким чином в роботі, авторами пропонується технічне рішення, щодо можливості застосування прив'язних висотних телекомунікаційних плат-

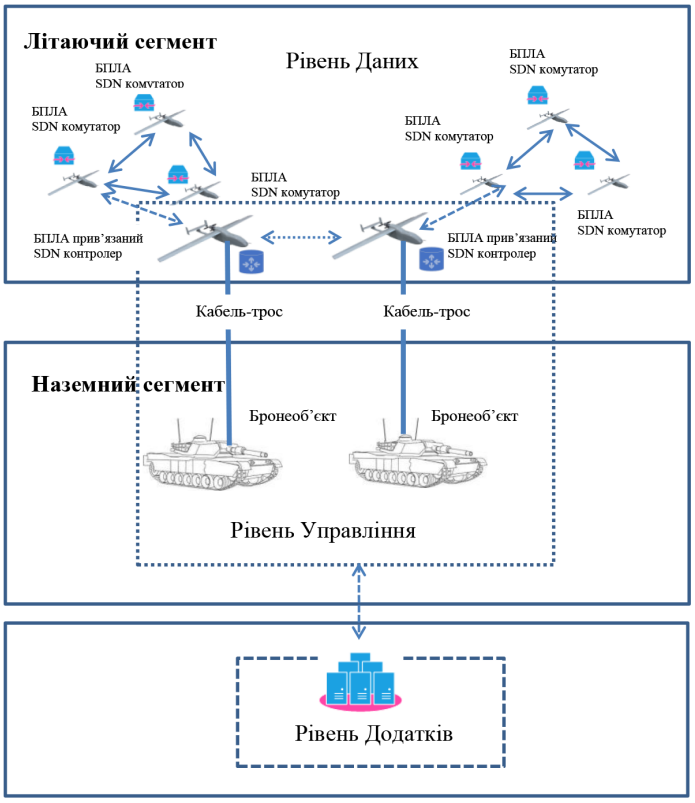


Рис. 1. Архітектура мережі БПЛА з контролером SDN на прив'язаному БПЛА літаючого сегменту

форм (ВТП) на основі безпілотних літальних апаратів (як прив'язних БПЛА), які також отримали назву «прив'язаних дронів» Flying COWs (Cell on Wings), для підвищення ефективності вирішення цільових завдань спеціального призначення бронетанковими підрозділами.

З точки зору архітектури, прив'язна висотна телекомунікаційна платформа є системою, що складається з повітряного та наземного модулів, які пов'язані між собою гнучким з'єднанням у вигляді кабелю-троса (див. рис. 2).

Цей кабель забезпечує як механічне, так і інформаційне з'єднання між модулями. Повітряний модуль (ПМ) виконує функцію утримання спеціального обладнання в певній точці над поверхнею Землі. До його складу входять пристрій для створення підйомної сили, платформа для монтажу обладнання, бортове джерело енергії, а також система управління положенням і орієнтацією.

Наземний модуль (НМ), розташований у кабіні бронеоб'єкта, забезпечує подачу енергії на ПМ через кабель-трос, намотаний на барабан лебідки. Ця лебідка використовується для підйому та спуску ПМ, а також для управління його роботою оператором. До складу НМ входять наземний пункт управління, перетворювач напруги, лебідка для кабелю та причальний пристрій. Кабель-трос виконує функції гнучкого механічного з'єднання між модулями, подачі енергії на ПМ та створення високошвидкісного каналу передачі даних.

Додатковою перевагою кабельного живлення є можливість одночасного використання кабелю для управління безпілотним літальним апаратом та передачі відео без втрат і спотворень. Прив'язні ВТП вирізняються мобільністю, малою вагою через відсутність бортових акумуляторів, швид-

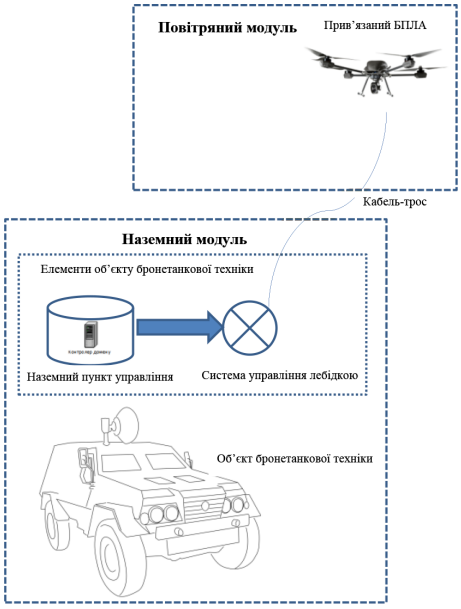


Рис. 2. Архітектура прив'язаного БПЛА

ким розгортанням на місцевості та здатністю працювати в режимі зависання.

Сучасні ВТП будуються на базі телекомунікаційного обладнання, що підтримує стандарти 5G/LTE, WiMAX та Wi-Fi. Технологія LTE забезпечує швидкість передачі даних до 1000 Мбіт/с у низхідному каналі та до 500 Мбіт/с у висхідному. WiMAX дозволяє створювати універсальні бездротові з'єднання на великих відстанях, навіть для об'єктів, що рухаються зі швидкістю до 120 км/год. Технологія Wi-Fi, заснована на стандарті IEEE 802.11.x, теоретично забезпечує швидкість передачі даних до 600 Мбіт/с.

При цьому для управління та обміну даними з БПЛА організуються такі напрями зв'язку:

– *напрям «вгору» – організується від НМ до БПЛА і включає*: командну лінію управління (КЛУ) для передачі команд управління спеціальною апаратурою та технічними засобами корисного навантаження, розміщеними на БПЛА;

– *напрям «вниз» – організується від БПЛА до НМ і включає*: КЛУ для передачі телеметричної інформації про стан підсистем БПЛА, спеціальної апаратури та технічних засобів корисного навантаження, а також квитанції про виконання команд управління;

– *високошвидкісна лінія передачі даних* від спеціальної апаратури та технічних засобів корисного навантаження, розміщених на БПЛА.

У безпілотних літальних апаратів прив'язаного типу з використанням оптоволоконного кабелю передаються по ньому наступні дані:

1. Команди управління – сигнали від оператора для управління рухом, стабілізацією та функціональністю дрону.

2. Дані телеметрії – інформація про стан БПЛА, включаючи його положення, висоту, швидкість, заряд акумулятора та інші параметри.

3. Відеосигнал – потокове відео високої чіткості з камер дрона.

4. Дані з датчиків – показання від тепловізорів, радарів, лазерних далекомірів, систем спостереження чи інших встановлених модулів.

5. Зворотний зв'язок – підтвердження виконання команд та дані про стан системи.

Оптоволоконний кабель забезпечує:

• дуже високу пропускну здатність – до десятків гігабіт за секунду в залежності від типу використовуваного волокна та обладнання.

• мінімальні затримки – швидкість передачі близька до швидкості світла, що робить такі системи практично миттєвими для керування.

• стійкість до завад – сигнали в оптоволоконному кабелі не піддаються впливу електромагнітних полів.

• дальність передачі – довжина кабелю обмежує дистанцію роботи, зазвичай це від кількох сотень метрів до кількох кілометрів. Цей тип зв'язку потрібний там, де потрібна висока безпека передачі даних, наприклад, для розвідувальних або військових операцій.

4. Методика моделювання літаючої мережі

4.1. Загальні зауваження

Однією з можливих переваг мереж БПЛА є надання можливості організації зв'язку в реальному часі без необхідності надання будь-якої інфраструктури. Основні ж проблеми мереж БПЛА пов'язані з:

• Значними втратами пакетів даних, високими затримками чи можливістю порушення процесу передачі інформації, викликаними високою мобільністю БПЛА.

• Обмеженістю енергетичних ресурсів БПЛА, що також може спричинити можливі збої та порушення роботи мережі.

Тому забезпечення зв'язності (особливо між окремими БПЛА), а також зниження споживання енергії є важливими завданнями в мережах БПЛА [14]. Для організації нормально функціонуючої мережі БПЛА потрібно визначити, як взаємодіятимуть БПЛА із наземним сегментом, в якості якого виступають об'єкти бронетанкової техніки. Взаємодія кількох БПЛА вимагатиме також організації в літаючому сегменті мережі зв'язку між окремими безпілотними літаючими апаратами [18, 19]. Безпілотні літаючі апарати цієї мережі можуть взаємодіяти один з одним за допомогою наземних станцій керування, які знаходяться на об'єктах бронетанкової техніки.

Для досягнення цієї мети пропонується впровадження віртуалізації мережевих пристроїв у літаючих мережах із підтримкою технологій SDN і NFV. SDN (Software-Defined Networking) являє собою мережу зв'язку, де управління літаючою мережею відокремлено від апаратного забезпечення та реалізується програмно. NFV (Network Functions Virtualization) – це концепція, яка передбачає відокремлення мережевих функцій від фізичного обладнання. Використання цих технологій дозволяє створювати та керувати мережами не лише на основі спеціалізованого мережевого обладнання, але й із використанням обчислювальних пристроїв архітектури x86. Це, у свою чергу, спрощує та здешевлює обслуговування літаючих мереж зв'язку, підвищує їхню енергоефективність, оптимізує

роботу та знижує обсяг службового трафіку [20]. Актуальність таких підходів і технологій підтверджується значною кількістю наукових досліджень.

Однак автори розглядаю ці питання стосовно проблем створення наземних мобільних мереж 5G/6G. У зв'язку з особливостями використання даних технологій для запропонованого рішення побудови літаючих мереж з підтримкою SDN та NFV для об'єктів бронетанкової техніки необхідно врахувати наступне:

1. Сучасні БПЛА, що застосовуються як окремо, так і у складі групи, можуть нести на борту одночасно кілька цільових навантажень, побудованих на різних фізичних принципах: багатофункціональна оптико-електронна система, цифрова аерофотосистема, бортова станція радіолокації, система радіо- і радіотехнічної розвідки, система зв'язку для передачі даних з цільових навантажень (датчиків) на мобільний пристрій (наприклад, планшет) віддаленому особовому складу бронетанкового підрозділу і т. д. При цьому практично в науковій літературі не освітленим залишається питання визначення оцінки ефективності рішення як окремих цільових завдань БПЛА, так і знаходження інтегральної оцінки ефективності застосування авіаційних комплексів з БПЛА при вирішенні набору цільових завдань (послідовно або послідовно-паралельно в часі) з урахуванням їхньої пріоритетності та ряду інших факторів.

2. На сучасному етапі розвитку військової безпілотної авіації дуже активно проводяться науково-дослідні роботи зі створення нових ударних безпілотних літальних апаратів, здатних вирішувати завдання у складі групи. У зв'язку з цим актуальним є вирішення завдання щодо обґрунтування структури розподіленої системи управління групою ударних безпілотних літальних апаратів та розробки алгоритмів її функціонування, що дозволяють підвищити ефективність групового застосування ударних безпілотних літальних апаратів шляхом координації їх сумісних дій в автономному режимі на користь підрозділів бронетанкової техніки.

З огляду на зазначене вище, розробка побудови мереж БПЛА з підтримкою технологій SDN та NFV та їх моделювання є актуальними, як з наукової, так і з практичної точки зору.

Технології SDN та NFV надають можливість створювати більш оптимальні й енергоефективні мережі зв'язку завдяки раціональному розподілу обчислювальних ресурсів між віртуальними вузлами. Для досягнення цього кожному віртуальному пристрою виділяється стільки ресурсів, скільки потрібно для обробки запитів без перевантаження, але без надлишку, щоб уникнути простоїв. Таким чином, управління мережевими ресурсами зводиться до розв'язання оптимізаційної задачі з визначення необхідного обсягу обчислювальних ресурсів для кожного віртуального пристрою.

У [21, 22] для управління такими мережами як вхідні дані використовуються як актуальні, так і прогнозовані дані. Проте, цей підхід має свої обмеження, адже дані, отримані в реальному часі, можуть швидко застарівати, що не дозволяє точно враховувати поточні потреби мережі.

Тому виникає необхідність розробки моделі інтелектуального управління мережевими ресурсами у літаючих мережах із підтримкою SDN і NFV. Така модель, на відміну від існуючих, повинна забезпечувати динамічний розподіл ресурсів залежно від поточних потреб мережі, враховуючи можливі незначні розбіжності між отриманими даними та реальними потребами. Крім того, вона повинна бути стійкою до дестабілізуючих факторів як зовнішнього, так і внутрішнього характеру. Додатково варто дослідити ефективність запропонованої моделі шляхом її тестування на змодельованій мережі зв'язку.

4.2. Аспекти методики моделювання

Результати досліджень, представлені у цьому підрозділі, можна резюмувати так:

1. Створено імітаційна модель літаючої мережі з підтримкою SDN та NFV для об'єктів бронетанкової техніки для отримання навчального набору даних та змодельовано мережеву систему за допомогою MATLAB.

При виконані першого пункту процесу моделювання було побудовано модель системи, використовуючи блоки бібліотеки Simulink, встановлено необхідні параметри системи та вхідних впливів, організовано потік заявок у системі за допомогою пакету Matlab. Імітаційна модель показана на рис. 3.

При часі моделювання 50 маємо: 38 згенерованих заявок, 1 у сервері на обробці, 1 у черзі в другому каналі (рис. 4 та рис. 5).

2. Після збору, аналізу та обробки набору даних цей набір був використаний як вхідні дані для моделі керування мережевими ресурсами на основі адаптивної системи нейро-нечіткого виводу ANFIS. Після завантаження набору даних, отриманих на першому етапі, як вхідні дані для мережі набір даних ділиться на два підмножини в стовпцях Вхід (I) і Вихід (O), а потім відповідно ділиться на підмножини навчання, тестування та перевірки. Нормалізація вхідних даних здійснюється в інтервалі [–1, 1], сумісному з фактичними максимальними або мінімальними значеннями (рис. 6 та 7).

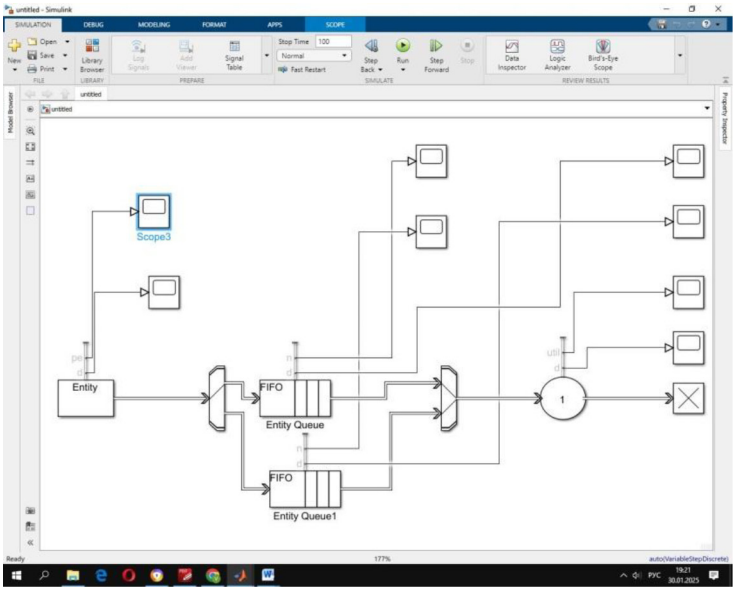


Рис. 3. Вид імітаційної моделі пункту 1

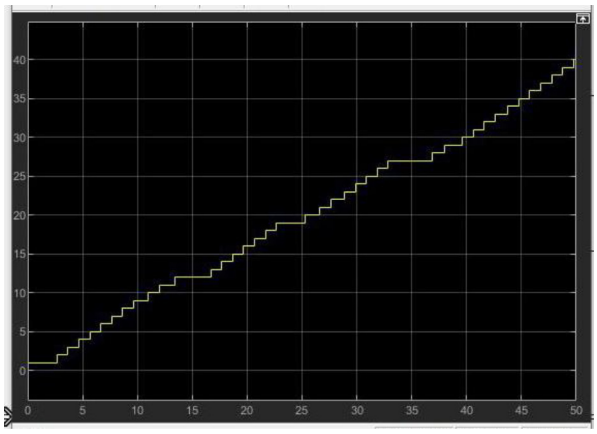


Рис. 4. Кількість згенерованих заявок

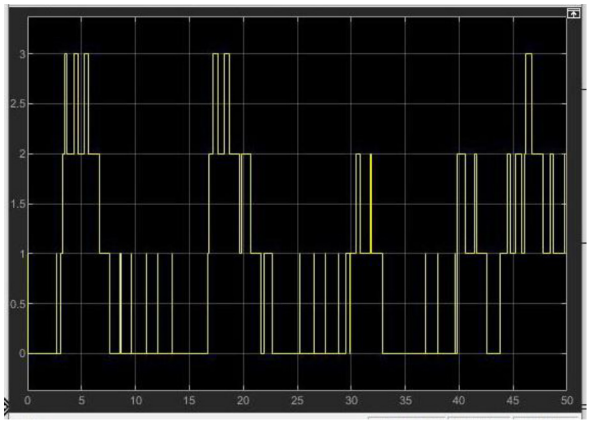


Рис. 5. Графік заявок у першій черзі

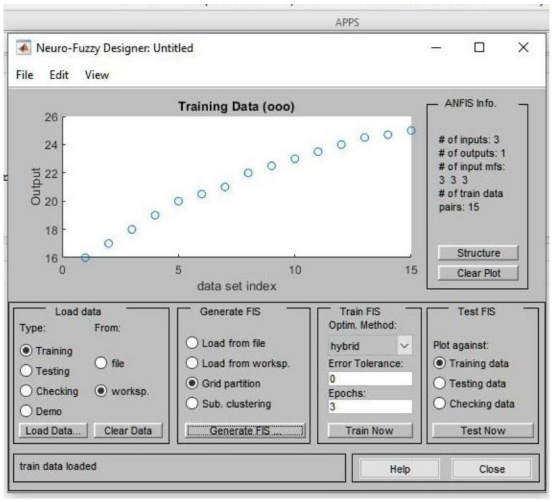
Таким чином, для вирішення поставленого завдання в роботі пропонується використання нейромережевих методів, методів нечіткої логіки та імітаційного моделювання. Основу концептуальної моделі управління мережевими ресурсами складатиме адаптивна система нейронечіткого виводу (adaptive neuro-fuzzy inference system, ANFIS) (Jang, 1993). Ця система поєднує принципи нейронних мереж та нечіткої логіки, що дозволяє об'єднати переваги обох підходів. Завдяки використанню принципів нейронних мереж система здатна навчатися на основі отриманих даних та адаптуватися до змін потреб мережі. У свою чергу, застосування нечіткої логіки дозволяє розглядати вхідні дані як нечіткі величини, що, ймовірно, знижує чутливість моделі до незначних розбіжностей між фактичними даними та вимогами мережі. На вхід моделі подаватимуться дані про кількість запитів від кінцевих пристроїв, а на виході визначатиметься необхідний обсяг обчислювальних ресурсів для віртуального маршрутизатора. Для перевірки ефективності моделі буде проводитися моделювання мережі зв'язку та тестування моделі в середовищі MATLAB.

3. За результатами моделювання в усіх випадках віртуальні маршрутизатори зможуть обробити запити без перевантажень та затримок, а також мають деяку кількість додаткової обчислювальної можливості.

Висновки.

1. В роботі наведено архітектуру мережі БПЛА з інтеграцією технології програмно-конфігурованих мереж, в якій як комутатори SDN виступають окремі БПЛА, а як контролери SDN – прив'язані БПЛА, що відносяться до літаючого сегменту мережі та мають здатність взаємодіяти між собою.

2. Наведено архітектуру елементу даної системи – прив'язної висотної телекомунікаційної платформи, що складається з повітряного та наземного модулів, які пов'язані між собою



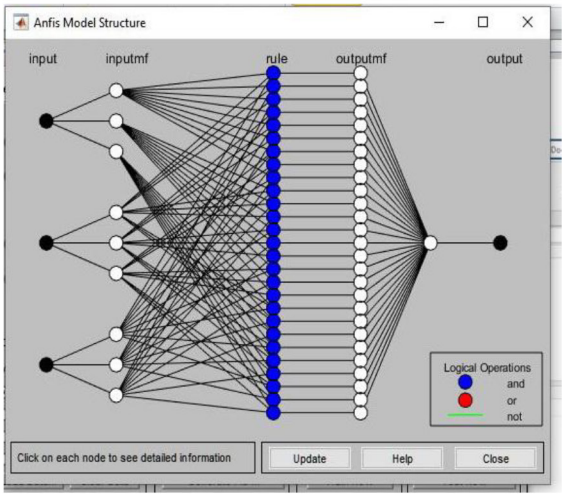


Рис. 6 (зліва). Графічний інтерфейс редактора ANFIS після загрузки навчальних даних та Рис. 7 (праворуч). Структура згенерованої нейро-нечіткої мережі

гнучким з'єднанням у вигляді кабелю-троса. Цей кабель забезпечує як механічне, так і інформаційне з'єднання між модулями об'єктів бронетанкової техніки.

3. Наведено методику моделювання літаючої мережі з підтримкою SDN/NFV технологій в програмному середовищі Matlab для управління мережевими ресурсами з визначення необхідного обсягу обчислювальних ресурсів для кожного віртуального пристрою з метою рішення цільових задач спеціального призначення.

Список літератури:

1. Зінченко М. О., Сайко В. Г., Комаров В. О. Щодо питання вирішення проблем спостереження екіпажем танка за полем бою в умовах бойових дій. *Сучасні аспекти модернізації науки: стан, проблеми, тенденції розвитку: Матеріали LIII-ої міжнародної науково-практичної конференції*. м. Кордова (Іспанія): 7 лютого 2025 року. С. 219–224.

2. Зінченко М. О., Сайко В. Г., Комаров В. О. Пропозиції щодо побудови перспективної мережевої інфраструктури об'єктів бронетанкової техніки в умовах бойових дій. *Грааль науки: міжн. Науковий журнал. – Вінниця: ГО «Европейська наукова платформа» НУ «Інститут науково-технічної інтеграціх та співпраці»*. 2025. № 49. 1298/572–589 с.

3. Безпілотна авіація у військовій справі: колективна монографія / Мосов С. П., Погорецький М. В., Салій С. М. та інш. Київ : Інтерсевіс, 2019. 324 с.

4. Бернацький А. П. Основи робототехніки військового призначення. Київ : Видавництво Ліра-К, 2024. 500 с.

5. T. Dapper, C. F. E. de Melo, P. Cumino, D. Rosário, E. Cerqueira, and E. P. de Freitas. STFANET: SDN-based Topology Management for Flying Ad Hoc Network. *IEEE Access*. 2019.

6. F. Al-Turjman, M. Abujubbeh, A. Malekloo, and L. Mostarda. UAVs assessment in software-defined IoT networks: An overview. *Computer Communications*. 2019.

7. A. Ramaprasath, A. Srinivasan, C.-H. Lung, and M. St-Hilaire. Intelligent wireless ad hoc routing protocol and controller for UAV networks. *Ad Hoc Networks. Springer*. 2017. pp. 92–104.

8. W. Qi, Q. Song, X. Kong, and L. Guo. A traffic-differentiated routing algorithm in Flying Ad Hoc Sensor Networks with SDN cluster controllers. *Journal of the Franklin Institute*. 2017.

9. A. T. Albu-Salih, S. A. H. Seno, and S. J. Mohammed. Dynamic Routing Method over Hybrid SDN for Flying Ad Hoc Networks. *Baghdad Science Journal*. 2018.vol. 15, no. 3, pp. 361–368.

10. G. Secinti, P. B. Darian, B. Canberk, and K. R. Chowdhury. Resilient end-to-end connectivity for software defined unmanned aerial vehicular networks. *Proceedings of the IEEE 28th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications (PIMRC)*. IEEE, 2017. pp. 1–5.

11. Z. Yuan, X. Huang, L. Sun, and J. Jin. Software defined mobile sensor network for micro UAV swarm. *Proceedings of the IEEE International Conference on Control and Robotics Engineering (ICCRE)*. IEEE, 2016. pp. 1–4.

12. Saiko, V., Fomin, M., Nakonechnyi, V., Toliupa, S., Brailovskyi, M. A Method for Determining the Location of a Low-Flying Air Object under Conditions of Multipath Propagation of Radio Waves. *Conference Proceedings –*

2024 IEEE 17th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering, TCSET 2024. 2024. Pp. 302–307.

13. Volodymyr Saiko; Roman Odarchenko; Bogdan Zhurakovskyi; Maryna Yevdokymenko; Vladyslav Fesenko; Olena Tkachova. A Model for Building a Wireless Terahertz Network for 5G NR. *Proceedings of the IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications, IDAACS. 2023*. Pp. 1071–1076.

14. Патент України на корисну модель № 150433. Спосіб бездротової підзарядки джерела бортового живлення безпілотного літального апарату. Сайко В. Г., Домрачев В. М., Наритник Т. М., Гнатієнко Г. М., Тмєнова Н. П. / Заявник і патентовласник КНУ імені Тараса Шевченка; дата публікації 16.02.2022 р. Бюл. № 7 з пріоритетом від 17.02.2022 р.

15. Yan, Z.; Zhang, P. and Vasilakos, A. V. A security and trust framework for virtualized networks and software-defined networking. *Security and communication networks*. 2016. Vol. 9. No. 16. pp. 3059–3069.

16. Ojo, M.; Adami, D. and Giordano, S. A SDN-IoT architecture with NFV implementation. *Proceedings of the IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*. IEEE. 2016. pp. 1–6.

17. Патент України на корисну модель № 157427. Спосіб визначення місцезнаходження низько літаючого повітряного об'єкту за умов багатопроменевого поширення радіохвиль. Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О., Коломійцев О. В., Скляров О. В., Наритник Т. М., Фомін М. М., Нестеренко І. К., Гримуд А. Г. дата публікації 16.10.2024. Бюл. № 42.

18. Безпілотні летальні апарати: Методика наближених розрахунків основних параметрів та характеристик. За загальною ред. В. І. Силкова. К. : ЦНДІ ЗС України, 2009. 302 с.

19. Патент України на корисну модель № 157902. Ударний дистанційно керований безпілотний літальний аппарат. Заявник і патентовласник Сайко В. Г., Радзівілов Г. Д., Комаров В. О., Коломійцев О. В., Зінченко М. О., Яковчук О. В. дата публікації 11.12.2024. Бюл. № 50.

20. Палагін, В., Євтушенко, І., Гожий, О. Віртуалізація як середовище реалізації мережевих функцій. *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2021. № 2. 31–38.

21. Скулиш, М., Суліма, С. Керування ресурсами для віртуалізованих мережевих функцій. *Наукоємні технології оптимізації та керування в інфокомунікаційних мережах*: Колективна монографія. 2019. С. 97–126.

22. Суліма, С., Скулиш, М. Гібридна система управління ресурсами для віртуалізованих мережевих функцій. *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. 2017. № 1.

23. Міноборони показало українські FPV-дрони на оптоволокні. Електронний ресурс. URL: https://www.unian.ua/weapons/optovolokno-minoboroni-pokazalo-novi-fpv-droni-12871632.html. (дата звернення 01.02.2025).

Saiko V. G., Zinchenko M. O., Komarov V. O., Solodovnyk V. I., Kryvolapov Ya. V., Kryvolapov H. Ya.

MODEL OF AN INTEGRATED NETWORK COMMUNICATION COMPLEX USING UAVS TO INCREASE THE EFFICIENCY OF SOLVING SPECIAL PURPOSE TARGETED TASKS

The integration of unmanned aerial vehicles (UAVs) into the combat control system opens up new opportunities for improving military tactics. Due to their versatility and efficiency, UAVs can become an indispensable tool in modern combat conditions, helping to improve coordination between mechanized units and increase the overall combat capability of troops. The use of UAVs significantly expands the capabilities of the armed forces, providing a high level of control and access to information on the battlefield. The paper presents the results of developing a network model using UAVs, where elements of software-defined networks (SDN) are fully implemented on the basis of UAVs. This is aimed at increasing the efficiency of task performance by armored units. A network architecture is proposed that includes the integration of SDN technologies, in which individual UAVs perform the functions of SDN switches, and control is carried out by tethered UAVs that belong to the air segment of the network and are able to interact with each other. The following division into clusters is defined within this UAV architecture: each cluster has a main node through which communication with other clusters is carried out. The infrastructure of the complex also provides for the presence of a tethered high-altitude telecommunications platform consisting of ground and air modules connected by a cable-rope, which provides both mechanical communication and information transfer between modules [23]. In addition, a methodology for modeling a network based on UAVs with support for SDN/NFV technologies in the Matlab environment is presented, which allows optimizing network resource management and the required amount of computing power for each virtual device performing specialized tasks.

Key words: *UAV, SDN/NFV technology, mobile networks, tethered high-altitude telecommunications platform.*

УДК 621.396.4
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/21

Сайко В. Г.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В. О.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Гетьман А. В.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Мусієнко В. А.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Колодійчук Л. В.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Станілога О. О.
Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТРУКТУРИ ЦІЛЬОВОГО СИГНАЛУ ВИЯВЛЕННЯ ЧАСТОТНИХ КАНАЛІВ У КОГНІТИВНИХ РАДІОМЕРЕЖАХ СПЕЦІАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Одним із важливих науково-технічних завдань військових фахівців-зв'язківців є впровадження когнітивних радіомереж у військових операціях. Це особливо актуально під час виявлення та аналізу хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних загроз, управління військами, оцінки бойових втрат, розвідки, спостереження за полем бою та наведення на цілі. Когнітивний радіозв'язок забезпечує безперервний моніторинг радіосередовища та оновлення бази знань для мінімізації завад. Його ефективність значною мірою залежить від точності алгоритмів визначення вільних каналів та управління спектральними ресурсами. При цьому основною проблемою впровадження когнітивного радіо в силових структурах є створення високоточних пристроїв для аналізу спектра та розробка алгоритмів обміну інформацією між вузлами мережі. Важливим аспектом також є оцінка ефективності цих рішень для забезпечення надійного моніторингу частотного спектра в спеціалізованих когнітивних радіосистемах. Паралельно для рішення задач силовими структурами спеціального призначення активно впроваджується технологія зв'язку та управління спеціалізованими БПЛА через інфраструктуру операторів стільникового зв'язку стандартів 4G LTE/5G. Це пояснюється широким покриттям, поширеністю та простотою підключення до мережі.

В статті досліджено запропоновану модель для когнітивних радіомереж, яка дозволяє розпізнавати сигнали стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок радіосигналів, записаних у середовищі MatLab. Розглянуто загальну характеристику технології когнітивного радіозв'язку, проаналізовано перспективи та виклики його застосування в силових структурах спеціального призначення. Також проведено експериментальне дослідження роботи приймача когнітивного радіо під час аналізу структури сигналів NR та LTE з використанням нейромережевих методів та глибокого навчання у середовищі MatLab.

Ключові слова: *сигнали стандартів NR та LTE, нейромережеві методи, когнітивні радіомережі спеціального призначення.*

Постановка проблеми. 1.1. Загальна характеристика технології когнітивного радіозв'язку.

Технології когнітивного радіозв'язку можуть застосовуватися для налаштування з'єднань між терміналами та різними радіосистемами, операторами зв'язку, що сприяє ефективнішому управлінню доступним радіочастотним спектром [1, 2]. Вони слугують інструментом як для колективного використання частот, так і для організації гнучкого доступу до них. Системи когнітивного радіозв'язку включають різноманітні технології радіодоступу, а самоналаштовувані мережі з різ-

ними топологіями забезпечують їх використання відповідно до локальної доступності спектра. Для цього необхідно визначати розташування та характеристики інших технологій у межах доступної смуги частот, а також сканувати весь діапазон, щоб оцінити локальне навантаження.

Когнітивне радіо поділяється на два основні типи:

- **Повне когнітивне радіо (Mitola radio)**, яке враховує всі можливі параметри бездротового вузла чи мережі.
- **Когнітивне радіо з виявленням спектра**, що аналізує виключно радіочастотний спектр.

Також існує кілька варіантів використання когнітивного радіо залежно від доступності частот:

- **Licensed-Band Cognitive Radio** – працює в ліцензованих діапазонах, за винятком неліцензованих зон (наприклад, U-NII або ISM). Робоча група IEEE 802.22 розробила стандарт для бездротових регіональних мереж (WRAN), які функціонуватимуть у незадіяних телевізійних каналах (так звані «білі простори») [3].
- **Когнітивне радіо без ліцензії** – використовує виключно неліцензовані частини спектра, як це передбачено у специфікаціях IEEE 802.15 Task Group 2, що регламентує співіснування IEEE 802.11 та Bluetooth [4, 5].

До ключових функцій когнітивного радіозв'язку належать [6, 7]:

- **Мобільність спектра** – зміна частоти роботи відповідно до умов, що дозволяє оптимально використовувати доступні ресурси та забезпечувати безперебійний зв'язок.
- **Спільне використання спектра** – дозволяє когнітивним користувачам використовувати смуги частот, виділені для ліцензованих користувачів, при цьому дотримуючись обмежень щодо рівня випромінювання.
- **Спільне використання спектра на основі зондування** – когнітивні пристрої спочатку аналізують активність у частотних діапазонах і лише за відсутності ліцензованих користувачів можуть здійснювати передачу.
- **Спільне використання спектра через базу даних** – передбачає, що пристрої повинні отримати дозвіл на використання частот, керуючись інформацією з бази даних «білих просторів», яка прогнозує рівень завад і визначає можливість доступу.

Ці підходи дозволяють когнітивному радіозв'язку динамічно адаптуватися до змін у спектральному середовищі та сприяють раціональному використанню частотних ресурсів.

1.2. Перспективи та виклики застосування когнітивного радіо в силових структурах спеціального призначення.

Одним із ключових науково-технічних завдань військових фахівців-зв'язківців є впровадження когнітивних радіомереж у військових операціях, зокрема під час виявлення та аналізу хімічних, біологічних, радіологічних і ядерних загроз, управління військами, оцінки бойових втрат, спостереження за полем бою, розвідки та наведення на цілі.

Для реалізації таких завдань необхідно враховувати наступні аспекти:

1. Сумісність із наявними системами спеціального радіозв'язку. У силових підрозділах спеціального призначення експлуатуються різні бездротові системи та засоби зв'язку, часто несумісні між собою. Ці радіозасоби мають різні робочі частоти, потужність передачі, методи модуляції і т. д. і не можуть забезпечити взаємозв'язок та інтероперабельність, що стало важливим фактором, що обмежує спільні дії Збройних сил. Незалежно завантажуючи різне програмне забезпечення, когнітивне радіо може зв'язуватися як з короткохвильовими радіостанціями, так і з ультракороткохвильовими радіостанціями і навіть із супутниками. Саме тому, що когнітивний радіозв'язок може автономно вивчати мережеві комунікаційні протоколи та служби. Однією з переваг когнітивного радіо є можливість поступового впровадження новітніх технологій без необхідності одномоментної заміни всіх радіозасобів. Завдяки можливості програмної та апаратної реконфігурації когнітивне радіо здатне взаємодіяти з попередніми поколіннями систем радіозв'язку. Але з іншого боку, когнітивний радіозв'язок породжує унікальні завдання, що виникають внаслідок їх співіснування з іншими мережами, а також через існування різних вимог до якості обслуговування (QoS), що пред'являються різними додатками відповідних радіомереж. Тому, необхідні нові інноваційні функції управління радіочастотним спектром для когнітивних радіомереж спеціального призначення.

2. Необхідність підвищення ефективності керування використанням спектру. Управління спектром на полі бою є дуже важливою темою і військові всіх країн надають великого значення дослідженню цього питання. Однак в більшості виділення спектра на полі бою переважно здійснюється як виділення фіксованих частот. З одного боку, така схема розподілу не лише призводить до низького використання ресурсів спектру, але

й легко викликає електромагнітні завади всередині системи або між іншими системами; з іншого боку, ця схема розподілу вимагає багато часу планування спектра на початок битви. Крім того, одного разу певна частота зв'язку не може бути змінена, що б не відбувалося в бойовому стані, тому що в сучасних бойових діях, де ситуація на полі бою швидко змінюється, схема виділення фіксованого спектру затримує бойові частини. Когнітивний радіозв'язок може відчувати електромагнітну обстановку поля бою у тому районі, де він знаходиться, та автоматично визначати наявність необхідної смуги пропускання та спектру. Таким чином, виділення ресурсів спектра може бути виконано швидко за допомогою когнітивного радіозв'язку, а частота зв'язку може автоматично регулюватися в процесі зв'язку. Це не тільки підвищує швидкість роботи в мережі, а й покращує електромагнітну сумісність усієї системи зв'язку.

3. Необхідність поліпшити завадозахищеність системи спеціального радіозв'язку. Завадостійкість є важливим показником для засобів зв'язку в умовах сучасної війни, а також важливою гарантією перемоги у війні. Традиційні технології завадостійкості у каналі в основному включають розширений спектр, стрибкоподібну перебудову частоти, стрибкоподібну перебудову в часі та споріднені технології, похідні від них [8, 9, 10]. Когнітивний радіозв'язок не тільки має вищезгадану здатність протидії завадам, але також зменшує рівень завад, регулюючи напрямок променя завдяки використанню технології визначення положення у поєднанні з технологією MIMO, також може знизити потужність передачі і поліпшити здатність до захисту від перехоплення. Когнітивне радіо має розширені можливості машинного навчання, які можуть вивчати та аналізувати завади, щоб вибирати відповідні стратегії захисту від завад (вибір відповідного каналу зв'язку, методу модуляції, потужності передачі, шаблону стрибкоподібної перебудови частоти тощо) для активного уникати завад.

4. Адаптація до змінних умов середовища. У процесі пересування силових підрозділів виникають «мертві зони» через природні перешкоди, такі як тунелі або гірська місцевість. Когнітивне радіо дозволяє коригувати параметри роботи відповідно до змін довкілля, а також ефективніше розподіляти частотний ресурс та потужність передавачів. Крім того, система забезпечує можливість зв'язку командного центру з тимчасовими дислокаціями при затримках у русі, збоях зв'язку або зміні складу підрозділу.

5. Використання інтелектуальних антенних решіток. Подальший розвиток когнітивного радіо передбачає активне застосування інтелектуальних антенних систем, зокрема технології MIMO, яка є основою зв'язку четвертого та п'ятого поколінь (4G/5G). Однак, розміщення антенних решіток на мобільних об'єктах спеціального призначення може бути обмеженим. У таких випадках перспективними є кооперативні антенні системи MIMO (CO-MIMO), що об'єднують антени кількох користувачів у єдину віртуальну антену для спільного радіообміну. Такі системи є економічно вигідними, оскільки підтримують різні стандарти зв'язку та здатні працювати в широкому діапазоні частот (від 2 МГц до 2,5 ГГц). Подальше впровадження когнітивного радіо може зменшити кількість необхідних антен у військових мережах, оптимізувати використання частотного ресурсу і, як наслідок, знизити рівень електромагнітного випромінювання, що позитивно вплине на здоров'я військових і довкілля.

6. Структура когнітивного радіо та його функціонування. Когнітивне радіо складається з кількох підсистем [11]:

- Моніторинг спектра в реальному часі дозволяє виявляти вільні частотні ділянки («білі плями») та часові проміжки, доступні для передачі даних.
- Система навчання аналізує отриману інформацію для подальшого ухвалення рішень.
- Підсистема прийняття рішень прогнозує зашумленість каналу, оцінює швидкість руху об'єкта та можливість встановлення зв'язку на необхідній частоті, що забезпечує передачу сигналів без взаємних завад.

Для запобігання завадам когнітивне радіо здійснює постійний моніторинг радіосередовища та оновлює базу знань. Ефективність таких мереж значною мірою залежить від точності алгоритмів визначення незайнятих каналів та управління спектральними ресурсами.

Основною проблемою впровадження когнітивного радіо в силових структурах є розробка високоточних пристроїв для аналізу спектра, а також алгоритмів обміну інформацією між вузлами. Важливо оцінити ефективність цих рішень для забезпечення надійного моніторингу частотного спектра в спеціалізованих когнітивних радіосистемах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. ***Методи зондування спектра.*** Методи спектрального зондування можна класифікувати на три основні категорії:

1. Виявлення передавача

Когнітивні радіостанції повинні мати можливість визначати, чи присутній сигнал основного передавача у певному спектрі. Для цього використовуються різні методи:

• **Виявлення за допомогою узгодженого фільтра [11].**

• **Метод енергетичного виявлення [11, 12].** Цей метод оцінює наявність або відсутність сигналу шляхом вимірювання потужності отриманого сигналу. Він є простим у реалізації, однак потребує точної інформації про рівень шуму. Недосконале визначення потужності шуму може спричинити ефект *стіни SNR*, при якому за певного рівня співвідношення сигнал/шум (SNR) неможливо надійно виявити переданий сигнал, навіть збільшуючи час спостереження. Встановлено, що цей ефект спричинений не самою невизначеністю шуму, а недостатньою точністю оцінки його потужності.

• **Циклостаціонарний метод виявлення [11].** Базується на тому, що більшість штучних сигналів зв'язку (BPSK, QPSK, AM, OFDM тощо) мають циклостаціонарні характеристики, тоді як шумові сигнали (наприклад, білий шум) такими характеристиками не володіють. Цей метод дозволяє ефективно розпізнавати сигнали, замасковані шумом, та є стійким до змін дисперсії шуму. Циклостаціонарні детектори можуть працювати в одноцикловому або багатоцикловому режимі.

2. Широкосмугове зондування спектра

Передбачає аналіз великої спектральної смуги (сотні мегагерц або навіть кілька гігагерц). Оскільки сучасні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) мають обмеження щодо частоти дискретизації при високій роздільній здатності, для реалізації цього методу застосовують новітні підходи, зокрема компресійне вимірювання та суб-Найквістову дискретизацію.

3. Спільне виявлення

Цей метод передбачає об'єднання даних від кількох користувачів когнітивного радіо для покращення виявлення основним користувачем.

Методи виявлення на основі завад

• **CR на основі нульового простору.** Використовуючи багатоканальні антени, когнітивне радіо може визначати *нульовий простір* основного користувача і передавати сигнали саме в цьому просторі, мінімізуючи взаємні завади.

Керування спектром

Когнітивне радіо повинно ефективно використовувати спектр, вибираючи найоптимальніші доступні частоти для забезпечення якісного зв'язку без створення завад для основних користувачів. Функції керування спектром включають:

• **Аналіз спектра** – оцінка доступних частотних діапазонів та їх стану.

• **Прийняття рішень щодо використання спектра** – вибір найкращої смуги частот відповідно до вимог якості обслуговування.

Таким чином, ефективне зондування спектра та управління його ресурсами є ключовими факторами у впровадженні когнітивного радіо.

Постановка завдання. На даний момент активно розвивається технологія забезпечення зв'язку та управління БПЛА спеціального призначення з використанням наявної інфраструктури операторів стільникового зв'язку стандартів 4G LTE/5G через його поширеність, широке покриття територій та легке підключення до мережі. Подібний спосіб управління БПЛА вже був протестований багатьма закордонними операторами, наприклад AT&T, Telefonica, Vodafone тощо.

При цьому кожен несанкціонований БПЛА, який передає дані в процесі польоту, визначається як абонентський термінал, що використовує ідентичні звичайному абонентському устройству (стільниковому телефону) принципи роботи, тобто володіє SIM-карткою або eSIM і працює відповідно до стандартів LTE, визначених організацією.

Для виявлення несанкціонованих БПЛА, які під час польоту передають дані бездротовим каналом зв'язку, як це робить стандартний термінал LTE (наприклад, мобільний телефон), пропонується метод виявлення на базі керуючих сигналів LTE, випромінюваних самим БПЛА в процесі польоту. Але для цього необхідно розробити інноваційні алгоритми прийому та аналізу сигналів взаємодії між базовою станцією та абонентом мереж 4G LTE для подальшого використання в системах когнітивного радіозв'язку.

Метою роботи є дослідження моделей і алгоритмів для когнітивних радіомереж, що забезпечують розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок радіосигналів, отриманих із попередньо записаних сигналів цих стандартів у середовищі MatLab. Крім того, передбачено проведення експериментальної перевірки роботи приймача когнітивного радіо під час аналізу структури цільового сигналу NR та LTE з використанням нейромережевих підходів і методів глибокого навчання.

Особливістю даного процесу є те, що при цьому створюються зображення спектрограм із сигналів заданої смуги частот. З отриманого зображення

спектрограми генеруються зображення RGB (аббр. від англ. Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій) роздільною здатністю 128×128 пікселів, що дозволяє розмістити в пам'яті досить великий пакет зображень під час навчання, забезпечуючи при цьому досить точне уявлення за часом та частотою.

Виклад основного матеріалу дослідження. Методичні аспекти визначення спектра сигналів NR (5G New Radio) та LTE (Long-Term Evolution) з використанням глибокого навчання.

Загальні зауваження. Визначення спектра сигналів NR (5G New Radio) та LTE (Long-Term Evolution) з використанням глибокого навчання у MATLAB у контексті семантичної сегментації включає кілька ключових етапів, від збору даних до навчання та розгортання моделі. Цей процес поєднує обробку сигналів, вилучення ознак та класифікацію із застосуванням нейромережевих моделей.

Процес отримання інформації про канали вручну є складним і потребує глибоких експертних знань. Але для спрощення доцільно використовувати глибокі нейронні мережі у поєднанні з програмним середовищем MatLab, що дозволяє аналізувати частотний ресурс та оцінювати його поточну зайнятість. В статті здійснюється моделювання процесу розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE у визначених діапазонах спектра, а також розглядається навчання мережі семантичної сегментації для їх ідентифікації у широкосмугових спектрограмах.

Мережа семантичної сегментації проходить навчання на великих наборах даних у рамках штучної нейронної мережі для моніторингу спектру. В процесі навчання застосовується технологія комп'ютерного зору, що використовує семантичну сегментацію для обробки бездротових сигналів, ідентифікації об'єктів та визначення їх розташування на спектрограмі. Семантична сегментація, яка передбачає поділ зображення на окремі групи пікселів, використовується для аналізу спектрального складу широкосмугової спектрограми.

Однією з ключових переваг бездротових сигналів у сфері глибокого навчання є можливість їх попереднього формування із заданим рівнем шуму у середовищі моделювання MatLab [13]. Також існують моделі спотворень каналів та радіочастот, що дозволяють автоматично генерувати сигнали 5G NR за допомогою 5G Toolbox [14] та сигнали LTE за допомогою LTE Toolbox [15], усуваючи потребу у ручному маркуванні. Ці сигнали можуть бути передані через стандартні моделі каналів для створення навчальних даних. Перед початком навчання мережі семантичної сегментації необхідно сформувати відповідний набір навчальних даних. У подальшому розглядаються особливості процесу моделювання відповідно до [14, 15, 16].

1. Підготовка даних

1.1. Збір та генерація даних

У MATLAB можна отримати дані NR та LTE двома способами:

- Симуляція сигналів за допомогою 5G Toolbox та LTE Toolbox.
- Захоплення реальних сигналів через програмно-визначувані радіосистеми (SDR), такі як USRP або RTL-SDR.

1.2. Перетворення сигналів у зображення (спектрограми)

Для семантичної сегментації необхідно подати сигнали як зображення. Для цього застосовуються методи спектрального аналізу:

- Короткочасне перетворення Фур'є (STFT).
- Вейвлет-перетворення (CWT).
- Перетворення Чірпа (Chirp Transform).

Навчальні дані представлені сигналами із заданими параметрами, які поділяються на кадри. Кожен кадр триває 40 мс і включає 40 субкадрів. Передбачається, що сигнал 5G NR або LTE займає постійну смугу частот протягом усього часу кадру. Для оцінки продуктивності мережі генеруються кадри, у яких сигнали 5G NR та LTE розташовуються у випадкових смугах у межах заданого частотного діапазону. Частота дискретизації становить 61,44 МГц, що забезпечує достатню точність обробки більшості сигналів. У разі необхідності моніторингу ширшого спектра частота дискретизації може бути збільшена з повторним формуванням навчальних кадрів і перенавчанням мережі.

У середовищі MatLab навчальні дані створюються за допомогою функції *helperSpecSenseTrainingData*, яка використовує *helperSpecSenseNRSignal* для генерації сигналів 5G NR і *helperSpecSenseLTESignal* для сигналів LTE. Відповідні параметри для сигналу 5G NR наведені в таблиці 1, а для сигналу LTE – у таблиці 2. Для моделювання спотворень у каналі застосовуються функції *nrCDLChannel* та *LteFadingChannel*, параметри яких представлені в таблиці 3.

Генерація спектрограм здійснюється за допомогою функції *helperSpecSenseSpectrogramImage*, що використовує швидке перетворення Фур'є довжиною 4096 відліків. З отриманої спектро-

Таблиця 1

Змінні параметри сигналів 5G NR

Параметри 5G NR	Значення	Величина
Смуга пропускання	[10 15 20 25 30 40 50]	МГц
Відстань між піднесучими	[15 30]	кГц
Шаблон блоку SSB	[«Випадок A» «Випадок B»]	
Період SSB	[20]	мс

Таблиця 2

Змінні параметри сигналів LTE

Параметри LTE	Значення	Величина
Опорний канал	[«R.2», «R.6», «R.8», «R.9»]	
Смуга пропускання	[10 5 15 20]	МГц
Тип дуплексу	FDD	

Таблиця 3

Змінні параметри каналу

Параметри каналу	Значення	Величина
Смуга пропускання	[0 40]	дБ
Тип дуплексу	[0 500]	Гц

грами створюються RGB-зображення (Red, Green, Blue – червоний, зелений, синій) з роздільною здатністю 128 × 128 пікселів, що забезпечує збереження великого обсягу даних під час навчання та високу точність представлення інформації у часово-частотній області.

Функція *helperSpecSenseTrainingData* також дозволяє завантажувати навчальні дані зі сховища MatLab, які містять три набори сигналів:

1. 5G NR;
2. LTE;
3. комбіновані 5G NR та LTE.

Кожен набір містить 900 кадрів, необхідних для навчання глибокої нейронної мережі семантичної сегментації. Використовуються RGB-зображення з роздільною здатністю 128 × 128 пікселів для навчання мережі з нуля, а зображення 256 × 256 пікселів – для трансферного навчання на попередньо навчених мережах семантичної сегментації.

Завантажені навчальні дані містять як промарковані LTE та NR-сигнали, так і невідомі сигнали у визначеному частотному діапазоні. Аналогом тестових даних є сигнали, отримані з реального радіоефіру за допомогою апаратної частини програмно-конфігурованого радіо [17]. Оскільки для навчання використовується нейронна мережа, далі будуть розглянуті особливості моделювання її архітектури.

2. Створення архітектури семантичної сегментації

У MATLAB можна використовувати програмі пакети Deep Learning Toolbox та Computer Vision Toolbox. Найчастіше застосовують Custom, ResNet-50, MobileNet-v2, U-Net, SegNet чи фреймворк DeepLabV3 [18, 19, 20].

2.1. Підготовка розмітки

- Кожній спектрограмі зіставляється маска, де різні частотні області відповідають NR чи LTE.
- Розмітка виконується вручну або за допомогою скрипту.

2.2. Створення моделі

У моделюванні, проведеному відповідно до [14], аналізуються чотири моделі глибоких нейронних мереж:

1. **ResNet-18**;
2. **ResNet-50**;
3. **MobileNet-v2**;
4. **Custom**.

Перші три моделі є згортковими нейронними мережами, попередньо навченими для класифікації зображень за 1000 категоріями об’єктів. Вхідний розмір зображень для цих мереж становить 224 × 224 пікселів. Ключова відмінність між ними – глибина мережі: 18 шарів у ResNet-18, 50 шарів у ResNet-50 і 53 шари у MobileNet-v2.

Для навчання мережі з нуля використовується архітектура Custom, яка працює із зображеннями 128 × 128 пікселів. Під час навчання на основі обраних параметрів завантажуються відповідні навчальні дані. Оскільки у цій роботі розглядаються кадри саме 128 × 128 пікселів, застосовується архітектура Custom.

Завантаження навчальних зображень спектрограм сигналів 5G NR та LTE здійснюється за допомогою функції imageDatastore, яка дозволяє ефективно обробляти великі колекції зображень із диска. Спектрограми представлені у форматі.png. Додатково використовується функція pixelLabelDatastore для завантаження міток пікселів спектрограм. Кожен піксель отримує одну з наступних міток:

- «NR» – сигнал 5G NR,
- «LTE» – сигнал LTE,
- «Noise» – шум,
- «Unknown» – невідомий сигнал.

Файли міток пікселів зберігаються у форматі. hdf.

Для аналізу розподілу класів у навчальному наборі використовується функція countEachLabel, яка підраховує кількість пікселів кожного класу та будує відповідний графік. На рис. 1 показано

графік розподілу пікселів за мітками класів, отриманий у результаті імітаційного моделювання. Він демонструє, що клас «Noise» домінує, тоді як «Unknown» має найменшу частку, що вказує на значний рівень шуму у спектрограмах.

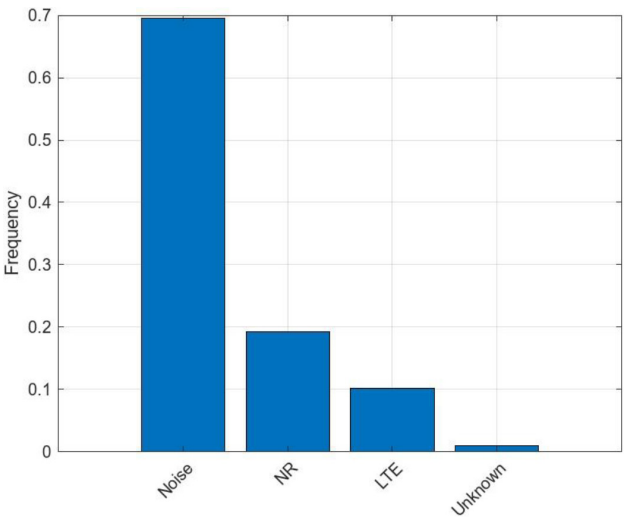


Рис. 1. Розподіл пікселів за мітками класів

У навчальному наборі бездротові сигнали часто розподілені нерівномірно. Сигнали 5G NR можуть мати більшу пропускну здатність, ніж LTE, а шум займає значну частину фонового спектра. Це призводить до дисбалансу класів, що може негативно вплинути на навчання мережі, оскільки модель схильна до переваги домінуючих класів.

Підготовлені дані поділяються на три набори:

- 80 % – для навчання,
- 10 % – для перевірки,
- 10 % – для тестування.

Розподіл даних між наборами здійснюється випадковим чином за допомогою функції helperSpecSensePartitionData, яка поділяє як зображення, так і мітки пікселів відповідно до вказаного співвідношення.

3. Навчання моделі

3.1. Налаштування параметрів

3.2. Запуск навчання

У процесі навчання використовується типовий підхід для мереж семантичної сегментації, що включає поетапне зменшення та збільшення роздільної здатності зображення. Спочатку, між згортковим шаром та шаром випрямної функції лінійної активації (ReLU), відбувається зменшення дозволу вхідного зображення. Функція ReLU виконує нелінійне перетворення, пропускаючи лише позитивні значення: якщо вхідне значення менше або дорівнює нулю, вихід буде також нульовим. Після цього проводиться відновлення вихідного дозволу, щоб відповідати розміру вхідного зображення.

У цьому процесі мережа використовує нелінійні фільтри, які оптимізовані для сегментації певних класів. Спочатку задається вхідний шар, після чого мережа поступово знижує роздільну здатність через згорткові шари та ReLU. Заповнення у згорткових шарах обирається таким чином, щоб вихідний розмір залишався ідентичним вхідному, що полегшує конструювання архітектури, оскільки більшість шарів зберігають однакові розміри на різних етапах обробки.

Зменшення роздільної здатності (downsampling) реалізується за допомогою шару максимального пулінгу, який вибирає максимальне значення у вибірці. Використання шару максимального пулу дозволяє зменшити розмірність вхідних даних удвічі. В результаті, після проходження через кілька таких рівнів, вхідні дані зменшуються у 16 разів.

Збільшення роздільної здатності (upsampling) виконується за допомогою транспонованого згорткового шару (також відомого як шар деконволюції). Використання транспонованої згортки одночасно забезпечує і підвищення роздільної здатності, і фільтрацію.

Фінальний набір шарів відповідає за класифікацію кожного пікселя, забезпечуючи збереження тих самих просторових розмірів (висоти та ширини), що й у вхідного зображення. Вони об’єднуються для передбачення категорії кожного пікселя. Завершальний етап навчання мережі семантичної сегментації включає складання всіх шарів в єдину архітектуру.

Після завершення навчання необхідно оцінити ефективність нейронної мережі.

4. Тестування та розгортання

4.1. Застосування навченої моделі

4.2. Оцінка точності

Для оцінки ефективності розпізнавання сигналів використовуються фрагменти записів, що містять сигнали 5G NR і LTE. Для отримання пікселяних оцінок із зображень спектрограм у тестовому наборі застосовується функція semanticseg, а функція evaluateSemanticSegmentation використовується для обчислення різних метрик, що характеризують якість семантичної сегментації.

На рис. 2 представлена матриця невизначеності, де:

- вісь X відповідає за шукані класи сигналів,
- вісь Y – за розпізнані сигнали,
- по діагоналі вказано відсоток правильно розпізнаних сигналів.

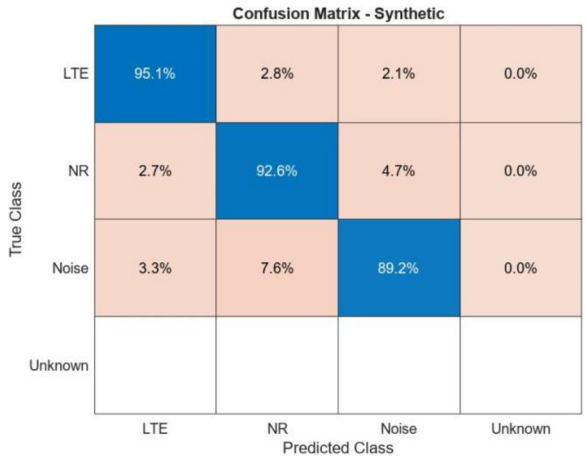


Рис. 2. Матриця невизначеності для всіх тестових кадрів

Далі тестові дані розподіляються на захоплені та згенеровані набори, і процес аналізу повторюється, але вже лише для кадрів із захопленими даними.

Рис. 3 демонструє нормалізовану матрицю невизначеності, яка свідчить, що мережа часто плутає сигнали NR із класами «Noise» або «Unknown». Аналіз перехоплених сигналів показав, що файли з префіксом CF3550 мають низьке відношення сигнал/шум, через що мережа зазнає труднощів із правильною ідентифікацією.

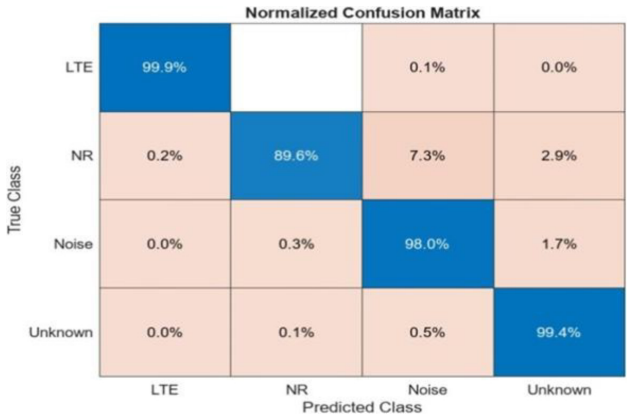


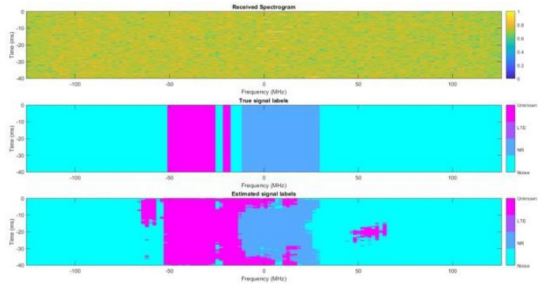
Рис. 3. Нормалізована матриця невизначеності

На рис. 4 наведено результат ідентифікації сигналів 5G NR і LTE у спектрограмі:

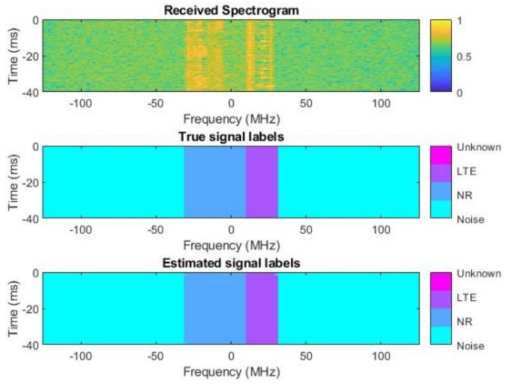
- (*а*) – із урахуванням файлів з префіксом CF3550,
- (*б*) – без урахування цих файлів.

Аналізуючи спектрограму без урахування файлів із префіксом CF3550, можна побачити чітке розмежування сигналів NR та LTE.

Маркерна спектрограма, представлена на рис. 5, показує, що більшу частину смуги частот займає «Noise», а також підтверджує, що ширина частотної смуги NR перевищує LTE.



а



б

Рис. 4. Ідентифікація сигналів 5G NR та LTE у спектрограмі з урахуванням (а) та без урахування (б) назви файлу з префіксом CF3550

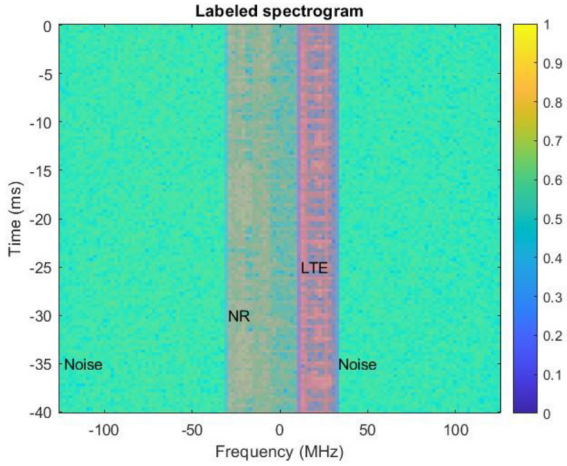


Рис. 5. Маркована спектрограма

На цьому завершується процес аналізу структури сигналів NR та LTE з використанням нейромережевих підходів і методів глибокого навчання.

Висновки.

1. Наведено загальну характеристика технології когнітивного радіозв'язку, перспективи та виклики застосування когнітивного радіо в силових структурах спеціального призначення.

2. Проведено дослідження моделей і алгоритмів, що забезпечують розпізнавання сигналів стандартів NR та LTE на основі аналізу вибірок

радіосигналів, отриманих із попередньо записаних сигналів цих стандартів у середовищі MatLab.

3. Використовуючи MATLAB та глибокі нейромережі, можна автоматично ідентифікувати сигнали NR та LTE на основі їх спектральних характеристик. Семантична сегментація дозволяє локалізувати сигнали в частотній ділянці, що корисно для моніторингу 5G/LTE мереж.

Список літератури:

1. Климаш М.М. Модель оцінки ефективності алгоритмів переключення радіочастотних каналів для вибору спектру у когнітивних радіомережах. *Вісник Національного Університету «Львівська політехніка». Радіоелектроніка та телекомунікації*. 2017. № 880. С. 73–81.

2. Янишин В.Б. Моделі та алгоритми управління радіочастотним спектром в когнітивних радіомережах. НУ «Львівська політехніка». Львів. 2018. 158 с.

3. IEEE Standard – Information Technology-Telecommunications and Infor- mation Exchange between Systems-Wireless Regional Area Networks-Specific Re- quirements-Part 22: Cognitive Wireless RAN MAC and PHY specifications: Policies and Procedures for Operation in the Bands that Allow Spectrum Sharing where the Communications Devices May Opportunistically Operate in the Spectrum of Primary Service. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.22/5896/

4. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. URL: https://standards. ieee.org/ieee/802.15.4/7029/

5. IEEE Standard for Information Technology – Telecommunications and In- formation Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. Specif- ic Requirements. Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications. URL: https://standards.ieee.org/ieee/802.11/5536/

6. Рекомендация МСЭ-R M.2330-0 Когнитивные системы радиосвязи в наземной подвижной службе. 11/2014.

7. Отчет МСЭ-R SM.2256-1. (08/2016). Измерения и оценка занятости спектра.

8. Системи та мережі цифрового радіозв'язку: інженерно-технічний довідник / [Олійник В.Ф., Кривуца В.Г., Сайко В.Г., Булгач С.В.]. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 612 с.

9. Сайко В.Г. Системи бездротового цифрового радіозв'язку нового покоління: Монографія. / В.Г.Сайко. – К. : ПП «Золоті ворота», 2011. – 300 с.

10. Слободянюк П.В., Наритник Т.М., Благодарний В.Г., Сайко В.Г., Булгач В.Л. Теорія і практика управління використанням радіочастотного ресурсу. Навчальний посібник. / за редакцією Кривуци В.Г. К. : ДУІКТ, 2012. – 596 с.

11. Лисечко В.П. Методи та моделі підвищення завадостійкості безпроводових інтелектуальних телекомунікаційних систем на базі складних сигнально-кодових конструкцій. Національний авіаційний університет, 2023. Київ, 350 с.

12. Безрук В.М., Иваненко С.А. Обнаружение незанятых частотных каналов в когнитивных радиосетях. *Радиотехника (Харьков)*. 2017. № 1. С. 4–8.

13. Syed S.N., Lazaridis P.I., Khan F.A., Ahmed Q.Z., Hafeez M. et al. Deep Neural Networks for Spectrum Sensing: A Review / IEEE Access. 2023. Vol. 11. PP. 89591–89615. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3305388 EDN: PUAYON

14. Spectrum Sensing with Deep Learning to Identify 5G and LTE Signals. URL: https://www.mathworks.com/help/comm/ug/spectrum-sensing-with-deep-learning-to- identify-5g-and-lte-signals.html (дата звернення 04.02.2025).

15. 5G Toolbox. URL: https://www.mathworks.com/products/5g.html (дата звернення 04.02.2025).

16. LTE Toolbox. URL: https://www.mathworks.com/products/lte.html (дата звернення 04.02.2025).

17. Бойко Ю.М. Програмно-конфігуровані системи передавання, приймання та обробки інформації: монографія. ХНУ, Хмельницький, 2023. 317 с.

18. resnet18. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet18. html (дата звернення 04.02.2025).

19. resnet50. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet50. html (дата звернення 04.02.2025).

20. mobilenetv. URL: https://www.mathworks.com/help/deeplearning/ref/resnet 50.html (дата звернення 04.02.2025).

Saiko V. G., Komarov V. O., Hetman A. V., Musiienko V. A., Kolodiichuk L. V., Staniloha O. O.

MODEL FOR ESTIMATING THE STRUCTURE OF THE TARGET SIGNAL FOR DETECTION OF FREQUENCY CHANNELS IN COGNITIVE RADIO NETWORKS FOR SPECIAL PURPOSES

One of the important scientific and technical tasks of military communications specialists is the implementation of cognitive radio networks in military operations. This is especially relevant during the detection and analysis of chemical, biological, radiological and nuclear threats, troop management, assessment of combat losses, reconnaissance, battlefield surveillance and target guidance. Cognitive radio communications provide continuous monitoring of the radio environment and updating of the knowledge base to minimize interference. Its effectiveness largely depends on the accuracy of algorithms for determining free channels and managing spectral resources. At the same time, the main problem of implementing cognitive radio in power structures is the creation of high-precision devices for spectrum analysis and the development of algorithms for exchanging information between network nodes. An important aspect is also the assessment of the effectiveness of these solutions for ensuring reliable monitoring of the frequency spectrum in specialized cognitive radio systems. In parallel, to solve the tasks of special-purpose power structures, the technology of communication and control of specialized UAVs through the infrastructure of cellular operators of 4G LTE/5 G standards is being actively implemented. This is explained by the wide coverage, prevalence and ease of connection to the network. The article investigates the proposed model for cognitive radio networks, which allows recognizing signals of the NR and LTE standards based on the analysis of radio signal samples recorded in the MatLab environment. The general characteristics of cognitive radio communication technology are considered, the prospects and challenges of its application in special-purpose power structures are analyzed. An experimental study of the operation of a cognitive radio receiver during the analysis of the structure of NR and LTE signals using neural network methods and deep learning in the MatLab environment is also conducted.

Key words: *NR and LTE standard signals, neural network methods, special-purpose cognitive radio networks.*

UDC 621.373.132
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/22

Semenov A. O.
Vinnytsia National Technical University

Khloba A. A.
Vinnytsia National Technical University

REVIEW OF CIRCUIT SOLUTIONS LEADING TO DETERMINISTIC CHAOS IN OSCILLATORS BASED ON THE VAN DER POL EQUATION

The article is devoted to deterministic chaos generators based on the Van der Pol equation (VDP) and its modified versions. The papers that investigate the nonlinear behavior of the proposed modifications of the VDP equation, in particular, those that lead to chaotic behavior, are considered. Most purely mathematical works are not considered, preferring those that include modeling of the proposed systems of equations using simulators (PSpice, MultiSIM, OrCAD) and building a real prototype on an analog computer. The selected works are divided into three types of equations and generators based on them. The basic equation of VDP with an external signal source (forced) is studied at different signal parameters (shape, amplitude) and circuit modifications (adding passive elements, active filters, changing the number of external signal sources, nonlinear element). It is determined that robots based on the Van der Pol-Duffing equation are characterized by richer nonlinear behavior, even without an external signal source. The ability to control more system parameters leads to the observation of discontinuous oscillations, hyperchaos, and multistability. Both autonomous and non-autonomous versions of the schemes are presented. As the latter type, we study the Bonhoeffer-Van der Pol equation, which comes from the field of neuroscience, chemistry, and electrophysiology of the heart and can be converted into an electrical circuit. These implementations demonstrate interesting nonlinear behavior and deterministic chaos, but in a narrower range of system parameters. It is found that the system is characterized by fast-slow dynamics and has a complex mixed mode of oscillations. The result of the work is a non-exhaustive review of existing deterministic chaos generators based on the VDP equation, the existing gaps in the study of certain types of generators, approaches and methods for their creation, and tools used in their study are clarified. The structuring of existing approaches opens up the possibility of using the features of the above schemes to create completely new mathematical models or improve existing ones for covert information transmission systems.

Key words: *deterministic chaos, chaos generator, forced oscillator, strange attractor, multiscroll attractor, bursting patterns, jerk oscillator, hyperchaos, nonautonomous chaos, computer simulation, PSpice simulations, FPGA, ACRO, VDP, Van der Pol, TOVDP, MVDP, VDPD, MVDPD, BVP, NDR.*

Formulation of the problem. Some of the best known early examples of deterministic chaos from various fields are the Lorenz attractor (1963), Robert May's logic map (1976), Otto Rössler's system of differential equations (1976), and Chua's generator (1983). Such systems are well studied and are widely used both to consider nonlinear phenomena from a mathematical point of view and for applications such as in the field of secure communication [1] and to create various schemes for a chaotic signal generator [2] that can be used as a carrier. However, an earlier manifestation of deterministic chaos is known, discovered, but not realized at the time, in the work of Van der Pol (VDP) and Jan der Mark [3], and re-explored using the scheme only 60 years later [4]. Most of the available works investigating in detail the nonlinear processes in the VDP equation are purely mathematical, although a review of the available material shows that there are various circuit variants of the VDP relaxation oscillator that lead to rich nonlinear behavior, including chaos. In spite of this, it was not possible to find any review papers that provided in a convenient form, at least in an introductory format, a list of possible circuit solutions leading to chaotic behavior in VDP relaxation oscillators.

Analysis of recent research and publications. Most of the available publications focus on purely mathematical consideration of nonlinear behavior in different variants of the VDP oscillator. For example, the VDP equations are analyzed using the multiple scaling method (MSM) [5], a fractional model

solution method [6], a mixed mode oscillator [7, 8], or an artificial intelligence based system for selecting optimal parameters for a forced VDP oscillator [9], as well as schemes using idealized elements [10]. There are fewer extensive works that examine the behavior of different circuits in simulation or on a real prototype, in [11] some chaos generators and synchronization methods are considered and practical applications are given. In [12], the use of analog computers (AC) is proposed for the visual study of chaotic systems. The connection between strange attractors and fractals, methods of fixing chaos are given in [13], and the only extensive and systematized collection of various schemes is the book [14], which, however, does not describe all possible variants of a chaos generator based on the VDP oscillator. The historical development of nonlinear oscillators, including relaxation oscillators, is devoted to [15].

Task statement. A brief and non-exhaustive survey of existing variants of circuit implementation of deterministic chaos generators based on the VDP relaxation generator equation and tested for the presence of chaotic behavior by means of simulation in MATLAB, SPICE software environments or prototyping. The classification was performed according to the modification of the VDP equation.

Outline of the main material of the study. In 1926, Balthasar van der Pol in [16] emphasizes a separate group of oscillations, which he calls "relaxation oscillations" (although they have been observed before in other works or in parallel to his [17]), and, most importantly, gives a dimensionless equation describing it (which allows us to use it not only in electrical engineering) and provides a circuit based on a triode. A number of robots appear in which the phenomenon of synchronization in a circuit with an external signal source is discussed [18, 19], and the paper [3] describes forced oscillations in a circuit with a neon lamp. Such a scheme was already known and led to relaxation oscillations, but in the scheme with an external source noise was observed before the transition to a new, lower frequency. Later Cartwright and Littlewood mathematically investigated the VDP equation and observed "strange behavior", which was a manifestation of chaotic dynamics [20, 21]. In 1961, using an analog computer, chaotic behavior was also observed in the VDP equation. It was observed by Ueda at some parameters of angular frequency [21]. Perhaps the first practical implementation of a scheme similar to the VDP oscillator, for which a phase porter of a chaotic attractor was built, was proposed by Pikovsky and Rabinovich [21]. After the "Chua's scheme" was created and the phenomenon of deterministic chaos was proved and shown [22, 23], an active development and search for schemes leading to chaos began. Thus, going back to [3], Kenedy and Chua [4] show the way to chaos through adding a period in a forced VDP oscillator, proving that the irregular noise at the transition to a new frequency was chaotic behavior. Thus there was a circuit proof that it is possible to design different versions of deterministic chaos generators using the VDP equation.

Briefly consider some works referred to different types depending on the equation, it should be taken into account that the authors of some of them combine different basic variants and one work can be referred to several types at once, also it should be specified that in the work under the word "chaos" and its derivatives there is exactly the phenomenon of deterministic chaos, not stochastic process, as well as under "analog computer" is meant the realization of equations with the help of digital amplifiers, analog multipliers, inverters.

Van der Pol's forced oscillators (VDP). With the development of semiconductors, one of the main ways to observe chaotic behavior using circuitry is to implement the equation using AC built on operational amplifiers (OA) and analog multipliers [12–14]. One such variant of forced VDP is given in [24]. This scheme allows controlling 4 parameters and produces many rich bifurcations leading to chaos. If the source of the sinusoidal signal is replaced by an oscillating circuit, you can get an autonomous version of the forced oscillator VDP (ACRO). However, it will not depend on the period of the tuned loop. A variant of such a circuit built on an op-amp is studied in [25].

In the VDP oscillator one can observe bursting oscillations [26] and, based on the fast-slow dynamics, observe chaotic behavior at some parameter values. The scheme implemented by AC for such a variant was presented in [27]. The forcing signal consists of two different parameterized slowly varying functions $\sin(x)$. One of them is fixed, in the other one the frequency changes at constant amplitude, and chaotic oscillations are observed at a frequency of 0.6–0.8 Hz.

The periodic excitation can also be replaced by a triangular or meander signal [28]. It is found that, at a large dissipation term ($\varepsilon = 5$), chaotic behavior occurs at lower frequencies compared to $\sin(x)$. The paper presents a circuit implemented on AC, numerical simulation, and experimental verification are presented. Quasi-periodic and chaotic attractors have been observed.

The realization of the equation is possible not only on AC, but also using a microcontroller. Thus,

proposing a system of modified VDP oscillator, in which the potential of forced oscillation is proportional to the nonlinear term $\sin^n(x)$, and thus changing the power of the sinusoidal function, in [29] it was found that at certain values of the nonlinear dissipation term ε, it is possible to obtain, chaotic behavior even at its small values. The mathematical model was validated on the layout (Arduino Uno and oscilloscope). Developing their past work in [30], using meander and triangular signal and varying its power, the authors confirm chaotic, quasi-periodic and periodic behavior, also, besides mathematical model and validation on the layout, electronic simulation in OrCAD-Pspice is carried out. It is also possible to replace the source of sinusoidal signal by a pulse source [31, 32], the obtained strange attractors have a large number of turns and are called "Multiscrolls" [33], but the simulation of the electronic circuit in these works is not given, which opens the possibility of further investigation of this type of influence.

The problem of selecting a high-frequency nonlinear element arises in the design of microwave oscillators, one of the variants having the area of negative differential impedance is given in [34]. The authors consider three mathematical models used to describe oscillations in chaotic and periodic systems. Using a simplified VDP model they demonstrate the behavior of the proposed circuit on a resonant tunnel diode when multiplying and dividing the frequency of the input signal. The realization of the nonlinear element is possible based on a negative differential resistance (NDR) transistor structure. A variant of such a voltage controlled oscillator (VCO) based on the modified VDP equation is studied in [35]. Two cases of system dynamics are considered, in the presence and absence of white noise. The considered approach is useful in terms of real systems implementation and for oscillator synchronization. Developing this approach in [36], the authors propose new schemes of voltage-controlled VDP microwave oscillators on field-effect and bipolar transistors with NDR, and the possibility of tuning their frequency in different ways. More variants of VDP oscillators operating in relaxation and quasi-periodic modes are mathematically and experimentally investigated in [37].

An oscillator with a fifth order nonlinear term (restoring force potential φ^6) is studied in [38], a scheme of the proposed equation on AC is constructed in Multisim simulator, in which by changing the value of two resistors R_{8-9} the numerical simulation of this equation is confirmed, as a result, the authors give phase portraits for double and triple spiral attractors obtained from two simulations and from the layout of the scheme.

Since Leon Chua proposed a new element, the memristor [39], various variants of its realization and use have gradually started to appear, due to its hysteresis V-I characteristic it is interesting to use it as a nonlinear element in schemes of deterministic chaos generation. One of such schemes of forced VDP is investigated in [40]. The circuits are implemented on the OA and analog multipliers, experimental verification at different frequencies of the periodic signal source has been carried out, the results converge with numerical simulations.

Another scheme using a memristor, but with two periodic signal sources (angular frequencies are in the ratio of 3 to 1), is investigated in [41]. The proposed memristor model is tested in Multisim, and the chaotic dynamics of the circuit is analyzed only numerically, based on resonance relations. The main focus of the paper is on the comparison of numerical integration methods, where symplectic methods are found to be more accurate and efficient.

By including an active low pass filter or all pass filter (APF) between the nonlinear element the authors of [42] present a variant of modified VPD (MVDP). The equation that describes it involves three differential equations so the authors define it as third order VDP oscillators (TOVDP), the scheme being autonomous due to this modification transitions to chaos without an external signal source. The paper studies antimonotonicity, coexisting attractors, hysteresis. Besides analytical and numerical verification, the authors make a prototype of the proposed scheme and confirm the existence of a strange attractor by changing two new parameters (responsible for the delay) introduced by the filter and a resistor in the feedback loop.

An interesting case, which shows the influence of model simplification on the dynamics of the system, is [43]. Considering the model proposed by Pikovsky and Rabinovich, the authors complicate it by bringing it to a more realistic form, adding an amplifying element on a transistor and a tunnel diode. Modeling is carried out in Pspice and Matlab-Simscape. Three variants of the model are considered, each with its own behavior (steady state, period doubling, chaos). However, for the last model, which is the closest to the real one, no attractor is given, only non-periodic oscillations. It is assumed that with a longer checking period, the observed state would have shifted to chaotic. The paper also considers synchronization through non-entropy by introducing a rectangular voltage source, which suppresses the chaotic behavior.

Oscillators Van der Pol–Duffing (VDPD). Another well-known nonlinear second-order differential equation leading to deterministic chaos in the presence of an external sinusoidal force is the Duffing oscillator, whose restoring force contains cubic nonlinearity. It is well studied from the mathematical point of view [44] and on its basis there are various circuit implementations [45, 46] investigating its nonlinear dynamics. Adding cubic nonlinearity to the equation of the forced VDP oscillator transforms it into the Van der Pol-Duffing equation, which combines auto-oscillatory behavior with strong nonlinearity, the dependence of the oscillation period on the amplitude (non-isochronous oscillation), more possibilities for control, rich chaotic behavior.

One variant of the scheme, which is a modified Shinriki scheme [47], was proposed in a series of papers [48, 49]. In the papers, the Takens-Bogdanov, Silnikov, and Hoph bifurcation, the coexistence of deterministic chaos and periodic modes, was found. The nonlinear element consists of an array of diodes and an operational amplifier to precisely control the unfolding parameter.

Another diode-based scheme is given in [50]. In addition to the idealized diode, the scheme including a cos(x) signal source and a negative resistance is a kind of forced oscillator VDPD. At certain parameters the limit cycle, torus and transition to a chaotic attractor are observed.

Let us consider several variants that slightly modify the basic scheme for these robots, the first one [51]. The changes consist in adding a resistor in parallel to one of the inductors, which allows us to consider dynamic processes in a small range of parameters. The circuit has one cubic nonlinear element. Numerical verification of the circuit using MATLAB and Fortran for chaotic behavior is given. The second [52] resistor is added in series with the inductor, in [53] combine series and parallel resistor and add a source of oscillation which makes the system non-autonomous, the dynamics is investigated at different parameters of the periodic signal. An interesting feature is the use of a two-parameter bifurcation spatial diagram obtained from Lyapunov spectra. It is concluded that a larger range of parameters is achieved leading to chaotic behavior in the absence of a parallel resistor in a non-autonomous circuit.

All the above robots study the VDPD circuit only from a mathematical point of view, without creating a prototype. In [54], a circuit without inductance parallel resistor is given, the nonlinear element is the same as in [48], modulation in PSpice is performed, and an experimental setup is created. The authors investigate the possibility of synchronizing two autonomous modified VDPD (MVDPD) by magnetic coupling and achieve zero synchronization errors.

A forced VPD oscillator with potential φ^8 (a nonlinear term of the seventh order appears in the equation of the restoring force potential) is proposed in [55]. Using the method of multiple scales, stability conditions for fixed points and resonant oscillations are given. The behavior of the system is examined using bifurcation diagrams, Lyapunov exponents, phase portraits, time series and Poincaré maps. To validate the numerical and analytical results, the system is verified in MultiSIM and in an experimental setup. Changing the parameter of resistor R_7 allows us to observe transitions between periodic and chaotic behavior.

A generator demonstrating discontinuous oscillations based on OA and analog multipliers to simulate a nonlinear element, when modeled in OrCAD-PSpice and numerically investigated, is given in [56]. The authors find symmetric bifurcations and coexisting attractors. A model for integer and fractional order form (positive Lyapunov exponents appear in a smaller range of parameters) of the studied oscillator is given, the peculiarity of which is the choice of the range of control coefficients, the work focuses on the case for double hump potential (for $\alpha > 0$ and $\beta < 0$). A mathematical study of a jerk VPD with external and parametric forcing is given in [57], but the authors do not verify their model by means of a circuit.

By replacing the periodic source in a non-autonomous VDPD by positive feedback, one can reduce the generator size [58] and obtain chaotic behavior (the case of double hump potential) in a certain range of parameters. The verification of the proposed system of equations is performed in Orcard-PSpice. The circuit is assembled on an op-amp and analog multipliers. The cubic nonlinearity is changed by changing the parameter of resistor R_{14}.

A nonlinear system with symmetry breaking by adding an appropriate parameter to the VDPD equation (affects the bias current of the OA) and exhibiting multistability, five coexisting attractors (including hidden attractors) is proposed in [59]. The numerical results are verified using circuit modulation (analog computer) in PSpice.

Using the fourth order differential equation in [60], a system with hyperchaos property is given, there are two positive Lyapunov exponents, belonging to MVPD. To verify the numerical results, it is implemented on field programmable gate array

(FPGA), software-hardware cosimulation is used and direct Euler method is used as the mathematical model, Kintex-7 processor is selected for the hardware.

Oscillators Bonhoeffer–van der Pol (BVP). Another modification of the VPD equation is the Bonhoeffer-van der Pol equation, which is a simplified FitzHugh-Nagumo model [61] and is used to describe excitable systems, particularly in neuroscience and cardiac electrophysiology. It is less complex (in terms of the number of control parameters) than VDPD, although it has cubic nonlinearity. Its feature is fast-slow dynamics and mixed mode oscillation (MMO) [62, 63, 64]. At certain values of the terms of the equation also exhibits chaotic behavior (in forced systems). There are few works that describe the schemes and experimentally verify them, mainly mathematical models are given.

An analog circuit of a forced oscillator BVP with a nonlinear element built on an op-amp and diodes is experimentally investigated in [65]. The authors observe a complex mixed mode of oscillations with incrementing bifurcations (MMOIB) and discontinuous chaotic MMO (which is often observed in chemical experiments) in a narrow range of parameters. The dynamics of the coupled system is mathematically investigated in [66], where the case of series and ring coupling of two and three forced BVPs, the possibility of synchronization of the systems and the transition from chaos to limit cycle are tested. Experimentally the scheme with resistively coupled BVP oscillators is proposed in [67] under a weak periodic perturbation. By changing the coupling strength in a small range of parameters a strange attractor is observed.

Conclusions. Some number of variants of deterministic chaos realization in schemes based on the VPD equation has been considered. It is supposed that by combining the considered solutions it is possible to offer new variants of schemes. The examination is not exhaustive, but only shows the variety of approaches that can be used to observe complex nonlinear dynamics. By modifying the basic relaxation oscillation equation proposed by VPD, adding a nonlinear element and an external signal source, one can obtain a forced oscillator; a restoring force containing a cubic nonlinearity – VDPD; a slow recovery variable and a cubic nonlinearity – BVP. In the above works, a large number of ways to influence the dynamics of the system have been proposed: the shape or power of the signal source; the number of signal sources; the restoring force (potential φ); the type of nonlinear element; changing the ratings of circuit elements (or the values of the terms of the equation in the case of an analog computer); the number of oscillators; the coupling coefficient; the detuning coefficient; active filters; additional passive elements. Thus one can observe different dynamics: periodic; quasi-periodic; chaotic behavior; different variants of bifurcations; MMOIB; intermittency; torus collapse; multiscrolls; discontinuous oscillations; hyperchaos; multistability; crises; symmetric and asymmetric attractors.

The study of the dynamics of systems in the works is carried out numerically, analytically, by modulating the circuit in a simulator, experimentally on a prototype. In most cases, the circuits are built using an analog computer (op-amp, analog multipliers, inverters) or on a microcontroller, FPGA. Less often on passive elements and those with a nonlinear V-I characteristic. The authors of most works do not create a real prototype, limiting themselves to simulation, which, as shown in some articles, can distort the real results and give only approximate values at which there is a change in the dynamics of the system.

Bibliography:

1. Kaddoum G. Wireless Chaos-Based Communication Systems: A Comprehensive Survey. *IEEE Access*. 2016. Vol. 4. P. 2621–2648. DOI: https://doi.org/10.1109/access.2016.2572730

2. Petrzela J. Chaos in Analog Electronic Circuits: Comprehensive Review, Solved Problems, Open Topics and Small Example. Mathematics. 2022. Vol. 10, no. 21. P. 4108. DOI: https://doi.org/10.3390/math10214108

3. Van der Pol B., Van der Mark J.: Frequency demultiplication. Nature Vol. 120, 1927. P. 363–364.

4. Kennedy M., Chua L. Van der Pol and chaos. IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1986. Vol. 33, no. 10. P. 974–980. DOI: https://doi.org/10.1109/tcs.1986.1085855

5. Chughtai F. A. Examining the Van der Pol Oscillator: Stability and Bifurcation Analysis. Nonlinear Sciences. Adaptation and Self-Organizing Systems. 2023 DOI: https://doi.org/10.48550/arXiv.2309.07010

6. A numerical study of the Van der Pol model derived by the Caputo–Fabrizio operator / H. Jafari et al. AIP Advances. 2023. Vol. 13, no. 8. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0167878

7. Inaba N., Tsubone T. Nested mixed-mode oscillations, part II: Experimental and numerical study of a classical Bonhoeffer–van der Pol oscillator. Physica D: Nonlinear Phenomena. 2020. Vol. 406. P. 132493. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132493

8. Experimental Study of Mixed-Mode Oscillations in a Four-Segment Piecewise Linear Bonhoeffer-van der Pol Oscillator under Weak Periodic Perturbation / T. Q. TRUONG et al. IEICE Transactions on Fundamentals of

Electronics, Communications and Computer Sciences. 2017. E100.A, no. 7. P. 1522–1531. DOI: https://doi.org/10.1587/transfun.e100.a.1522

9. Ribordy L., Sands T. Chaotic van der Pol Oscillator Control Algorithm Comparison. Dynamics. 2023. Vol. 3, no. 1. P. 202–213. DOI: https://doi.org/10.3390/dynamics3010012

10. Mixed-mode oscillations from a constrained extended Bonhoeffer–van der Pol oscillator with a diode / N. Inaba et al. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2021. Vol. 31, no. 7. P. 073133. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0040658

11. MINATI L. Chaos and Synchronization – Potential Ingredients of Innovation in Analog Circuit Design?. IEICE Transactions on Electronics. 2024. DOI: https://doi.org/10.1587/transele.2023cti0001

12. Flores B., Erives H. Implementation of non-linear oscillators using analog computers for the study of chaotic oscillators. 2024 ASEE-GSW, Canyon, Texas, 10–12 March 2024. DOI: https://doi.org/10.18260/1-2--45385

13. Pulinchery P., Pothyiodath N., Murkoth U. K. Chaos to fractals. Momentum: Physics Education Journal. 2023. Vol. 7, no. 1. P. 17–32. URL: https://doi.org/10.21067/mpej.v7i1.7502

14. Thio W. J.-C., Sprott J. C. Elegant Circuits: Simple Chaotic Oscillators. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2022.

15. Ginoux J.-M. History of Nonlinear Oscillations Theory in France (1880–1940). Cham: Springer International Publishing, 2017. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-55239-2

16. Van der Pol B. On “relaxation- oscillations”. The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 1926. Vol. 2(11), P. 978–992. https://doi.org/10.1080/14786442608564127

17. Ginoux J.-M., Letellier C. Van der Pol and the history of relaxation oscillations: Toward the emergence of a concept. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2012. Vol. 22, no. 2. P. 023120. URL: https://doi.org/10.1063/1.3670008

18. Van der Pol B., A theory of the amplitude of free and forced triode vibrations, Radio Review (London), 1920. Vol. 1, P. 701–710 and 754–762.

19. Van der Pol B. VII. Forced oscillations in a circuit with non-linear resistance. (Reception with reactive triode). The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1927. Vol. 3, no. 13. P. 65–80. DOI: https://doi.org/10.1080/14786440108564176

20. Ginoux J.-M. From Nonlinear Oscillations to Chaos Theory. Understanding Complex Systems. Cham, 2016. P. 27–47. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-319-29701-9_2

21. From Mathematics to Electronic Circuits. Chaos in Nature. 2019. P. 89–160. DOI: https://doi.org/10.1142/9789811201202_0008

22. Matsumoto T. A chaotic attractor from Chua’s circuit. IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1984. Vol. 31, no. 12. P. 1055–1058. DOI: https://doi.org/10.1109/tcs.1984.1085459

23. Chua L., Komuro M., Matsumoto T. The double scroll family. IEEE Transactions on Circuits and Systems. 1986. Vol. 33, no. 11. P. 1072–1118. URL: https://doi.org/10.1109/tcs.1986.1085869

24. Rich bifurcation behaviors of the driven van der Pol oscillator / G.-r. Qin et al. Physics Letters A. 1989. Vol. 141, no. 8–9. P. 412–416. URL: https://doi.org/10.1016/0375-9601(89)90859-1

25. Bernhardt P. A. Coupling of the relaxation and resonant elements in the autonomous chaotic relaxation oscillator (ACRO). Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 1992. Vol. 2, no. 2. P. 183–199. URL: https://doi.org/10.1063/1.165924

26. Han X., Bi Q. Complex bursting patterns in Van der Pol system with two slowly changing external forcings. Science China Technological Sciences. 2012. Vol. 55, no. 3. P. 702–708. URL: https://doi.org/10.1007/s11431-011-4655-y

27. Makouo L., Woafo P. Experimental observation of bursting patterns in Van der Pol oscillators. Chaos, Solitons & Fractals. 2017. Vol. 94. P. 95–101. URL: https://doi.org/10.1016/j.chaos.2016.11.013

28. SIMO H., WOAFO P. BIFURCATION STRUCTURE OF A VAN DER POL OSCILLATOR SUBJECTED TO NONSINUSOIDAL PERIODIC EXCITATION. International Journal of Bifurcation and Chaos. 2012. Vol. 22, no. 01. P. 1250003. URL: https://doi.org/10.1142/s0218127412500034

29. Van der Pol equation with sine nonlinearity: dynamical behavior and real time control to a target trajectory / R. F. Fonkou et al. Physica Scripta. 2021. Vol. 96, no. 12. P. 125203. URL: https://doi.org/10.1088/1402-4896/ac19cd

30. Dynamical behavior analysis of the Van der Pol oscillator with sine nonlinearity subjected to non-sinusoidal periodic excitations by the bifurcation structures / R. F. Fonkou et al. Physica Scripta. 2023. URL: https://doi.org/10.1088/1402-4896/ace8cf

31. Elwakil A. S., Ozoguz S. Multiscroll Chaotic Oscillators: The Nonautonomous Approach. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2006. Vol. 53, no. 9. P. 862–866. URL: https://doi.org/10.1109/tcsii.2006.880032

32. Elwakil A.S. Clock-Driven Chaotic Pulse-Width Generators: An Overview and Demonstration of Power Supply Attack. International Journal of Bifurcation and Chaos. 2014. Vol. 24, no. 06. P. 1450079. URL: https://doi.org/10.1142/s0218127414500795

33. FAMILIES OF SCROLL GRID ATTRACTORS / M. E. YALÇIN et al. International Journal of Bifurcation and Chaos. 2002. Vol. 12, no. 01. P. 23–41. URL: https://doi.org/10.1142/s0218127402004164

34. Mathematical Model of Microwave Devices on Resonant Tunneling Diodes for Practical Application in Radar and Electronic Systems / A. Semenov et al. 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week (UkrMW), Kharkiv, Ukraine, 21–25 September 2020. 2020. URL: https://doi.org/10.1109/ukrmw49653.2020.9252673

35. Semenov A. The Van der Pol's mathematical model of the voltage-controlled oscillator based on a transistor structure with negative resistance. 2016 13th International Conference on Modern Problems of Radio Engineering. Telecommunications and Computer Science (TCSET), Lviv, Ukraine, 23–26 February 2016. 2016. URL: https://doi.org/10.1109/tcset.2016.7451982

36. Van der Pol Oscillators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities / A. Semenov et al. Data-Centric Business and Applications. Cham, 2021. P. 43–78. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_3

37. Pulse and Multifrequency Van der Pol Generators Based on Transistor Structures with Negative Differential Resistance for Infocommunication System Facilities / A. Semenov et al. Data-Centric Business and Applications. Cham, 2021. P. 127–158. URL: https://doi.org/10.1007/978-3-030-71892-3_6

38. Computer and Hardware Modeling of Periodically Forcedϕ6-Van der Pol Oscillator / A.O.Adelakun та ін. *Active and Passive Electronic Components*. 2016. T. 2016. C. 1–7. DOI: https://doi.org/10.1155/2016/3426713

39. Chua L. Memristor-The missing circuit element. IEEE Transactions on Circuit Theory. 1971. Vol. 18, no. 5. P. 507–519. DOI: https://doi.org/10.1109/tct.1971.1083337

40. Memristor Based van der Pol Oscillation Circuit / Y.Lu et al. International Journal of Bifurcation and Chaos. 2014. Vol. 24, no. 12. P. 1450154. DOI: https://doi.org/10.1142/s0218127414501545

41. Symplectic Dynamics and Simultaneous Resonance Analysis of Memristor Circuit Based on Its van der Pol Oscillator / B.Yang et al. Symmetry. 2022. Vol. 14, no. 6. P. 1251. DOI: https://doi.org/10.3390/sym14061251

42. De Sarkar S.S., Sharma A.K., Chakraborty S. Chaos, antimonotonicity and coexisting attractors in Van der Pol oscillator based electronic circuit. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2021. DOI: https://doi.org/10.1007/s10470-021-01934-8

43. Berkovich, Y., The Van Der Pol Oscillator with a Tunnel Diode, WJERT, 2024, Vol. 10, no. 3: P. 40–56.

44. Brennan M.J., Kovacic I. Duffing Equation: Nonlinear Oscillators and Their Behaviour. Wiley & Sons, Limited, John, 2011. 392 p.

45. Jones B.K., Trefan G. The Duffing oscillator: A precise electronic analog chaos demonstrator for the undergraduate laboratory. American Journal of Physics. 2001. Vol. 69, no. 4. P. 464–469. DOI: https://doi.org/10.1119/1.1336838

46. Experimental chaos detection in the Duffing oscillator / J.S.A.Eyebe Fouda et al. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2016. Vol. 33. P. 259–269. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2015.09.011

47. Shinriki M., Yamamoto M., Mori S. Multimode oscillations in a modified Van Der Pol oscillator containing a positive nonlinear conductance. Proceedings of the IEEE. 1981. Vol. 69, no. 3. P. 394–395. DOI: https://doi.org/10.1109/proc.1981.11973

48. King G.P., Gaito S.T. Bistable chaos. I. Unfolding the cusp. Physical Review A. 1992. Vol. 46, no. 6. P. 3092–3099. DOI: https://doi.org/10.1103/physreva.46.3092

49. Gomes M.G.M., King G.P. Bistable chaos. II. Bifurcation analysis. Physical Review A. 1992. Vol. 46, no. 6. P. 3100–3110. DOI: https://doi.org/10.1103/physreva.46.3100

50. Inaba N., Tsukamoto K., Endo T. Bifurcation and chaos in the piecewise-linear forced Duffing-van der Pol oscillator with a diode. ICECS 2001. 8th IEEE International Conference on Electronics, Circuits and Systems, Malta. DOI: https://doi.org/10.1109/icecs.2001.957453

51. Matouk A.E., Agiza H.N. Bifurcations, chaos and synchronization in ADVP circuit with parallel resistor. Journal of Mathematical Analysis and Applications. 2008. Vol. 341, no. 1. P. 259–269. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2007.09.067

52. Fodjouong G.J., Fotsin H.B., Woafo P. Synchronizing modified van der Pol–Duffing oscillators with offset terms using observer design: application to secure communications. Physica Scripta. 2007. Vol. 75, no. 5. P. 638–644. DOI: https://doi.org/10.1088/0031-8949/75/5/008

53. Hyperchaos and bifurcations in a driven Van der Pol–Duffing oscillator circuit / U.E.Vincent et al. International Journal of Dynamics and Control. 2014. Vol. 3, no. 4. P. 363–370. DOI: https://doi.org/10.1007/s40435-014-0118-1

54. A Magnetic Coupling Based Strategy for Synchronization of a System Consisting of Chaotic Modified Van der Pol Duffing Oscillators / L. K. Kana et al. Journal of Nonlinear Dynamics. 2014. Vol. 2014. P. 1–9. DOI: https://doi.org/10.1155/2014/635925

55. Adelakun A. O. Resonance Oscillation and Transition to Chaos in φ^8-Duffing–Van der Pol Duffing–Van der Pol Oscillator. International Journal of Applied and Computational Mathematics. 2021. Vol. 7, no. 3. DOI: https://doi.org/10.1007/s40819-021-01005-6

56. Coexistence of attractors in autonomous Van der Pol–Duffing jerk oscillator: Analysis, chaos control and synchronisation in its fractional-order form / V. K. Tamba et al. Pramana. 2018. Vol. 91, no. 1. DOI: https://doi.org/10.1007/s12043-018-1586-1

57. Analysis on the symmetric fast-slow behaviors in a van der Pol-Duffing-Jerk oscillator / W. Lyu et al. Physica Scripta. 2023. DOI: https://doi.org/10.1088/1402-4896/acfce1

58. Three-dimensional chaotic autonomous van der pol–duffing type oscillator and its fractional-order form / G. F. Kuiate et al. Chinese Journal of Physics. 2018. Vol. 56, no. 5. P. 2560–2573. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cjph.2018.08.003

59. Dynamics, control and symmetry breaking aspects of a modified van der Pol–Duffing oscillator, and its analog circuit implementation / L. Kamdjeu Kengne et al. Analog Integrated Circuits and Signal Processing. 2020. Vol. 103, no. 1. P. 73–93. DOI: https://doi.org/10.1007/s10470-020-01601-4

60. Hyperchaos and Coexisting Attractors in a Modified van der Pol–Duffing Oscillator / K. Rajagopal et al. International Journal of Bifurcation and Chaos. 2019. Vol. 29, no. 05. P. 1950067. DOI: https://doi.org/10.1142/s0218127419500676

61. Nagumo J., Arimoto S., Yoshizawa S. An Active Pulse Transmission Line Simulating Nerve Axon. Proceedings of the IRE. 1962. Vol. 50, no. 10. P. 2061–2070. URL: https://doi.org/10.1109/jrproc.1962.288235

62. Brechtl J., Xie X., Liaw P. K. Investigation of chaos and memory effects in the Bonhoeffer-van der Pol oscillator with a non-ideal capacitor. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation. 2019. Vol. 73. P. 195–216. DOI: https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2019.01.019

63. Inaba N., Tsubone T. Nested mixed-mode oscillations, part II: Experimental and numerical study of a classical Bonhoeffer–van der Pol oscillator. Physica D: Nonlinear Phenomena. 2020. Vol. 406. P. 132493. DOI: https://doi.org/10.1016/j.physd.2020.132493

64. Mixed-mode oscillations and extreme events in fractional-order Bonhoeffer–van der Pol oscillator / Z. Wei et al. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2023. Vol. 33, no. 9. DOI: https://doi.org/10.1063/5.0158100

65. Shimizu K., Sekikawa M., Inaba N. Experimental study of complex mixed-mode oscillations generated in a Bonhoeffer-van der Pol oscillator under weak periodic perturbation. Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science. 2015. Vol. 25, no. 2. P. 023105. DOI: https://doi.org/10.1063/1.4907741

66. Kyprianidis I. M., Papachristou V., Stouboulos I. N. Dynamics of Coupled Chaotic Bonhoeffer – van der Pol Oscillators. WSEAS TRANSACTIONS on SYSTEMS. 2012. Vol. 11, no. 9. P. 516–526.

67. Chaotic oscillations in two coupled Bonhoeffer-van der Pol oscillators NOLTA / S. Kuniyasu et al. International Symposium on Nonlinear Theory and its Applications. 2014. P. 648–651.

Семенов А. О., Хльоба А. А. ОГЛЯД СХЕМОТЕХНІЧНИХ РІШЕНЬ, ЩО ПРИЗВОДЯТЬ ДО ДЕТЕРМІНОВАНОГО ХАОСУ В ГЕНЕРАТОРАХ НА ОСНОВІ РІВНЯННЯ ВАН ДЕР ПОЛЯ

Стаття присвячена генераторам детермінованого хаосу побудованих на основі рівняння Ван дер Поля (VDP) і його модифікованих версіях. Розглянуто роботи, в яких досліджується нелінійна поведінка запропонованих модифікацій рівняння VDP, зокрема така що призводить до хаотичної поведінки. Більшість винятково математичних робіт не розглядається, відаючи перевагу тим, що включають моделювання запропонованих систем рівнянь за допомогою симуляторів (PSpice, MultiSIM, OrCAD) і побудову реального прототипу на аналоговому комп'ютері. Виокремлені праці розділені за трьома типами рівнянь і генераторами на їх основі. Базове рівняння VDP із зовнішнім джерелом сигналу (вимушене) досліджується при різних параметрах сигналу (форма, амплітуда) та модифікаціях схеми (додавання пасивних елементів, активних фільтрів, зміна кількісті джерел зовнішнього сигналу, нелінійного елемента). Визначено, що роботи на основі рівняння Van der Pol-Duffing відрізняються багатшою нелінійною поведінкою, навіть без зовнішнього джерела сигналу. Можливість управління більшою кількістю параметрів системи призводить до спостереження розривних коливань, гіперхаосу, мультистабільністі. Наведено роботи як автономних, так і неавтономних варіантів схем. Як останній тип досліджується рівняння Bonhoeffer-Van der Pol, що походить із галузі нейронаук, хімії та електрофізіології серця, та може бути перетворене на електричну схему. Наведені реалізації

демонструють цікаву нелінійну поведінку і детермінований хаос, але у вужчому діапазоні параметрів системи. З'ясовано, що система відрізняється динамікою «швидко-повільно», має складний змішаний режим коливань. Результатом виконаної роботи є невичерпний огляд існуючих генераторів детермінованого хаосу на основі рівняння VDP, з'ясовані наявні прогалини в досліджені певних типів генераторів, підходи і методи їх створення, інструменти які використовуються при їх досліджені. Структурування існуючих підходів відкриває можливість використання особливостей наведених схем для створення абсолютно нових математичних моделей або поліпшення наявних для систем прихованої передачі інформації.

Ключові слова: *детермінований хаос, генератор хаосу, вимушений гененратор, дивний аттрактор, розривні коливання, багатовитковий атрактор, гіперхаос, неавтономний хаос, комп'ютерне моделювання, моделювання PSpice, ПЛІС, ACRO, Van der Pol, VDP, TOVDP, MVDP, VDPD, MVDPD, BVP, NDR.*

УДК 621.391
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/23

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

Кравчук С. О.
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

ВІРТУАЛІЗАЦІЯ МЕРЕЖНИХ ФУНКЦІЙ У 5G: ПІДХОДИ, АРХІТЕКТУРА ТА ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ

У статті розглянуто підходи до віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у мобільних мережах п'ятого покоління (5G). Аналізуються сучасні методи реалізації цих технологій, їхня роль у побудові гнучкої, масштабованої та ефективної мережневої інфраструктури, а також ключові виклики та перспективи їхнього впровадження.

Основна мета статті *– дослідити архітектурні рішення, що дозволяють ефективно відокремлювати мережні функції від апаратного забезпечення, забезпечуючи динамічну оркестрацію та автоматизоване управління ресурсами. Для цього здійснено огляд основних моделей розподілу мережних функцій у 5G, таких як повна хмарна міграція, міграція С-площини у хмару та сценарний підхід до розподілу навантаження між хмарною та мобільною інфраструктурою.*

Окрему увагу приділено концепціям управління мережею за допомогою SDN, розподілу контрольної та користувацької площин (C-plane/U-plane), а також їхнього впливу на продуктивність, затримки та масштабованість мережі.

Представлено огляд актуальних досліджень у сфері стандартизації 5G, визначено потенційні напрями розвитку технологій NFV та SDN, а також окреслено ключові виклики, які потребують подальшого вивчення для досягнення високої ефективності та надійності мобільних мереж нового покоління.

Результати. *У ході дослідження було визначено ключові підходи до реалізації віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у мобільних мережах 5G. Аналіз існуючих архітектурних рішень показав, що застосування NFV дозволяє зменшити залежність від спеціалізованого обладнання та забезпечує гнучкість у розподілі ресурсів, тоді як SDN сприяє оптимізації управління мережею за рахунок централізованого контролю та розподілу навантаження. Розглянуто три основні стратегії міграції мережних функцій у 5G: повна хмарна міграція, міграція С-площини у хмару та сценарний підхід. Визначено основні переваги та недоліки кожного методу, а також їхній вплив на продуктивність мережі, затримки та масштабованість.*

Висновки. *Дослідження підтвердило, що впровадження NFV та SDN у 5G-мережі сприяє підвищенню ефективності управління ресурсами, зниженню капітальних та операційних витрат операторів, а також пришвидшенню розгортання нових послуг. Аналіз існуючих рішень показав, що застосування розподілених архітектур, динамічного керування мережею та оркестрації ресурсів є ключовими факторами для успішного розвитку 5G. У статті також визначено основні виклики, пов'язані з масштабованістю, безпекою та продуктивністю SDN/NFV у мобільних мережах, що потребують подальших досліджень.*

Ключові слова: *5G, віртуалізація мережних функцій (NFV), програмно-визначені мережі (SDN), управління мережею, C-plane/U-plane,, мобільна інфраструктура.*

Постановка проблеми. На даний час мобільні мережі електронних комунікацій стикаються зі стрімким зростанням обсягу переданого трафіку, що обумовлено активним впровадженням мобільних застосунків та сервісів із різноманітними вимогами до якості обслуговування (наприклад, Netflix, YouTube, хмарні ігрові платформи). П'яте покоління (5G) мереж мобільного зв'язку покликане забезпечити ефективну підтримку таких застосунків, а також відкрити нові можливості для реалізації найбільш вимогливих до своїх характеристик сервісів, зокрема:

– масштабних комунікацій між пристроями (mMTC – Massive Machine Type Communications), які передбачають обмін даними між величезною кількістю IoT-пристроїв;

– надійних з низькою затримкою комунікацій (UR-LLC – Ultra-Reliable Low Latency Communications), які необхідні для критично важливих сценаріїв, таких як автономний транспорт, віддалена хірургія та промислові автоматизовані системи.

Щоб досягти поставлених цілей, у 5G-мережах використовуються нові інноваційні технології, такі як:

– спеціалізовані радіоінтерфейси, зокрема mmWave (міліметрові хвилі) для надвисокошвидкісного з'єднання;

– гетерогенні радіомережі RAN (Heterogeneous Radio Access Networks), що поєднують різні технології доступу;

– змішане покриття за допомогою макро- та мікростільників, що підвищує ємність мережі;

– віртуалізація мережних функцій (NFV) для гнучкого розгортання сервісів та масштабованості інфраструктури.

Такі інновації призводять до значного ускладнення архітектури мережі, оскільки вона повинна підтримувати різноманітні технології з різними стековими протоколами та інтерфейсами, що часто залежать від конкретних постачальників обладнання.

Управління такою складною мережею неможливе без впровадження SDN, які відіграють ключову роль у забезпеченні ефективності 5G-інфраструктури. Застосування SDN дозволяє відокремлювати площину управління (C-plane) від площини користувацьких даних (U-plane) за допомогою стандартизованих інтерфейсів, таких як OpenFlow [1], централізовано контролювати маршрутизацію трафіку та спрощує адміністрування мережі.

Подібні підходи пропонується впроваджувати в центрах обробки даних та проводових мережах, де SDN забезпечує централізоване управління та адаптивну конфігурацію. У сфері мобільних мереж дослідження з інтеграції SDN вже активно проводяться для:

– радіомереж (RAN) – адаптивне управління спектром і динамічний розподіл ресурсів [2];

– ядра мобільної мережі (Core Network) – оптимізація маршрутизації та гнучке управління трафіком [3];

– безпроводових мереж, не пов'язаних із стільниковими технологіями, таких як Wi-Fi або LoRaWAN [4].

Реалізація концепцій SDN у мобільних мережах стає критично важливим фактором для ефективного впровадження 5G, забезпечення високої продуктивності та підтримки майбутніх мережних технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Віртуалізація та програмна реалізація SDN у 5G-системах є темою багатьох дослідницьких робіт. Отримані результати таких робіт підкреслюють переваги підходів віртуалізації для виконання вимог до 5G-мереж.

Запропоновані підходи до створення архітектури 5G-мереж можна класифікувати на три основні категорії, кожна з яких визначається розташуванням мережних функцій.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз підходів до віртуалізації мережних функцій (NFV) та програмно-визначених мереж (SDN) у 5G-мережах з акцентом на їхню роль у покращенні керованості, масштабованості та ефективності інфраструктури. Основна увага приділяється розгляду архітектурних рішень для розподілу мережних функцій, серед яких: повна хмарна міграція, перенесення площини управління в хмару та гібридний підхід із динамічним балансуванням навантаження. Також розглядаються механізми управління мережею на основі SDN, зокрема відокремлення контрольної та користувацької площин (C-plane/U-plane) та їхній вплив на продуктивність і затримки в мережі. Проведений аналіз дозволяє визначити ключові виклики, пов'язані з впровадженням SDN та NFV, а також сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо їхнього подальшого вдосконалення та інтеграції в мобільні мережі наступного покоління.

Підхід 1. Архітектура повної міграції в хмару (Full-Cloud Migration Architecture). Це рішення передбачає розміщення всіх мережних функцій у хмарі, що належить оператору, яка централізовано керує всіма мережневими функціями та процесами сигналізації рис. 1.

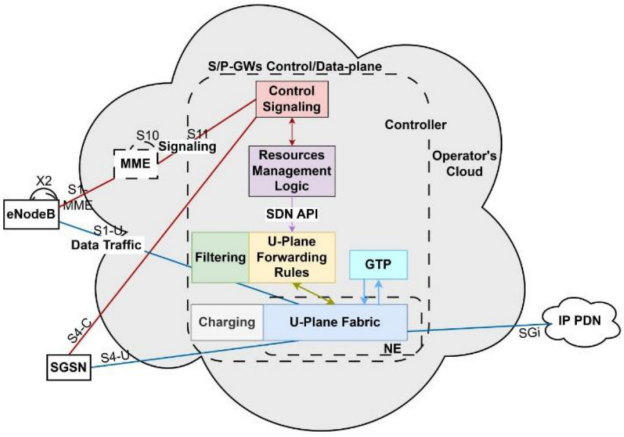


Рис. 1. Архітектура повної міграції в хмару

Переваги архітектури повної міграції в хмару:

– висока доступність мережі завдяки централізованому управлінню;

– легка інтеграція та взаємодія з іншими технологіями та протоколами, які можуть бути інтегровані на рівні хмари;

– зниження витрат, оскільки відпадає необхідність у використанні географічно розподілених обчислювальних і сховищних ресурсів;

– простота обслуговування та оновлення, при цьому гарантується висока продуктивність обчислень та зберігання.

Такий підхід був представлений в дослідженнях [5], [6], [7].

Основна ідея повної міграції в хмару полягає в тому, що всі рішення щодо управління C- та U-площин приймаються централізовано в хмарному середовищі. Додаткові деталі архітектури були запропоновані в [8], де визначаються три рівні контролерів:

– контролер пристроїв (Device Controller) – відповідає за вибір мережі доступу;

– контролер рівня краю (Edge Controller) – займається автентифікацією, безпекою, управлінням доступом, маршрутизацією та хендоверами;

– контролер оркестрації (Orchestration Controller) – виконує керування мережевими ресурсами, зокрема інстанціювання C-площини та балансування U-площини.

Недоліки архітектури повної міграції в хмару:

– обмеження продуктивності хмарної інфраструктури. Через часті операції C-площини та великий обсяг U-трафіку, який повинен оброблятися на PGW [9], підключення eNodeB до хмари може стати вузьким місцем. Це призводить до проблем із надійністю, пропускною здатністю та затримками, що нівелює переваги цієї архітектури;

– обмежена гнучкість. Оскільки всі функції мобільного ядра централізовані в хмарі, ця архітектура забезпечує гнучкість лише у створенні різних функціональних ланцюжків у межах хмари. Вона не підтримує розподілене розміщення мережних функцій у мережі, що обмежує адаптивність системи.

Підхід 2. Архітектура міграції C-площини в хмару (C-plane Cloud Migration Architecture). Ця архітектура передбачає розподіл функцій C- та U-площин, як це розглянуто у [10]. Відповідно до рис. 2, eNodeBs (або virtual-eNodeBs) керуються центральною хмарою з точки зору C-площини, тоді як U-трафік маршрутизується через розподілені вузли U-площини по всій мережі, рис. 2.

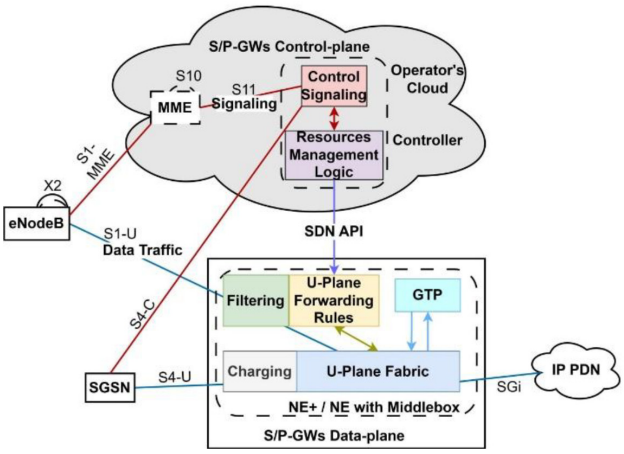


Рис. 2. Архітектура міграції C-площини в хмару

Переваги архітектури міграції C-площини в хмару:

– вища гнучкість завдяки можливості динамічного мігрування віртуалізованих компонентів U-площини залежно від навантаження трафіку або вимог сервісів [11];

– зменшення ефекту «вузького місця», яке може виникати через повну централізацію мобільного ядра в хмарі.

Однак цей підхід має і негативні аспекти:

– необхідність переміщення критичних функцій (наприклад, GTP-тунелювання) на U-площину для запобігання передачі всіх пакетів даних через хмару;

– може вимагати використання спеціалізованого апаратного забезпечення (middleboxes) або постачання комутуючих елементів із програмованими платформами, які зможуть обробляти такі функції.

Підхід 3. Архітектура сценарної міграції (Scenario-based Migration Architecture). Основна ідея цього підходу полягає в тому, щоб розгортати мережні функції як у хмарі, так і в мобільній інфраструктурі. При цьому міграція функцій відбувається залежно від умов перевантаження мережі та вимог сервісів [12].

Як видно з рис. 3, деякі мережні функції можуть працювати у хмарах на краю мережі (edge clouds) [13], що дозволяє досягти вищої гнучкості та масштабованості.

Ця архітектура дозволяє розгортати функції безпосередньо на краю мережі для сервісів, чутливих до затримок, або для сценаріїв, які потребують додаткових функціональних можливостей (наприклад, підтримка не-3GPP точок доступу).

Приклади досліджень. Так, в [12] проаналізовано переваги переміщення мережних функцій в межах мобільної інфраструктури та показали,

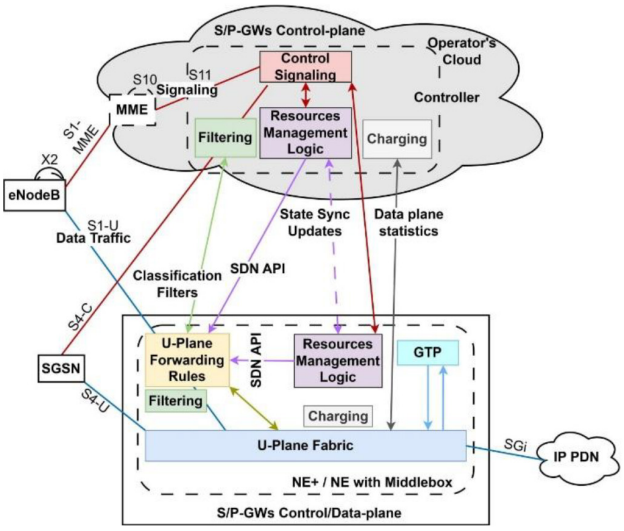


Рис. 3. Архітектура сценарної міграції

що переміщення функцій ближче до радіодоступу дозволяє економити до 48 % мережних ресурсів. В [10] запропоновано переміщати функції тарифікації у хмару, обмінюючись статистичними даними з іншими компонентами мобільної інфраструктури. Дослідники в [13] розробили оптимальну модель розташування мережних функцій, яка мінімізує вартість передавання пакетів.

Переваги архітектури сценарної міграції:

– швидке переналаштування та підвищена стійкість у випадку змін у мережі або відмов завдяки підтримці динамічної топології мережі;

– можливість забезпечення ультра низької затримки та оптимізації end-to-end з'єднання;

– підтримка масштабного підключення великої кількості пристроїв, що є ключовим фактором для 5G-мереж.

Недоліки цього підходу:

– необхідність синхронізації станів між хмарними мережами та розподіленими елементами мобільної інфраструктури, що може створювати додаткові витрати на сигналізацію [10];

– коли функції переміщуються за межі центральної хмари, виникають обмеження в продуктивності обробки та зберігання, оскільки хмарна архітектура не використовується повною мірою.

Виклад основного матеріалу. Розвиток мобільних мереж 5G супроводжується зростаючими вимогами до гнучкості, масштабованості та економічної ефективності інфраструктури. Впровадження віртуалізації мережних функцій (NFV, Network Function Virtualization) є одним із ключових напрямків оптимізації мобільних операторських мереж, що дозволяє відокремити мережні сервіси від фізичного обладнання та реалізувати їх у вигляді програмних модулів, які можуть динамічно змінювати місце свого розгортання відповідно до поточного навантаження та вимог до продуктивності.

1. Проблеми традиційної архітектури мобільних мереж

Класична архітектура операторських мереж базується на використанні спеціалізованого апаратного забезпечення (маршрутизатори, комутатори, вузли EPC, RAN-контролери тощо). Це призводить до низки проблем:

– високі капіталовкладення (CAPEX) та операційні витрати (OPEX). Для впровадження нових сервісів необхідне придбання та встановлення додаткового обладнання, що збільшує витрати операторів;

– тривалий життєвий цикл обладнання. Устаткування має обмежений термін служби (5–10 років), а його оновлення потребує значних ресурсів;

– обмежена гнучкість. Традиційна мережнева інфраструктура має жорстку структуру, що ускладнює швидке впровадження нових послуг або масштабування ресурсів відповідно до трафіку;

– обмежені можливості автоматизації. Відсутність програмно-керованого управління ускладнює динамічну зміну конфігурації мережі та оптимізацію її роботи.

2. Основи NFV та її роль у 5G

Концепція NFV спрямована на усунення вищезазначених проблем шляхом перенесення мережних функцій (наприклад, EPC, SGW, PGW, HSS, MME) у програмне середовище, що працює на стандартному серверному обладнанні у віртуальних середовищах (VM, контейнерах або мікросервісах).

NFV дозволяє реалізувати:

– програмну реалізацію мережних функцій. Наприклад, віртуальний маршрутизатор (vRouter), віртуальна базова станція (vBTS), віртуальний брандмауер (vFirewall) тощо;

– гнучке керування розгортанням сервісів. Динамічне масштабування ресурсів відповідно до навантаження дозволяє ефективно використовувати серверні потужності та оптимізувати витрати;

– розподілену інфраструктуру. NFV дає змогу розгортати функції як у централізованих дата-центрах, так і на периферійних вузлах (Mobile Edge Computing, MEC) [14].

3. Архітектура NFV за стандартом ETSI

Європейський інститут телекомунікаційних стандартів (ETSI) визначив референсну архітектуру NFV, яка складається з чотирьох основних рівнів (рис. 4):

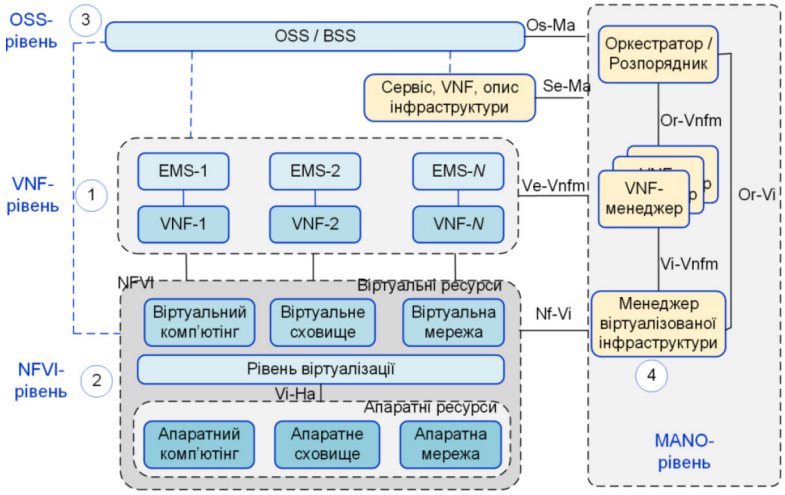


Рис. 4. Структура NFV [14]

1. Рівень віртуалізованих мережних функцій (VNF). Включає програмно реалізовані мережні функції, які виконуються у віртуальному середовищі (наприклад, віртуальний EPC, віртуальний маршрутизатор, віртуальний NAT).

2. Інфраструктурний рівень (NFVI). Складається з апаратних та програмних компонентів, що забезпечують виконання віртуальних мережних функцій. Включає:

- Фізичні ресурси: сервери, сховища даних, комутатори.
- Рівень віртуалізації: забезпечує ізоляцію та динамічне керування віртуальними машинами та контейнерами.

3. Рівень операційної підтримки (OSS/BSS). Відповідає за керування послугами, абонентською базою та білінгом.

4. Рівень управління та оркестрації (MANO). Включає три основні компоненти:

- оркестратор NFV. Відповідає за створення, розгортання та видалення віртуальних функцій у мережі;
- менеджер віртуалізованої інфраструктури (VIM). Керує ресурсами дата-центрів і MEC-вузлів;
- менеджер VNF. Відповідає за життєвий цикл кожної віртуальної функції (оновлення, моніторинг, масштабування).

4. Переваги NFV у 5G

Використання NFV у мобільних мережах нового покоління забезпечує низку ключових переваг:

– гнучкість та масштабованість. Легке розгортання нових послуг без необхідності оновлення фізичної інфраструктури;

– зниження CAPEX та OPEX. Відмова від спеціалізованого обладнання та перехід до використання стандартних серверів дозволяє значно скоротити витрати операторів;

– прискорення розгортання послуг. Динамічне управління ресурсами дозволяє операторам швидко адаптуватися до змін ринку;

– інтеграція з хмарними та периферійними обчисленнями. Використання MEC та централізованих хмарних платформ дає змогу підвищити продуктивність мережі та зменшити затримки;

– програмно-керована автоматизація. NFV тісно інтегрується з SDN, що забезпечує централізоване управління трафіком, оптимізацію маршрутів та балансування навантаження.

5. Виклики та перспективи розвитку

Незважаючи на численні переваги, впровадження NFV у 5G-мережах має низку викликів:

– високі вимоги до продуктивності. Віртуалізація функцій може призводити до затримок, тому необхідні оптимізовані рішення для обробки трафіку (наприклад, апаратне прискорення DPDK);

– забезпечення безпеки. Оскільки NFV передбачає широку інтеграцію з хмарними сервісами, необхідні нові механізми кібербезпеки;

– складність управління життєвим циклом VNF. Різні оператори використовують відмінні підходи до розгортання NFV, що вимагає розробки уніфікованих стандартів та API.

Перспективи подальших досліджень. У попередніх розділах було розглянуто роль SDN та віртуалізації в системах 5G з різних точок зору. У цьому розділі визначено напрями досліджень, які ще потребують вивчення для ефективного використання цих технологій у мережах 5G.

Одним із ключових напрямків для подальшого дослідження є розміщення мережних функцій. Розширюючи роботи [15], [16], добре розроблена

модель витрат має враховувати як вхідні дані цільові вимоги QoS:

– пропускна здатність,
– затримка,
– джитер,
– пропускну здатність,
– затримка, тощо.

Проблеми розміщення віртуальних мережних функцій (VNF) загострюються при розгляді міграції мережних функцій. Окрім часу, необхідного для встановлення однієї або декількох віртуальних машин (VM) для міграції однієї або декількох VNF з одного місця в інше, необхідно враховувати такі аспекти, як питання безпеки та цілісності середовищ SDN/NFV [17], щоб визначити загальні витрати, пов'язані з міграцією функцій.

Крім того, слід враховувати, що деякі користувацькі пристрої (UE) можуть використовувати розподіл U/C-площини або механізми DUDe [18], щоб підвищити свою надійність та/або QoS. Цей аспект ускладнює міграцію VNF через вимоги до затримки деяких мережних функцій (наприклад, HARQ).

Таке дослідження має ґрунтуватися на розгляді таких аспектів, як затримка, джитер та накладні витрати при комунікації між мережневими функціями, щоб уникнути ситуації, коли надмірна деталізація мережних функцій призведе до збільшення затримок та накладних витрат. Крім того, необхідно визначити API для комунікації між мережневими функціями, щоб забезпечити сумісність та взаємодію між ними.

Ще одним важливим аспектом, який наразі недостатньо досліджений у літературі, є продуктивність SDN та NFV в середовищах 5G. Хоча важливість цих парадигм для гарантування гнучкості, кастомізації та реконфігурованості вже добре усвідомлена, все ще бракує розуміння того, як програмні рішення зможуть забезпечити очікувані показники продуктивності в частині затримки та надійності для 5G.

Погіршення продуктивності при роботі функцій у вигляді програмного забезпечення замість апаратних рішень є добре відомою проблемою, і цей аспект має бути адекватно врахований у проєктуванні архітектури 5G-мереж. Роботи [19], [20], зробили перші кроки у цьому напрямку. Проте необхідні подальші дослідження, які враховуватимуть реалістичні сценарії розгортання мережі та навантаження трафіку, щоб визначити ключові характеристики віртуалізації (такі як оркестратор, реальний гіпервізор, ядро в реальному часі, пам'ять контейнерів та CPU-ресурси) для хмарних платформ у 5G-системах.

Ще одна дослідницька тема стосується ефективного використання SDN у архітектурі мобільних систем та терміналів. Робота [21], розглядають SDN як ключовий елемент архітектури 5G та пропонують розширення можливостей SDN-контролерів, додаючи функціональність управління мобільністю та інші вдосконалення. Це потребує додаткових досліджень для визначення того, як саме реалізовувати такі функціональні можливості.

Висновки. Необхідність у гнучкості, реконфігурованості та кастомізації в мобільних мережах 5G змушує вендорів та операторів впроваджувати нові підходи до розгортання таких мереж. У цьому контексті, SDN та віртуалізація NFV є ключовими технологіями, оскільки вони дозволяють відокремити функціональність мережі від базового обладнання, що, у свою чергу, спрощує управління мережею та її оновлення.

Представлено огляд методів віртуалізації мобільних мереж 5G, приділено увагу до рішень кожного з покоління та нововведення, які вони принесли у порівнянні з попередніми технологіями. Це дозволило визначити функціональність та мережні компоненти, які на даний момент реалізовані та розгорнуті в мобільних стільникових системах.

Розглянуто екосистему 5G, надавши детальний аналіз її застосувань.

Визначено та ідентифіковано основні вимоги до архітектури мережі 5G, які висовують сценарії її розгортання, а також проведено аналіз обмежень 4G-систем, які не дозволяють повною мірою задовольнити ці вимоги. На основі цього аналізу сформульовано набір характеристик, які необхідно враховувати під час розробки архітектури 5G, а також визначено роль віртуалізації у впровадженні цих характеристик.

Представлено результати комплексного огляду сучасного стану досліджень шляхом аналізу наявних публікацій щодо використання софтваризації та віртуалізації для реалізації мережних компонентів і функціональності 5G-систем.

Визначено ключові напрямки для подальших досліджень, які повинна розглянути наукова спільнота, щоб реалізувати повноцінну софтваризовану та віртуалізовану архітектуру мереж 5G.

Таким чином, віртуалізація мережних функцій NFV та програмно-визначені мережі SDN є одними із ключових напрямків сучасних досліджень у сфері електронних комунікацій. Вони дозволяють створювати гнучкі, масштабовані та ефективні мережі, що особливо важливо в умовах зростання вимог до швидкості, надійності та обробки даних.

Список літератури:

1. N. McKeown, T. Anderson, H. Balakrishnan, G. Parulkar, L. Peterson, J. Rexford, S. Shenker, and J. Turner, "OpenFlow: enabling innovation in campus networks," ACM SIGCOMM Computer Communication Review, vol. 38, no. 2, pp. 69–74, 2008.

2. M. HadZialic, B. Dosenovic, M. Dzaferagic, and J. Musovic, "CloudRAN: innovative radio access network architecture," in Proc. of IEEE ELMAR, Zadar, Croatia, 2013.

3. X. Jin, L. Li, L. Vanbever, and J. Rexford, "SoftCell: scalable and flexible cellular core network architecture," in Proc. of ACM CoNEXT, Santa Barbara, California, USA, 2013.

4. J. Schulz-Zander, C. Mayer, B. Ciobotaru, S. Schmid, and A. Feldmann, "OpenSDWN: Programmatic Control over Home and Enterprise WiFi," in Proc. of ACM SOSR, Santa Clara, California, USA, 2015

5. 11. P. Demestichas, A. Georgakopoulos, K. Tsagkaris, and S. Kotrotsos, Intelligent 5G Networks: Managing 5G Wire- less/Mobile Broadband, Vehicular Technology Magazine, IEEE, vol. 10, pp. 4150, Sept 2015.

6. Han, V. Gopalakrishnan, L. Ji, and S. Lee, Network function NFV: Challenges and opportunities forinnovations, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 9097, Feb 2015.

7. R. Trivisonno, R. Guerzoni, I. Vaishnavi, and D. Soldani, Towards zero latency Software Dened 5G Networks, in Communication Workshop (ICCW), 2015 IEEE International Conference on, pp. 25662571, June 2015.

8. R. Guerzoni, R. Trivisonno, and D. Soldani, SDN-based architecture and procedures for 5G networks, in 5G for Ubiquitous Connectivity (5GU), 2014 1st International Conference on, pp. 209214, Nov 2014.

9. Bradai, K. Singh, T. Ahmed, and T. Rasheed, Cellular software dened networking: a framework, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 3643, June 2015.

10. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, K. Hoffmann, and E.-D. Schmidt, A Virtual SDN-Enabled LTE EPC Architecture: A Case Study for S-/P-Gateways Functions, in Future Networks and Services (SDN4FNS), 2013 IEEE SDN for, pp. 17, Nov 2013.

11. M. Skulysh and O. Klimovych, Approach to NFV of Evolved Packet Core Network Functions, in Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics (CADSM), 2015 13th International Conference The, pp. 193195, Feb 2015.

12. F. Yousaf, J. Lessmann, P. Loureiro, and S. Schmid, SoftEPC – Dynamic instantiation of mobile core network entities for efcient resource utilization, in Communications (ICC), 2013 IEEE International Conference on, pp. 36023606, June 2013.

13. H. Ko, G. Lee, I. Jang, and S. Pack, Optimal middlebox function placement in virtualized evolved packet core systems, in Network Operations and Management Symposium (APNOMS), 2015 17th Asia-Pacic, pp. 511514, Aug 2015.

14. Kravchuk S. O. Theory of mobile infocommunication systems. System architecture: textbook. – Kyiv : Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2023. – 683c., https://ela.kpi.ua/handle/123456789/53198

15. T. Taleb, M. Bagaa, and A. Ksentini, User mobility-aware Virtual Network Function placement for Virtual 5G Network Infrastructure, in Communications (ICC), 2015 IEEE International Conference on, pp. 38793884, June 2015.

16. Basta, W. Kellerer, M. Hoffmann, H. J. Morper, and K. Hoffmann, Applying NFV and SDN to LTE Mobile Core Gateways, the Functions Placement Problem, in Proceedings of the 4th Workshop on All Things Cellular: Operations, Applications, 38; Challenges, AllThingsCellular 14, (New York, NY, USA), pp. 3338, ACM, 2014.

17. W. Ding, W. Qi, J. Wang, and B. Chen, OpenSCaaS: an open service chain as a service platform toward the integration of SDN and NFV, IEEE Network, vol. 29, pp. 3035, May 2015.

18. Mohamed, O. Onireti, M. A. Imran, A. Imran, and R. Tafazolli, Control-Data Separation Architecture for Cellular Radio Access Networks: A Survey and Outlook, IEEE Communications Surveys Tutorials, vol. 18, pp. 446465, Firstquarter 2016.

19. ETSI, Network Functions Virtualisation (NFV); Acceleration Technologies; Report on Acceleration Technologies & Use Cases. ETSI GS NFV-IFA 001, Dec 2015.

20. ETSI, Network Functions Virtualisation (NFV); Use Cases. ETSI GS NFV 001, Dec 2015.

21. F. Granelli, A. Gebremariam, M. Usman, F. Cugini, V. Stamati, M. Alitska, and P. Chatzimisios, Software dened and virtualized wireless access in future wireless networks: scenarios and standards, Communications Magazine, IEEE, vol. 53, pp. 2634, June 2015.

Skolets S. S., Kravchuk S. O. 5G NETWORK FUNCTIONS VIRTUALIZATION: APPROACHES, ARCHITECTURE AND DEVELOPMENT PROSPECTS

This paper explores the implementation of network function virtualization (NFV) and software-defined networking (SDN) in fifth-generation (5G) mobile networks. It reviews contemporary strategies for deploying these technologies, their role in enhancing network flexibility, scalability, and efficiency, as well as the primary challenges and future prospects associated with their adoption.

Objective. *The study aims to investigate architectural frameworks that facilitate the decoupling of network functions from physical hardware, enabling dynamic orchestration and automated resource management. A comprehensive analysis of various network function distribution models in 5G is presented, covering full cloud migration, C-plane offloading to the cloud, and hybrid load distribution strategies that balance processing between cloud and mobile infrastructure.*

A particular focus is placed on SDN-based network management approaches, including the segregation of control and user planes (C-plane/U-plane) and their implications for network efficiency, latency reduction, and scalability.

The article provides an overview of ongoing research in 5G standardization, highlights emerging directions for NFV and SDN advancements, and identifies critical challenges that must be addressed to ensure optimal performance and reliability in next-generation mobile networks.

Results. *The research identifies core methodologies for integrating NFV and SDN within 5G networks. Through an evaluation of existing architectural solutions, it is demonstrated that NFV minimizes reliance on proprietary hardware while increasing resource allocation flexibility. Meanwhile, SDN enhances network optimization through centralized traffic control and adaptive load balancing. The study examines three principal network function migration strategies in 5G: full cloud migration, C-plane delegation to the cloud, and a scenario-based hybrid approach. The strengths and limitations of each method are assessed in relation to network performance, latency impact, and scalability.*

Conclusions. *The findings confirm that incorporating NFV and SDN into 5G networks improves resource utilization, reduces capital and operational expenditures for service providers, and accelerates the rollout of new services. The analysis suggests that distributed architectures, dynamic network control, and resource orchestration are essential to the advancement of 5G technologies. Additionally, the study highlights key concerns related to scalability, security, and the efficiency of SDN/NFV implementations in mobile networks, emphasizing the need for continued research in these areas.*

Key words: *5G, Network Function Virtualization (NFV), Software-Defined Networking (SDN), Network Management, C-plane/U-plane, Mobile Infrastructure.*

УДК 004.415.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/24

Шпур О. М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Гаврилів Т. М.
Національний університет «Львівська політехніка»

ГІБРИДНИЙ ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ КІБЕРЗАГРОЗ У ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ IOT МЕРЕЖАХ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ЛЕГКИХ ML-МОДЕЛЕЙ

У статті пропонується гібридний підхід до ефективного виявлення та запобігання DDoS-атакам, який в умовах швидко зростаючої кількості IoT-пристроїв, дозволяє здійснювати виявлення аномалій без значного навантаження на пристрої та мережу в цілому. Його основою є розроблення алгоритму виявлення аномалій, який дозволяє комплексно підійти до оцінки та аналізу мережевого трафіку, використовуючи легкі ML модулі для забезпечення своєчасного виявлення атак. Запропонований підхід використовує багаторівневу модель системи управління, що включає рівень доступу, Edge-аналіз на серверах AWS Greengrass, SDN та хмарний штучний інтелект та дозволяє проводити аналіз трафіку ближче до джерела, мінімізуючи затримки та навантаження на центральні сервери. На Edge-рівні здійснюється перший етап аналізу за допомогою легких методів машинного навчання, серед яких ентропійний аналіз, евристичний аналіз SYN-запитів та класифікація трафіку за допомогою моделі Isolation Forest. Ці методи дозволяють ефективно ідентифікувати потенційні DDoS-атаки, спираючись на статистичні показники, такі як концентрація трафіку, частота SYN-запитів та зміни в загальному обсязі трафіку. У випадку виконання хоча б однієї з умов – чи низька величина ентропії з однієї IP адреси, чи велика кількість SYN-запитів та їх сплески – алгоритм надсилає повідомлення про блокування даної IP на рівень управління. Важливим етапом є інтеграція з керуючим рівнем SDN, де використовуються алгоритми для оперативного управління мережевим трафіком на основі отриманих результатів аналізу. SDN-контролер може реалізовує політику блокування або обмеження трафіку з даної IP-адреси, що дозволяє миттєво реагувати на виявлені загрози. Система автоматично генерує сигнал тривоги та застосовує політики захисту за умови, коли два з трьох методів виявляють аномалію. Це дозволяє значно зменшити час реакції на загрози та забезпечити ефективний захист у реальному часі. Крім того, на хмарному рівні за допомогою технологій Federated Learning і Reinforcement Learning здійснюється оптимізація політик управління та адаптація системи до нових типів атак.

Ключові слова: *DDoS-атаки, виявлення аномалій, легкі ML модулі, IoT мережі, AWS Greengrass, аналіз мережевого трафіку.*

Постановка проблеми. Сучасні телекомунікаційні системи є фундаментальною складовою критичної інфраструктури держав та бізнесу, забезпечуючи надійну комунікацію, передачу даних і підтримку роботи Інтернету речей (IoT). Стрімке зростання кількості IoT-пристроїв – за прогнозами, понад 85 мільярдів до 2026 року – призводить до появи нових можливостей та водночас збільшує ризики кібератак [1]. Серед таких загроз особливе місце займають розподілені атаки на відмову в обслуговуванні (DDoS), що використовують вразливості IoT-пристроїв для генерації масового шкідливого трафіку. Відомим прикладом таких атак є атака Mirai, яка спричинила серйозні перебої в роботі глобальних інтернет-сервісів [4].

Незважаючи на значну кількість розроблених методів виявлення і запобігання кіберзагрозам, сучасні рішення демонструють низку суттєвих недоліків, серед яких недостатня точність, висока затримка реакції та значні витрати на обчислення. Тому актуальною залишається задача розробки нових підходів, здатних ефективно функціонувати в умовах реального часу та обмежених ресурсів IoT.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні методи виявлення кіберзагроз у телекомунікаційних системах переважно базуються на сигнатурному, поведінковому та гібридному аналізах. Сигнатурні методи є ефективними для виявлення відомих атак, проте нездатні ідентифікувати нові

загрози («атаки нульового дня») [1]. Поведінкові методи, що аналізують відхилення від звичайних режимів роботи систем, ефективніші у виявленні нових атак, але характеризуються високою частотою помилкових спрацьовувань [3]. Гібридні методи поєднують переваги двох попередніх підходів, застосовуючи алгоритми машинного навчання для зменшення помилок та підвищення швидкості реагування [2]. Однак, їх практичне впровадження ускладнюється необхідністю великих обчислювальних ресурсів, які недоступні для багатьох IoT-пристроїв [5, 6].

Іншою суттєвою проблемою є затримка у виявленні атак, особливо для мереж із програмно-визначеною архітектурою (SDN). Великі обсяги даних, що передаються на центральні контролери SDN, спричиняють значні затримки у реакції на загрози. Перспективним напрямком є перенесення задач аналітики на край мережі (Edge computing), що дозволяє оперативно виявляти загрози ближче до джерела їх виникнення [6, 7].

У відповідь на вирішення цієї проблеми, було проведено багато досліджень щодо розробки механізмів захисту від атак DDoS. Серед них методи засновані на ентропії відіграють вирішальну роль. Як правило, ентропійні методи виявляють аномальну поведінку шляхом аналізу розподілу та зміни мережевого трафіку, тим самим ідентифікуючи та захищаючи від DDoS-атак [8–11]. Лі (Li) та ін. [12] запропонували метод виявлення DDoS-атак на основі φ-ентропії для раннього виявлення атак у мережах SDN. Завдяки регулюванню параметрів φ-ентропії цей метод підсилює відмінності між нормальними та ненормальними характеристиками трафіку, полегшуючи виявлення атак на ранніх стадіях формування трафіку DDoS. Анчал (Anchal) та ін. [13] використовували ентропію Реньї для виявлення атак DDoS, підвищуючи точність виявлення та ефективність шляхом вибору відповідних порогів.

Методи, засновані на цінності довіри, також відіграють важливу роль у виявленні атак DDoS. Ці методи оцінюють поведінку та історію взаємодії вузлів, щоб визначити їхню надійність, тим самим ідентифікуючи та захищаючи від шкідливих атак [14, 15]. Наприклад, Магдіч (Magdich) та ін. [16] запропонував модель управління довірою, яка не тільки ідентифікує довірені вузли, але також використовує методи машинного навчання для виявлення та запобігання зловмисним атакам шляхом вивчення характеристик поведінки зловмисного вузла. В іншому дослідженні Вафа (Wafa) та ін. [17] запропонував модель управління довірою, яка аналізує поведінку взаємодії вузлів і призначає розумні значення довіри для виявлення атак. Крім того, Хуан (Juan) та ін. [18] використовували математичні моделі та статистичний аналіз для виявлення аномального трафіку, тоді як Баскар (Baskar) [19] поєднав методи аналізу великих даних для точної ідентифікації та захисту від складних DDoS-атак.

Незважаючи на те, що ці методи показали чудову продуктивність у виявленні DDoS-атак, вони все ще мають деякі недоліки щодо поточних складних типів DDoS-атак [20]. Наприклад, використання фіксованих порогів може бути недостатньо гнучким при роботі з динамічними DDoS-атаками, що призводить до зниження ефективності виявлення. Методи, запропоновані в [12, 13], недостатньо точні при атаках з низькою щільністю. Так само методи, описані в [16, 17], не реагують швидко в динамічних мережевих середовищах. Крім того, оскільки методи атак продовжують розвиватися, ці методи потребують постійного оновлення та вдосконалення, щоб адаптуватися до нових проблем безпеки мережі.

В останні роки методи глибокого навчання поступово передовими для дослідників у галузі DDoS [21–23]. Крім того, машинне навчання – це метод, здатний автоматично вивчати моделі з даних і робити прогнози. Використання глибоких нейронних мереж для виявлення кібератак ускладнюється їх значними обчислювальними витратами, що робить їх неефективними для IoT-пристроїв із обмеженими ресурсами. Оптимізація таких мереж шляхом застосування легких архітектур, методів компресії моделей, transfer learning та federated learning є перспективним шляхом подолання цієї проблеми [5, 6, 8].

Для ефективного захисту сучасних телекомунікаційних систем, особливо в умовах IoT, необхідна адаптація існуючих методів до реальних умов функціонування пристроїв, враховуючи їх динамічність, різноманітність і обмеженість ресурсів [7, 8].

Постановка завдання. Таким чином, метою роботи є розроблення та дослідження ефективної архітектури телекомунікаційної системи для виявлення і запобігання DDoS-атакам в умовах функціонування Інтернету речей (IoT). Особлива увага приділяється розробці методу для раннього виявлення аномалій у трафіку IoT-пристроїв за допомогою легких машинних навчальних моделей, що дозволить забезпечити оперативне реагування на кіберзагрози, зокрема в умовах обмеженості програмно-апаратних ресурсів пристроїв мережі.

Виклад основного матеріалу. Запропонована архітектура телекомунікаційної системи (ТКС)

є складним багаторівневим рішенням, орієнтованим на швидке виявлення та ефективне протистояння різноманітним мережевим загрозам, особливо DDoS-атакам. Сучасні IoT-пристрої генерують величезні обсяги трафіку, що вимагає комплексного підходу до його аналізу та обробки. Саме тому у запропонованій системі використовується розподілена архітектура, яка складається з кількох функціонально взаємопов'язаних рівнів (рис. 1):

- Рівень доступу (Access Layer).
- Edge-рівень (AWS Greengrass).
- Рівень керування (SDN Control Plane, контролер Ryu).
- Верхній рівень, що базується на штучному інтелекті (Cloud AI).

Кожен рівень має чітко визначені функції, специфічні алгоритми аналізу й особливий тип інформації, яка збирається, аналізується та передається між рівнями.

Рівень доступу (Access Layer) – найнижчий рівень архітектури, який складається із великої кількості IoT-пристроїв, які забезпечують генерацію первинного трафіку. Ці пристрої, як правило, мають мінімальні обчислювальні можливості, відсутній складний вбудований захист, тому є найбільш вразливими для атак і використання в якості інструментів для реалізації DDoS.

Серед типових пристроїв цього рівня: датчики руху, камери відеоспостереження, датчики температури, освітлення, мобільні термінали, смартфони, сенсорні пристрої розумного дому. Вони

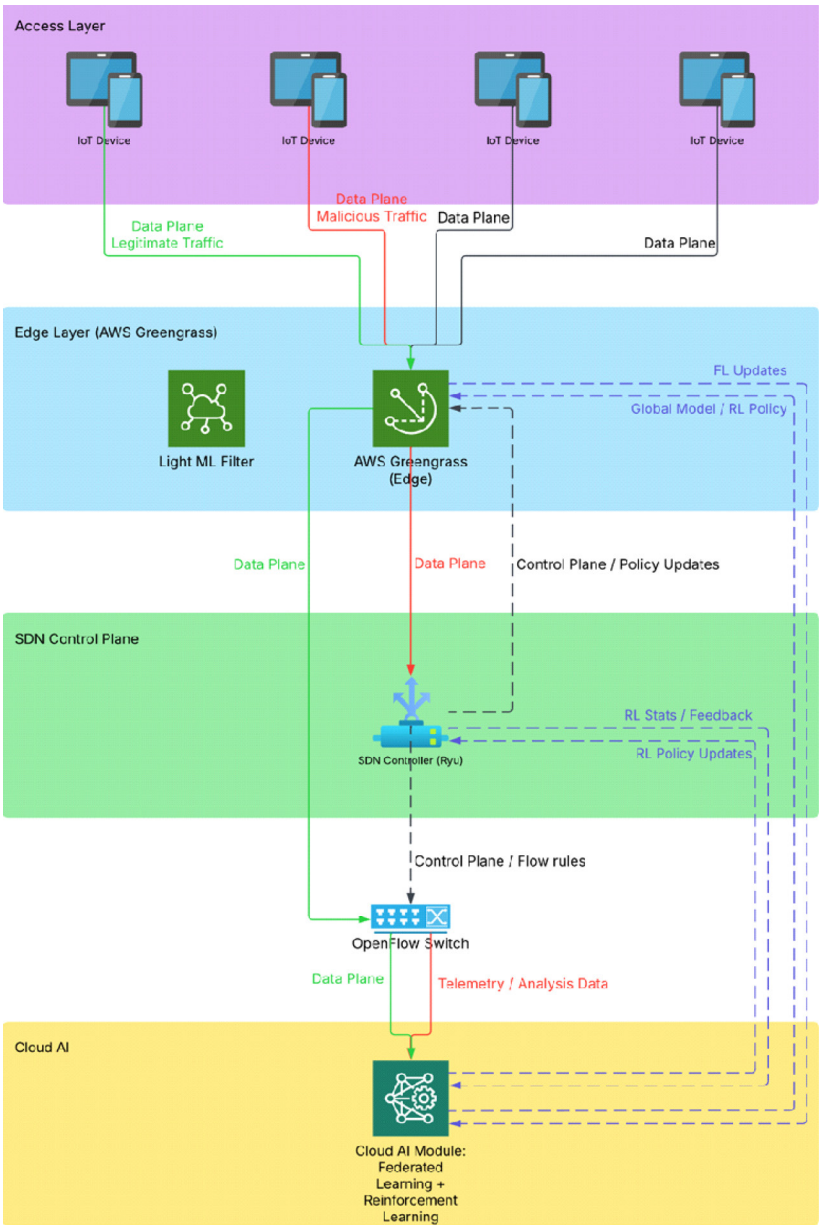


Рис. 1. Архітектура IoT-мережі з системою виявлення аномалій

безперервно передають великий обсяг трафіку, що містить як легітимні, так і потенційно шкідливі пакети. Основними протоколами, які застосовуються на цьому рівні, є TCP, UDP та ICMP, серед яких особливе значення мають TCP SYN-запити, оскільки саме їхня кількість часто використовується зловмисниками при SYN Flood атаках.

Трафік із цього рівня не проходить ніякої аналітики безпосередньо на пристроях. Усі пакети без будь-якої попередньої фільтрації чи класифікації надходять до наступного рівня – Edge-серверів AWS Greengrass.

Edge-рівень є критично важливим компонентом запропонованої архітектури, оскільки саме тут здійснюється перший етап аналізу та фільтрації. На цьому рівні використовуються сервери AWS Greengrass – платформа, яка спеціально призначена для ефективної роботи в умовах обмежених ресурсів. Edge-сервери отримують трафік безпосередньо з IoT-пристроїв, виконують його аналіз та первинну фільтрацію.

На Edge-рівні впроваджується легкий ML-фільтр, який містить у собі декілька аналітичних модулів, зокрема:

- Ентропійний аналіз: дозволяє оцінити концентрацію трафіку за IP-адресами й швидко ідентифікувати DDoS-атаки за їхнім характерним профілем – надмірною концентрацією або надмірною розподіленістю пакетів.
- Евристичний аналіз SYN-запитів: цей модуль орієнтований на швидке виявлення SYN Flood атак шляхом оцінки поточної кількості SYN-запитів та їхнього відхилення від нормального режиму роботи мережі.
- Isolation Forest: легка модель машинного навчання, яка дозволяє класифікувати трафік за набором параметрів як нормальний або аномальний.

Edge-сервер Greengrass виконує ці аналізи кожні 60 секунд (ковзне вікно аналізу), збираючи статистичні дані, серед яких:

- IP-адреси джерел і призначень;
- TCP та UDP порти;
- частота SYN-запитів;
- загальна кількість пакетів;
- розподіл трафіку за типами протоколів.

Якщо Edge-рівень виявляє очевидну аномалію, він формує сигнал тривоги, до якого додаються метадані (тип атаки, IP-порушники, статистичні показники трафіку). Цей сигнал передається до наступного рівня – SDN Control Plane, на контролер Ryu, який має повноваження впроваджувати оперативні правила управління трафіком.

Рівень керування (SDN Control Plane, Ryu) є центральним координаційним рівнем, де SDN-контролер Ryu отримує інформацію з Edge-рівня, аналізує її та ухвалює рішення щодо подальших дій у мережі. Контролер Ryu є гнучким рішенням, написаним мовою Python, що дозволяє йому ефективно взаємодіяти з різними аналітичними системами.

Отримавши сигнал від Edge-рівня, контролер визначає тип загрози і застосовує правила керування потоками (блокування трафіку, обмеження швидкості, зміна маршрутів), використовуючи протокол OpenFlow та мережеві комутатори.

Крім цього, SDN-контролер передає на верхній рівень (Cloud AI) статистичні дані щодо ефективності застосованих політик і отримує від нього рекомендації щодо їх вдосконалення.

Cloud AI: Federated Learning ma Reinforcement Learning – є найвищим рівнем розробленої архітектури. Це хмарне середовище, в якому реалізуються складні методи штучного інтелекту: Federated Learning (FL) і Reinforcement Learning (RL). Federated Learning дозволяє створювати глобальну ML-модель на основі агрегування оновлених ваг локальних моделей із Edge-рівня. Це дає змогу Edge-вузлам зберігати актуальність моделей без передачі чутливих даних до хмари.

Reinforcement Learning, натомість, аналізує ефективність політик, застосованих контролером Ryu, і на основі зворотного зв'язку виробляє оптимальні стратегії управління трафіком. Сформовані політики повертаються до SDN-контролера та Edge-серверів для їх впровадження.

Для пропонованої архітектури функціонування IoT мережі ми розробили алгоритм роботи легких ML-модулів для виявлення аномалій на EDGE-серверах. Ефективне виявлення атак повинно здійснюватися якомога ближче до джерела трафіку, щоб уникнути зайвого навантаження на хмарні та центральні сервери. Саме з цією метою розроблений алгоритм виявлення аномалій працює безпосередньо на AWS Greengrass. AWS Greengrass є проміжним (Edge) вузлом, який має достатні обчислювальні можливості для початкової аналітики, проте має обмеження щодо ресурсів процесора та пам'яті. Враховуючи ці обмеження, алгоритм був спеціально розроблений для максимально ефективного використання ресурсів. Він включає три взаємопов'язані методи аналізу:

- ентропійний аналіз розподілу пакетів за IP-адресами;
- евристичний аналіз частоти SYN-запитів та різких змін у кількості трафіку;

• класифікація за допомогою легкої ML-моделі Isolation Forest.

Ентропійний аналіз розподілу пакетів буде відбуватися за кількісної оцінки неоднорідності розподілу пакетів між IP-адресами. Зазвичай під час DDoS-атак трафік характеризується або надмірною концентрацією (низька ентропія), або надмірною розподіленістю (висока ентропія). В загальному випадку, ентропія Шеннона враховує частку трафіку, що надійшла від IP-адреси p_i та загальну кількість унікальних IP-адрес N, що надіслали пакети за визначений інтервал часу.

$$E = -\sum_{i=1}^{N} p_i \log_2 p_i.$$

Наприклад, якщо за 60 секунд ми отримали 10 000 пакетів, і вони розподілилися таким чином:

• IP-адреса 1: кількість пакетів – 7000; частка p_i – 0.7;

• IP-адреса 2: кількість пакетів – 1500; частка p_i – 0.15;

• IP-адреса 3: кількість пакетів – 1000; частка p_i – 0.1;

• IP-адреса 4: кількість пакетів – 500; частка p_i – 0.05;

Тоді ентропія дорівнюватиме:

$$E = -(0.7 \log_2 0.7 + 0.15 \log_2 0.15 + 0.1 \log_2 0.1 + \\ + 0.05 \log_2 0.05) \approx 1.36.$$

Отримане значення порівнюється з порогом, встановленим на основі історичних даних (наприклад, середня ентропія за тиждень – 3.2, тоді порогове значення береться на 15 % нижче, тобто 2.72). Значення 1.36 значно менше за 2.72, отже є ознакою потенційної атаки. В нашому випадку Edge-сервер кожні 60 секунд буде аналізувати IP-адреси (джерела та призначення); TCP/UDP порти; кількість пакетів за типами протоколів (TCP, UDP, ICMP); загальну кількість SYN-запитів, а також проводиться підрахунок часток пакетів (p_i) для кожної IP-адреси. Далі іде порівняння розрахованих значень із даними отриманими в попередні моменти часу.

Наступним етапом є евристичний аналіз. Він матиме кілька складових. Перша – перевірка кількості SYN-запитів: якщо перевищення середнього значення за попередній тиждень на 25 % і більше, то визначається можливий SYN Flood. Другий – проводиться аналіз різкого зростання трафіку: якщо кількість пакетів перевищує більш ніж вдвічі середнє значення за попередні три інтервали часу, генерується сигнал про виявлення аномалії.

Далі відбуватиметься класифікація за допомогою легкої ML-моделі Isolation Forest. Isolation Forest отримавши значення ентропії, кількості SYN-запитів, загальної кількості пакетів, співвідношення кількості пакетів поточного інтервалу до середнього за попередні три дні. Isolation Forest оцінює ці показники й видає оцінку аномалії (score). Якщо значення score < 0.3 – це свідчить про наявність аномалії.

Якщо хоча б два з трьох методів оцінки (ентропійний аналіз, евристичний аналіз, Isolation Forest) вказують на аномалію, система автоматично:

• надсилає сигнал тривоги на SDN-контролер Ryu;

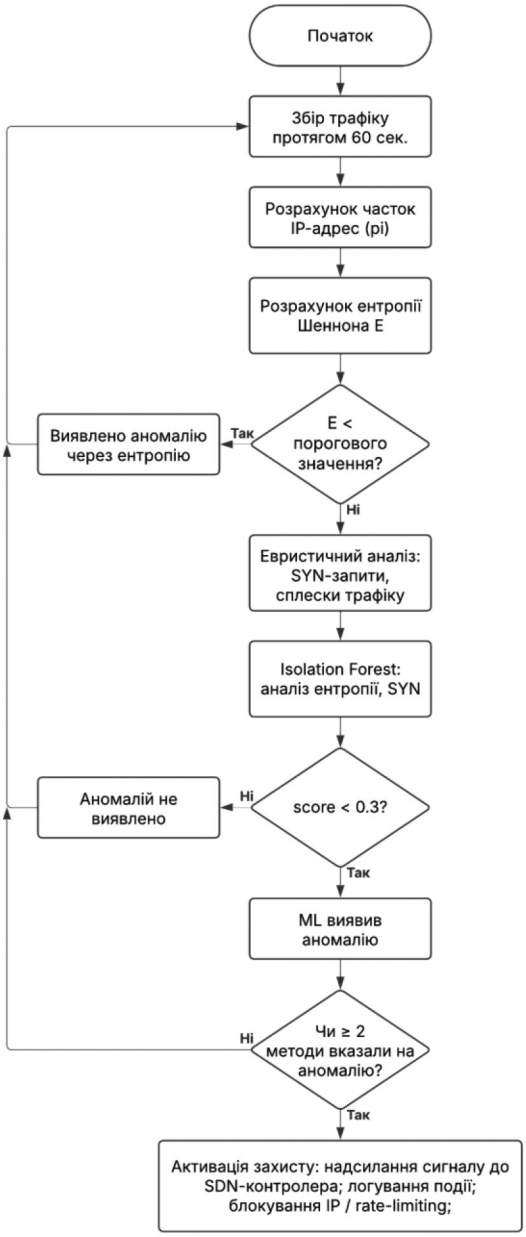


Рис. 2. Блок-схема алгоритму виявлення аномалій на Edge-сервері

• записує детальну інформацію в журнал подій;

• застосовує політики блокування або обмеження трафіку.

Блок-схема розробленого алгоритму наведена на рисунку 2.

Висновки. Проведений аналіз сучасних викликів інформаційної безпеки у сфері телекомунікаційних систем та Інтернету речей (IoT) дозволив визначити ключові проблеми виявлення кіберзагроз, особливо DDoS-атак. Основними недоліками існуючих методів є низька точність виявлення нових атак, високі обчислювальні витрати та затримки реагування у централізованих системах.

Запропоновано багаторівневу архітектуру, яка використовує переваги Edge computing, легкі алгоритми машинного навчання (Isolation Forest, евристичний та ентропійний аналіз) та сучасні підходи Federated Learning і Reinforcement Learning. Це дозволило суттєво зменшити затримку реагування, підвищити точність виявлення атак, особливо низькоінтенсивних (Low-rate) DDoS, та забезпечити ефективну роботу системи в умовах обмежених ресурсів IoT-пристроїв.

Практичне значення запропонованого рішення полягає у високій адаптивності та масштабованості, що дає змогу оперативно реагувати на нові типи кіберзагроз та легко інтегрувати додаткові пристрої чи аналітичні модулі. Подальші дослідження рекомендується зосередити на вдосконаленні алгоритмів машинного навчання та посиленні стійкості систем до інтенсивних і тривалих атак.

Список літератури:

1. Lali M, Mustafa R, Ahsan F, Nawaz M, Aslam W. Performance evaluation of software defined networking vs. Traditional networks. Nucleus. 2017, No. 54(1), pp. 6–22.

2. Douligeris C, Mitrokotsa A. DDoS attacks and defense mechanisms: classification and state-of-the-art. Comput Netw. 2004, No 44(5), pp. 643–666.

3. Turner J. The year of widespread SDN adoption and DDoS attack mitigation, 2017. Available from: https://surl.li/hcrqoy

4. Kavisankar L, Chellappan C. A mitigation model for TCP SYN flooding with IP spoofing. Paper presented at: Proceedings of the 2011 International Conference on Recent Trends in Information Technology (ICRTIT); 2011. pp. 251–256.

5. Lim S, Ha J, Kim H, Kim Y, Yang S. A SDN-oriented DDoS blocking scheme for botnet-based attacks. Paper presented at: Proceedings of the 2014 6th International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN); 2014. pp. 63–68.

6. Dayal N, Srivastava S. Analyzing behavior of DDoS attacks to identify DDoS detection features in SDN. Paper presented at: Proceedings of the 2017 9th International Conference on Communication Systems and Networks (COMSNETS); 2017. pp. 274–281.

7. Chen CC, Chen YR, Lu WC, Tsai SC, Yang MC. Detecting amplification attacks with software defined networking. Paper presented at: Proceedings of the 2017 IEEE Conference on Dependable and Secure Computing; 2017. Taipei, Taiwan. pp. 195–201.

8. Kamolphiwong S., Kamolphiwong T. The design of SDN based detection for distributed denial of service (DDoS) attack. Paper presented at: Proceedings of the 2017 21st International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC); 2017. Bangkok, Thailand: IEEE. pp. 1–5.

9. Dayal N., Srivastava S. SD-WAN flood tracer: tracking the entry points of DDoS attack flows in WAN. Comput Netw. 2021; 186:107813.

10. Ryhan Uddin, Sathish A. P. Kumar, Vinay Chamola. Denial of service attacks in edge computing layers: Taxonomy, vulnerabilities, threats and solutions. Ad Hoc Networks. 2024; 152(11):103322.

11. Yin C, Zhu Y, Fei J, He X. Collaborative prediction and detection of DDoS attacks in edge computing: A deep learning-based approach with distributed SDN. IEEE Trans Inf Forensics Secur. 2020; 15:4169–4183.

12. Doshi R, Apthorpe N, Feamster N. SmartDefense: A distributed deep defense against DDoS attacks with edge computing. Paper presented at: Proceedings of the ACM SIGCOMM Workshop on IoT Security and Privacy; 2018.

13. Alwarafy A., Al-Thelaya KA, Abdallah M., Schneider J., Hamdi M. Denial of service attacks in edge computing layers: Taxonomy, vulnerabilities, threats and solutions. ACM Comput Surv. 2021; 54(5):1–36.

14. Luong NC, Hoang DT, Gong S, Niyato D, Wang P., Liang YC, Kim DI. Detection and prevention of DDoS attacks on edge computing of IoT devices through reinforcement learning. IEEE Internet Things J. 2019; 7(5):4202–4213.

15. Gadze JD, Bamfo-Asante AA, Agyemang JO, Nunoo-Mensah H, Opare KAB. An investigation into the application of deep learning in the detection and mitigation of DDOS attack on SDN controllers. *Technologies*. 2021; 9(1):14.

16. Xie J, Yu FR, Huang T., et al. A survey of machine learning techniques applied to software defined networking (SDN): research issues and challenges. *IEEE Commun Surv Tutor*. 2018; 21(1):393-430.

17. Braga R., Mota E., Passito A.. Lightweight DDoS flooding attack detection using NOX/OpenFlow. Paper presented at: Proceedings of the IEEE Local Computer Network Conference. Denver, CO, USA: IEEE; 2010:408-415.

18. Hu D, Hong P, Chen Y. FADM: DDoS flooding attack detection and mitigation system in software-defined networking. Paper presented at: Proceedings of the GLOBECOM 2017–2017 IEEE Global Communications Conference. IEEE: Singapore; 2017:1–7.

19. Chen Z, Jiang F, Cheng Y, Gu X, Liu W, Peng J. XGBoost classifier for DDoS attack detection and analysis in SDN-based cloud. Paper presented at: Proceedings of the 2018 IEEE International Conference on Big Data and Smart Computing (BIGCOMP). Shanghai, China: IEEE; 2018:251–256.

20. Dayal N., Srivastava S. Leveraging SDN for early detection and mitigation of DDoS attacks. Paper presented at: Proceedings of the International Conference on Communication Systems and Networks; 2018: 52–75; Springer, New York, NY.

21. Myint Oo M, Kamolphiwong S, Kamolphiwong T, Vasupongayya S. Advanced support vector machine-(ASVM-) based detection for distributed denial of service (DDoS) attack on software defined networking (sdn). *J Comput Netw Commun*. 2019; 2019:1–12.

22. Rahman O, Quraishi MAG, Lung CH. DDoS attacks detection and mitigation in SDN using machine learning. Paper presented at: Proceedings of the 2019 IEEE World Congress on Services (SERVICES). Milan, Italy: IEEE; Vol. 2642; 2019: 184–189.

23. Shakil M, Fuad Yousif Mohammed A, Arul R, Bashir AK, Choi JK. A novel dynamic framework to detect DDoS in SDN using metaheuristic clustering. *Trans Emerg Telecommun Technol*. 2019;33:e3622.

Shpur O. M., Havryliv T. M. HYBRID APPROACH TO ANOMALY DETECTION IN TELECOMMUNICATION IOT NETWORKS USING LIGHTWEIGHT ML MODELS

The article proposes a hybrid approach for effective detection and prevention of DDoS attacks, which, in the context of the rapidly growing number of IoT devices, enables anomaly detection without placing significant load on the devices and the network as a whole. The core of the approach is the development of an anomaly detection algorithm that allows a comprehensive evaluation and analysis of network traffic, using lightweight ML modules to ensure timely attack detection. The proposed approach uses a multi-layer model of the management system, which includes the access level, Edge analysis on AWS Greengrass servers, SDN, and cloud artificial intelligence, and allows traffic analysis to be performed closer to the source, minimizing delays and load on central servers. At the Edge level, the first stage of analysis is performed using lightweight machine learning methods, such as entropy analysis, heuristic analysis of SYN requests, and traffic classification using the Isolation Forest model. These methods effectively identify potential DDoS attacks, relying on statistical indicators such as traffic concentration, SYN request frequency, and changes in overall traffic volume. If at least one of the conditions is met – either a low entropy value from a single IP address, a high number of SYN requests, or spikes in them – the algorithm sends a notification to block the IP at the management level. An important stage is the integration with the SDN control level, where algorithms are used for real-time traffic management based on the obtained analysis results. The SDN controller can implement policies to block or limit traffic from the given IP address, allowing an immediate response to detected threats. The system automatically generates an alarm signal and applies protection policies when two out of three methods detect an anomaly. This significantly reduces response time to threats and ensures effective real-time protection. Additionally, at the cloud level, using Federated Learning and Reinforcement Learning technologies, the optimization of management policies and adaptation of the system to new types of attacks is carried out.

Key words: *DDoS attacks, anomaly detection, lightweight ML modules, IoT networks, AWS Greengrass, network traffic analysis.*

УДК 621.396.946: 629.783
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/25

Юсипів Т. В.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

Курилко О. Б.
Київський національний університет імені Тараса Шевченка

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБАСТНОЇ СТІЙКОСТІ ГРАНИЧНИХ РЕЖИМІВ У СИСТЕМАХ ТИПУ РЕАКЦІЇ-ДИФУЗІЇ З РОЗПОДІЛЕНОЮ ПЕРЕДАЧЕЮ СИГНАЛУ

Стаття присвячена дослідженню робастної стійкості телекомунікаційних систем до просторово розподілених електромагнітних перешкод зі складною спектральною структурою. Основний підхід базується на математичному моделюванні за допомогою систем реакції-дифузії, які описують динаміку сигналів у середовищах зі змінними параметрами. Метою роботи є аналіз стійкості граничних режимів цих систем за наявності зовнішніх збурень.

У фокусі дослідження – дисипативні системи, які в незбуреному стані мають глобальний атрактор. При введенні зовнішнього сигналу система стає неавтономною, що ускладнює аналіз її поведінки. Ключовим завданням є оцінка відхилення траєкторій системи від положення рівноваги – глобального атрактора. Для цього використовується теорія стійкості від входу до стану (input-to-state stability, ISS), яка пропонує два типи оцінок: локальну (local ISS) та нелокальну (асимптотичне підсилення, asymptotic gain, AG). Ці оцінки дозволяють кількісно охарактеризувати відхилення траєкторій залежно від амплітуди зовнішнього сигналу.

Особливістю роботи є аналіз систем із негладкими нелінійностями, для яких не гарантується єдиність розв'язків. Для цього застосовуються многозначні напівпотоки та напівпроцеси, а також теорія рівномірних атракторів. Використовується результат про напівнеперервну зверху залежність від параметра, що дозволяє досліджувати поведінку системи в умовах змінних зовнішніх впливів.

Результати дослідження застосовні до широкого класу моделей, таких як системи ФіцХ'ю–Нагумо, багатовимірні системи Лотки–Вольтерра з дифузією та інші моделі реакції-дифузії. Запропоновані методи сприяють підвищенню надійності телекомунікаційних систем в умовах непередбачуваних збурень. Крім того, отримані оцінки стійкості можуть бути використані для оптимізації роботи систем зв'язку, що функціонують у складних електромагнітних середовищах, а також для розробки нових алгоритмів адаптивного керування, які забезпечують стійкість до зовнішніх впливів.

Ця робота відкриває перспективи для подальших досліджень у сфері моделювання складних нелінійних систем, зокрема в контексті їхньої стійкості до багатовимірних і нестаціонарних збурень, що є актуальним для сучасних телекомунікаційних технологій.

Ключові слова: *сигнал, система реакції-дифузії, глобальний атрактор, робастність, стійкість.*

Постановка проблеми. Підвищення стійкості телекомунікаційних каналів і ефективності систем передавання сигналів та інформації є однією з найактуальніших проблем сучасної теорії й техніки комунікаційних та інформаційних технологій. Джерела промислових і побутових перешкод дуже різноманітні, і їх кількість постійно зростає. Це зумовлено тим, що під час роботи будь-якого електромагнітного пристрою виникає електромагнітне випромінювання. Перешкоди створюють побутові прилади, електрообладнання, високовольтні лінії електропередачі, промисловий електротранспорт тощо. При цьому джерела електромагнітного випромінювання розподілені у просторі довільно та хаотично, а їхній вплив тим сильніший, чим ближче вони розташовані до телекомунікаційного обладнання.

З погляду електромагнітної сумісності, під зовнішніми перешкодами розуміють випромінювання, створювані в широкому діапазоні частот зовнішніми джерелами найрізноманітнішої природи щодо телекомунікаційних пристроїв і комплексів. Такими джерелами можуть бути різні елементи технічних систем, що створюють електромагнітні поля. Найбільш небезпечними для систем передавання сигналів є ті пристрої, які генерують шкідливі сигнали зі складовими у тому самому частотному діапазоні, що й корисний сигнал. Такі компоненти легко проходять через вхідні фільтри приймальних пристроїв, обробляються

так само, як і корисний сигнал, і, таким чином, спотворюють інформацію.

Інтенсивність, частотні характеристики та спектральні властивості технічних шумів дуже різноманітні. Це можуть бути як випадкові електромагнітні збурення, так і функції, які періодично повторюються в часі. У таких умовах, окрім дифракційних явищ, починають проявлятися й процеси дифузії. Чим «гетерогенніше» середовище функціонування телекомунікаційної системи, тим суттєвіший вплив дифузійних процесів на її стійкість до збурень.

Захищеність – це здатність телекомунікаційних систем функціонувати ефективно попри дію різного роду перешкод. Робота всіх елементів таких систем і комутаційних пристроїв неминуче супроводжується паразитним випромінюванням з різними частотними та енергетичними характеристиками. У сучасних умовах кількість і складність телекомунікаційних систем стрімко зростає, а разом із ними – і кількість джерел перешкод. Зростаюча складність телекомунікаційних систем лише підсилює потребу в розробці математичних моделей, здатних адекватно описувати динаміку в умовах постійної дії просторово-розподілених збурень. Також важливим завданням є оцінка відхилень динаміки таких систем у відповідь на зовнішні збурення, що дозволяє гарантувати їхню надійність та функціональність у реальних умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системи типу реакції-дифузії природним чином виникають у математичному моделюванні телекомунікаційних процесів, зокрема при описі динаміки сигналів у складних середовищах із просторово розподіленими збуреннями. Прикладами таких збурень є електромагнітні перешкоди, що створюються побутовими приладами, промисловим обладнанням, електротранспортом тощо. Джерела таких перешкод є розподіленими, непередбачуваними й охоплюють широкий діапазон частот, що ускладнює фільтрацію шкідливих сигналів.

Перешкоди та шуми в телекомунікаційних системах також можуть зумовлювати виникнення певних класів автоколивань. Поряд із добре відомими автоколиваннями, які описуються класичною моделлю Ван дер Поля, ми стикаємося з ситуаціями, що найповніше описуються моделлю ФіцХ'ю–Нагумо [1]:

$$\begin{cases} u_t = au_{xx} + \sigma v - \gamma u \\ v_t = v_{xx} + f(v) - u \end{cases}.$$

Ці моделі лежать в основі аналізу стійкості та робастності динаміки телекомунікаційних систем у змінних і складних середовищах. Модель ФіцХ'ю–Нагумо є спрощеною двовимірною версією моделі Ходжкіна–Гакслі [2], яка детально описує динаміку імпульсного нейрона. В оригінальних статтях ФіцХ'ю ця система називалася осцилятором Бонхеффера–Ван дер Поля, оскільки включає осцилятор Ван дер Поля як окремий випадок.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження стійкості граничних режимів у загальних системах типу реакції-дифузії, окремим випадком яких є модель ФіцХ'ю–Нагумо. У дисипативних еволюційних системах такі режими зазвичай описують у термінах глобального атрактора [3, 4]. Для задач, де не гарантовано єдиність чи регулярність розв'язків, а також для задач керування з сингулярними збуреннями, відповідну теорію було розроблено в [5–10].

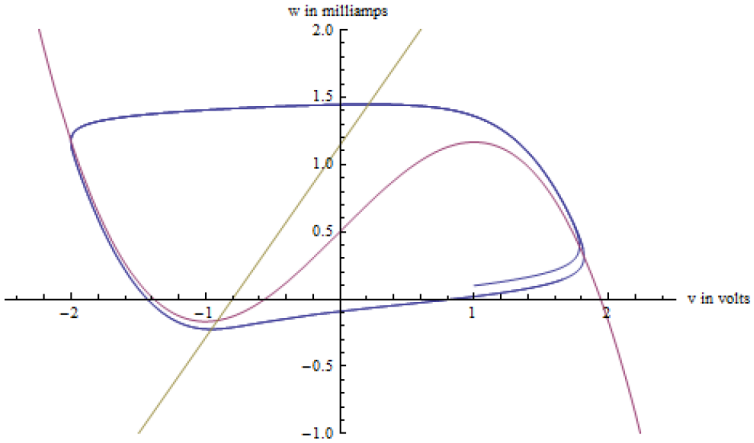


Рис. 1. Траєкторія моделі ФіцХ'ю–Нагумо у фазовому просторі (синя лінія), кубічна нулькліна (рожева лінія), лінійна нулькліна (жовта лінія)

Якщо автономна система з глобальним атрактором зазнає дії зовнішніх сигналів (збурень), постає природна задача – оцінити відхилення траєкторії збуреної системи від глобального атрактора незбуреної системи як функцію величини сигналу. Для таких оцінок в статті використовується теорія стійкості від входу до стану (input-to-state stability, ISS) [11], яку нещодавно було поширено на нескінченновимірні системи з нетривіальними атракторами [12–14]. Оцінка встановлюється в термінах функцій порівняння [15].

Робастна стійкість може виражатися в різних підходах [16], проте в цій роботі використовуються два ключові з них, які є взаємодоповнюючими:

1) локальна стійкість у сенсі входу до стану (local ISS);

2) стійкість у сенсі асимптотичного підсилення (asymptotic gain, AG).

При цьому, оцінка робастної стійкості системи реакції-дифузії з негладкими функціями взаємодії (що не гарантують єдиності розв'язків) наводиться у природних нескінченновимірних фазових просторах.

Виклад основного матеріалу. В обмеженій області $\Omega \subset \mathbb{R}^n$ розглядається наступна система типу реакції-дифузії

$$\begin{cases} y_t = a\Delta y - f(y) + h(x) + d,\ x \in \Omega, t > 0, \\ y|_{\partial\Omega} = 0, \end{cases} \tag{1}$$

де $y = y(t, x) = (y^1(t, x), \ldots, y^N(t, x))$ – невідома вектор-функція, $f = (f^1, \ldots, f^N)$, $h = (h^1, \ldots h^N)$ – задані вектор-функції, a – дійсна матриця розмірності $N \times N$ така, що $\frac{1}{2}(a + a^*) \geq \mu I, \mu > 0$, $d = (d^1, \ldots, d^N)$ – вхідні збурення (сигнали).

Припускається, що функція $h \in (L^2(\Omega))^N, g(y) = (g^{ij})_{i,j=1}^N$ – задана матричнозначна функція, а також існують сталі C_1, C_2, C_3, $C_4 > 0$, $\gamma_i > 0$, $p \geq 2$, де $i = \overline{1, N}$ такі, що для будь-яких векторів $v \in \mathbb{R}^N$ виконуються наступні властивості:

$$\sum_{i=1}^N \left|f^i(v)\right|^{\frac{p_i}{p_i - 1}} \leq C_1\left(1 + \sum_{i=1}^N \left|v^i\right|^{p_i}\right),$$
$$\sum_{i=1}^N f^i(v)v^i \geq \sum_{i=1}^N {}_i \left|v^i\right|^{p_i} - C_2; \tag{2}$$

$$\left\|g(v)\right\|^2 := \sum_{i,j=1}^N \left|g^{ij}(v)\right|^2 \leq C_3, Df(v) \geq C_4 \tag{3}$$

Нехай $H = (L^2(\Omega))^N$, $\|d\|_\infty = esssup_{t \geq 0}|d(t)|_H$, θ – глобальний атрактор, породжений напівгрупою $S : \mathbb{R}_+ \times H \mapsto H$, причому

$S(t, y_0) = \{y(t)|y(\cdot)$ – глобальний слабкий розв'язок (1) при $d \equiv 0$, $y(0) = y_0\}$,

$\|y\|_\Theta = \inf_{\theta \in \Theta}\|y - \theta\|_H$, а також наступні добре відомі класи порівняння для функцій [17]: $\mathcal{K} = \{\gamma \in C(\mathbb{R}_1)|\gamma(0) = 0, \gamma$-строгозростаюча$\}$, $\mathcal{KL} = \{\beta \in C(\mathbb{R}_+ \times \mathbb{R}_+) \mid \beta(\cdot, t) \in \mathcal{K}, \beta(s, \cdot) \searrow 0\}$.

У випадку $d \equiv 0$ задача (1) є автономною, тому у фазовому просторі системи існує стійке положення рівноваги – глобальний атрактор Θ, тобто компактна, інваріантна рівномірно притягуюча множина станів. При цьому, за наявності ненульового збурення d задача (1) вже не є автономною і для оцінки відхилення її траєкторій від положення рівноваги застосовуються два методи:

1) для локальної оцінки в сенсі ISS – теорія многозначних напівпотоків та функції типу Ляпунова [12, 13];

2) для глобальної оцінки в сенсі AG – теорія многозначних напівпроцесів, теорія рівномірних атракторів та результат про напівнеперервну зверху залежність від параметра [14, 17].

В роботі [18] згадані результати наведені для загального випадку еволюційних систем, для яких не гарантована єдиність розв'язку.

Основний результат даної статті формулюється у наступному вигляді.

Теорема. *Задача* (1)

(i) [19] з $f \in C(\mathbb{R}^N; \mathbb{R}^N)$, $d = d(t, x) \in L^\infty(\mathbb{R}_+, H)$ та за виконання умов (2) має властивість асимптотичного підсилення (AG) по відношенню до атрактора Θ, тобто, $\exists R_0 > 0$, $\gamma \in \mathcal{K}$ такі, що $\forall y_0 \in H$, $\forall \|d\|_\infty \leq R_0$

$$\overline{\lim}_{t \to \infty} \left\|y(t, y_0, d)\right\|_\Theta \leq \gamma(\left\|d\right\|_\infty);$$

(ii) [20] $f \in C^1(\mathbb{R}^N; \mathbb{R}^N)$, $d = g(y)d(t)$, $d(t) \in L^\infty(\mathbb{R}_+, H)$ та за виконання умов (2), (3) має властивість локальної стійкості від входу до стану (local ISS) по відношенню до атрактора Θ, тобто, існують $r > 0$, $\beta \in \mathcal{KL}$ та $\gamma \in \mathcal{K}$ такі, що $\forall\|y_0\|_H \leq r$, $\forall\|d\|_\infty \leq r$

$$\|y(t, y_0, d)\|_\Theta \leq \beta(\|y_0\|_\Theta, t) + \gamma(\|d\|_\infty), t \geq 0.$$

Висновки. Стаття присвячена дослідженню робастної стійкості телекомунікаційних систем до просторово розподілених електромагнітних перешкод зі складною спектральною структурою. У ній описана стійкість граничних режимів нескінченновимірної системи типу реакції-дифузії відносно зовнішніх збурень, що є важливим для підвищення стійкості телекомунікаційних каналів і ефективності систем передавання сигналів та інформації. Основним результатом роботи

є наведення оцінки відхилення траєкторій збуреної системи від глобального атрактора незбуреної системи в залежності від величини зовнішнього сигналу в термінах функцій порівняння.

Вказані результати можуть бути застосовані до різноманітних класів систем типу реакції-дифузії та за досить загальних припущень щодо їх коефіцієнтів, включаючи системи з негладкими функціями взаємодії, багатовимірні системи Лотки–Вольтерра з дифузією, моделі ФіцХ'ю–Нагумо та інші, для яких не гарантовано єдиність розв'язку задачі Коші.

Робота відкриває перспективи для подальших досліджень у сфері моделювання складних нелінійних систем, зокрема в контексті їхньої стійкості до багатовимірних і нестаціонарних збурень, що є актуальним для сучасних телекомунікаційних технологій.

Також можна зробити більш загальний висновок про те, що робастна стійкість до збурень є властивістю, притаманною широкому класові еволюційних процесів, що моделюються системами реакції-дифузії.

Список літератури:

1. FitzHugh R. Impulses and physiological states in theoretical models of nerve membrane. *Biophysical Journal*, 1, 1961. Pp. 445–466. https://doi.org/10.1016/S0006-3495(61)86902-6
2. Smoller J. Shock Waves and Reaction–Diffusion Equations. *Springer*, 1994.
3. Temam R. Infinite-dimensional dynamical systems in mechanics and physics. *AMS*, 68, 1997.
4. Robinson J. C. Infinite-dimensional dynamical systems. *Cambridge University Press*, 2001.
5. Melnik V. S., Valero J. On attractors of multivalued semi-flows and differential inclusions. *Set-Valued Analysis*, 6, 1998. Pp. 83–111.
6. Kasyanov P. O., Mel`nik V. S., Toscano S. Solutions of Cauchy and periodic problems for evolution inclusions with multi-valued ω_{λ_0} -pseudomonotone maps. *Journal of Differential Equations*, 249(6), 2010. Pp. 1258–1287.
7. Perestyuk M. O., Kapustyan O. V. Long-time behavior of evolution inclusion with non-damped impulsive effects. *Memoirs on Differential Equations and Mathematical Physics*, 56, 2012. Pp. 89–113. https://doi.org/
8. Dashkovskiy S., Kapustyan O. V., Romaniuk I. V. Global attractors of impulsive parabolic inclusions. *Discrete and Continuous Dynamical Systems*, 22(5), 2017. Pp. 1875–1886. https://doi.org/10.3934/dcdsb.2017111
9. Dashkovskiy S., Feketa P., Kapustyan O., Romaniuk I. Invariance and stability of global attractors for multi-valued impulsive dynamical systems. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 458(1), 2018. Pp. 193–218. https://doi.org/10.1016/j.jmaa.2017.09.001
10. Nakonechnyi O. G., Kapustian O. A., Chikrii O. A. Approximate Guaranteed Mean Square Estimates of Functionals on Solutions of Parabolic Problems with Fast Oscillating Coefficients Under Nonlinear Observations. *Cybernetics and Systems Analysis*, 55(5), 2019. Pp. 785–795. https://doi.org/10.1007/s10559-019-00189-6
11. Sontag E. D., Wang Y. On characterizations of the input-to-state stability property. *Systems & Control Letters*, 24(5), 1995. Pp. 351–359. https://doi.org/10.1016/0167-6911(94)00050-6
12. Mironchenko A. Local input-to-state stability: Characterizations and counterexamples. *Systems & Control Letters*, 87, 2016. Pp. 23–28. https://doi.org/10.1016/j.sysconle.2015.10.014
13. Dashkovskiy S., Kapustyan O., Schmid J. A local input-to-state stability result w.r.t. attractors of nonlinear reaction–diffusion equations. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 32(3), 2020. Pp. 309–326. https://doi.org/10.48550/arXiv.1909.07022
14. Schmid J., Kapustyan O., Dashkovskiy S. Asymptotic gain results for attractors of semilinear systems. *Mathematical Control and Related Fields*, 2021. https://doi.org/10.3934/mcrf.2021044
15. Khalil H. K. Nonlinear systems. Third edition. *Prentice Hall, New Jersey*, 2002.
16. Dashkovskiy S., Mironchenko A. Input-to-state stability of infinite-dimensional control systems. *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 25(1), 2013. Pp. 1–35. https://doi.org/10.1007/s00498-012-0090-2
17. Kapustyan O. V., Kasyanov P. O., Valero J., Zgurovsky M. Z. Structure of uniform global attractor for general non-autonomous reaction-diffusion system. *Continuous and distributed systems*, 211, 2014. Pp. 221–237. https://doi.org/10.1007/978-3-319-03146-0-12
18. Kapustyan O. V., Sobchuk V. V., Yusypiv T. V., Pankov A. V. Robust stability of global attractors for evolutionary systems without uniqueness. *Journal of optimization, differential equations and their applications (JODEA)*, 30(3), 2022. Pp. 49–61. http://dx.doi.org/10.15421/142208
19. Kapustyan O. V., Kurylko O. B., Yusypiv T. V. Robust stability of the global attractor of the reaction-diffusion system. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Physics and Mathematics*, 3, 2021. Pp. 46–50. https://doi.org/10.17721/1812-5409.2021/3.6
20. Kapustyan O. V., Yusypiv T. V. Stability of limit regimes in general reaction-diffusion type systems. *Scientific Bulletin of Uzhgorod National University. Series: Mathematics and Informatics*, 41(2), 2022. Pp. 48–60. https://doi.org/10.24144/2616-7700.2022.41(2).48-60

Yusypiv T. V., Kurylko O. B. INVESTIGATION OF ROBUST STABILITY OF LIMIT REGIMES IN REACTION-DIFFUSION SYSTEMS WITH DISTRIBUTED SIGNAL TRANSMISSION

The article addresses the robust stability of telecommunication systems under spatially distributed electromagnetic disturbances with complex spectral structures. The primary approach relies on mathematical modeling using reaction-diffusion systems, which describe signal dynamics in environments with variable parameters. The study aims to analyze the stability of limit regimes in these systems in the presence of external perturbations.

The research focuses on dissipative systems known to possess a global attractor in the unperturbed state. When an external signal is introduced, the system becomes non-autonomous, complicating its behavior analysis. A key task is to estimate the deviation of the system's trajectories from the equilibrium position – the global attractor. To this end, the theory of input-to-state stability (ISS) is employed, offering two types of estimates: local ISS and nonlocal asymptotic gain (AG). These estimates enable a quantitative characterization of trajectory deviations based on the amplitude of the external signal.

A distinctive feature of the study is the analysis of systems with non-smooth nonlinearities, where solution uniqueness is not guaranteed. To address this, multivalued semiflows and semiprocesses are utilized, alongside the theory of uniform attractors. The study leverages a known result on the upper semicontinuous dependence of attractors on parameters, enabling the investigation of system behavior under varying external influences.

The findings are applicable to a wide range of models, including FitzHugh–Nagumo systems, multidimensional Lotka–Volterra systems with diffusion, and other reaction-diffusion models. The proposed methods enhance the reliability of telecommunication systems under unpredictable perturbations. Furthermore, the derived stability estimates can be used to optimize the performance of communication systems operating in complex electromagnetic environments and to develop new adaptive control algorithms that ensure resilience to external influences.

This work paves the way for further research into modeling complex nonlinear systems, particularly regarding their stability under multidimensional and non-stationary perturbations, which is highly relevant for modern telecommunication technologies.

Key words: *signal, reaction-diffusion system, global attractor, robustness, stability.*

МЕТАЛУРГІЯ

УДК 621.777.014.2
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/26

Саєнко О. Ф.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Чєркашин Д. В.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Губський С. О.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Чухліб В. Л.
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

ВПЛИВ МІЖКЛІТЬОВОЇ ВІДСТАНІ НА ПРОЦЕС ВАЛКОВОГО ФОРМУВАННЯ КОРИТНОГО ПРОФІЛЮ

У статті досліджено вплив міжклітьової відстані на процес виготовлення коритного профілю методом валкового формування. В рамках дослідження використано програмне забезпечення QForm, що дозволило здійснити моделювання процесу та провести аналіз розподілу напружень при різних міжклітьових відстанях (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм). Результати моделювання показали, що поступове збільшення міжклітьової відстані від 400 мм до 1000 мм сприяє рівномірному розподілу деформації, зменшенню пікових напружень і покращенню геометричної точності готового виробу. Встановлено, що занадто мала міжклітьова відстань призводить до накопичення залишкових напружень і можливих дефектів, тоді як надмірно велика відстань потребує необґрунтовано збільшених енергосилових витрат. Оптимальний підхід передбачає поступове збільшення відстані між клітями, що дозволяє рівномірно перерозподілити напруження на всіх етапах формування профілю. Окрім моделювання, у статті розглянуто теоретичні основи процесу валкового формування та проаналізовано технологічні особливості виробництва гнутих профілів. Особливу увагу приділено питанням точності геометричних параметрів профілю, рівномірності розподілу деформації, енергозатрат процесу та впливу міжклітьової відстані на міцність обладнання. Запропоновані рекомендації щодо вибору міжклітьової відстані можуть бути використані для підвищення ефективності промислових процесів валкового формування. Визначена оптимальна схема з варіативною міжклітьовою відстанню дозволяє досягти найкращого балансу між якістю профілю, ресурсозбереженням і довговічністю обладнання. Дослідження підтверджують, що правильний вибір міжклітьової відстані сприяє зниженню залишкових напружень у матеріалі, що є важливим фактором для забезпечення довговічності та експлуатаційної надійності виробу.

Ключові слова: *коритний профіль, міжклітьова відстань, валково-формуючий верстат, моделювання, інтенсивні напруження, геометрична точність, технологічний процес, залишкові напруження, QForm, профілювання, деформація.*

Постановка проблеми. Вибір оптимальної міжклітьової відстані у валковому формуванні є важливим технологічним завданням, оскільки вона впливає на якість профілю, рівномірність деформації та довговічність обладнання. Надто мала відстань призводить до накопичення напружень і появи дефектів, тоді як надмірно велика – до нестабільності процесу та зростання енергозатрат

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В нинішніх умовах ринку якість та вартість виготовлення продукції є ключовими факторами для конкурентоспроможності та успішного розвитку бізнесу. Це стосується всієї продукції на ринку, однак у даній статті зосереджено увагу на підході до підвищення якості виготовлення гнутих профілів шляхом визначення оптимальної міжклітьової відстані [1].

Гнуті профілі виготовленні валковим формуванням є ключовим елементом у будівництві промислових конструкцій. Завдяки своїй унікальній формі вони забезпечують високу стійкість до навантажень, що робить їх незамінними для створення каркасів, підсилення стін, перекриттів і реалізації різноманітних інженерних рішень. Така універсальність і міцність роблять профілі важливим компонентом масштабних промислових і будівельних проектів [2].

Для досягнення високої якості профілів необхідно ретельно контролювати параметри технологічного процесу, зокрема міжклітьову відстань під час профілювання. Недостатньо оптимізовані параметри можуть призвести до виникнення дефектів, таких як хвилястість граней, нерівномірний розподіл напружень та зниження механічних характеристик готової продукції [3].

Оптимізація міжклітьової відстані дозволяє покращити якість геометрії профілю, зменшити внутрішні напруження в металі та підвищити ефективність виробничого процесу. Це сприяє зниженню матеріальних витрат, підвищенню продуктивності та забезпеченню стабільності параметрів продукції відповідно до вимог нормативних документів [4].

Постановка завдання. Метою статті є визначення оптимальної міжклітьової відстані у процесі валкового формування коритного профілю для забезпечення високої якості готового виробу, зменшення дефектів і залишкових напружень, а також підвищення стабільності технологічного процесу.

Виклад основного матеріалу. 1. Теоретичні основи виготовлення профілів.

Виробництво гнутих профілів методом валкового формування має значні переваги над іншими способами виготовлення профілів, що зумовлює його високий попит у промисловості [5].

Гнуті профілі отримують поступовим холодним гнуттям стального листа чи стрічки. У будівництві вони використовуються як швелери, таврові деталі й елементи огороджувальних конструкцій [2, 6, 7].

До основних переваг виробництва гнутих профілів методом валкового формування належать:

– універсальність форм та матеріалів: можливість виготовлення профілів будь-якої конфігурації поперечного перерізу з різними розмірами ширини, товщини та довжини. Для виробництва можуть використовуватись штаби зі сталі різних марок, кольорових металів і сплавів;

– інтеграція допоміжних операцій: процес формування профілів дозволяє виконувати супутні операції, такі як перфорація, зварювання, нанесення покриттів і фарбування, що спрощує виробництво та скорочує витрати;

– висока якість поверхні: забезпечується гладкість і точність профілю, що контролюється на кожному етапі формування;

– точність і жорсткість: профілі виготовляються з високою точністю, що дозволяє зменшити відхилення розмірів і підвищити жорсткість готового виробу;

– простота та компактність обладнання: профілезгинальні стани характеризуються невеликими габаритами, низькою масою та відносною простотою конструкції;

– енергоефективність та стабільність: процес гнуття потребує мінімальної витрати енергії, забезпечуючи високу стійкість валків і стабільність технологічного процесу [8];

– економія матеріалів: коефіцієнт використання металу сягає 99,5 %, що забезпечує низькі втрати матеріалу;

– завершеність виробів: у багатьох випадках гнуті профілі не потребують додаткової обробки, що знижує витрати на виробництво [9].

На (рис. 1) представлено різновиди гнутих профілів прокату:

а) рівнобокі, нерівнобокі кути, а також кути з підігнутими полками;

б) рівнополичні та нерівнополичні швелери;

в) зетові профілі;

г) коробчаті профілі;

д) С-подібні (напівзамкнені) профілі, звичайні й з гофрами на основі;

е) замкнуті профілі квадратного та прямокутного перерізу (звичайні й зварні – зі звареними кромками);

ж) коритні профілі рівнополичні та нерівнополичні;

з) гофровані листи із трапецієподібними й круглими гофрами [10].

Процес гнуття є перспективним завдяки можливості безперервної роботи обладнання, інтеграції додаткових функцій (зварювання стиків руло-

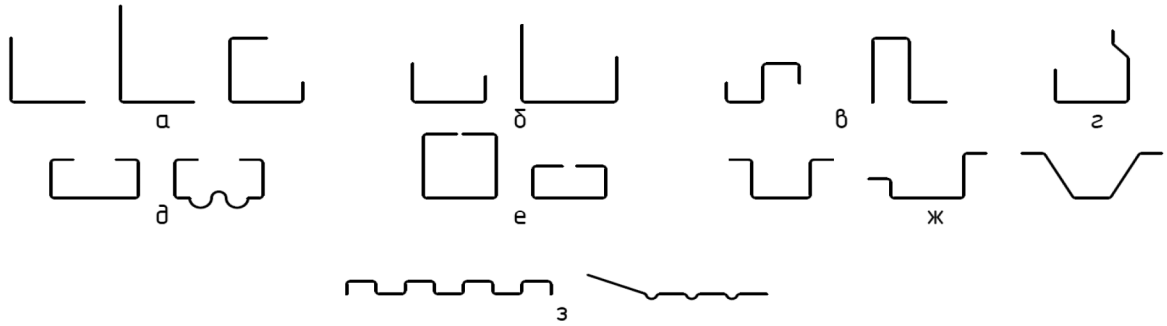


Рис. 1. Види гнутих профілів прокату

нів) і простоті калібрування валків. Готові профілі можуть бути відрізані, змащені, запаковані та підготовлені до транспортування без додаткових операцій [11].

Міжклітьова відстань у профілезгинальних станах має суттєвий вплив на якість готового профілю, стабільність технологічного процесу, а також на енергоємність та ефективність виробництва. Основні аспекти впливу міжклітьової відстані включають:

1. Точність геометричних параметрів профілю:

– надмірна міжклітьова відстань може спричинити деформацію металу між клітями через пруженіння матеріалу. Це призводить до відхилень від заданої геометрії профілю;

– занадто мала відстань, у свою чергу, може викликати накопичення напруги у матеріалі, що також погіршує точність і може призвести до дефектів.

2. Рівномірність розподілу деформації:

– при оптимальній міжклітьовій відстані деформація розподіляється рівномірно по всій довжині профілю;

– неправильний вибір міжклітьової відстані може викликати надмірну концентрацію напруг в окремих зонах, що збільшує ймовірність виникнення тріщин або інших дефектів.

3. Вплив на міцність обладнання:

– збільшення міжклітьової відстані знижує навантаження на окремі кліті, сприяючи більш тривалій роботі валків та інших компонентів стану, але енергетичні витрати зростають;

4. Енергозатрати процесу:

– оптимальна міжклітьова відстань дозволяє зменшити зусилля, необхідні для профілювання, знижуючи загальну енергоємність процесу;

– у випадках неправильно підібраної відстані можуть зростати втрати енергії через підвищене тертя та неефективність деформування;

5. Якість поверхні профілю:

– при надмірному зменшенні міжклітьової відстані можливе порушення стабільності прокатки, що призводить до утворення хвилястостей, подряпин або інших дефектів поверхні.

6. Продуктивність процесу:

– зменшення міжклітьової відстані зазвичай дозволяє збільшити швидкість профілювання, але лише до певної межі, за якої можуть виникати проблеми із точністю та якістю [12, 13].

Отже, процес виготовлення гнутого профілю валковим формуванням є складним технологічним процесом і потребує високої точності на всіх етапах виробництва. Одним із ключових параметрів, який впливає на якість готового виробу, є міжклітьова відстань. Її оптимальне значення відіграє важливу роль у забезпеченні необхідної форми, точності розмірів та стабільності процесу виготовлення.

Правильний вибір міжклітьової відстані дозволяє уникнути деформацій, забезпечити точність готового виробу та зменшити знос обладнання. На визначення цього параметра впливають такі чинники, як товщина і ширина сталевої смуги, марка сталі, форма поперечного перерізу профілю та запланований обсяг виробництва. Оптимальна відстань між валками сприяє зниженню тертя, мінімізує знос валків і забезпечує рівномірність формування профілю.

2. Експериментальна частина.

У рамках дослідження було виконано моделювання процесу виготовлення коритного профілю з розмірами 34 × 19 × 27,5 × 2 мм. (рис. 2). на валково-формуючому верстаті. Процес формування профілю здійснювався поетапно із кутами підгинання на кожній кліті 10°, 18°, 30°, 42°, 54°, 66°, 78°, 88° та завершальний етап під кутом 90° (рис. 3). Для моделювання використовувалася сталь марки Ст10, яка має низький вміст вуглецю та характеризується високими пластичними властивостями, що дозволяє уникнути тріщин і деформацій при профілюванні. Основною метою моде-

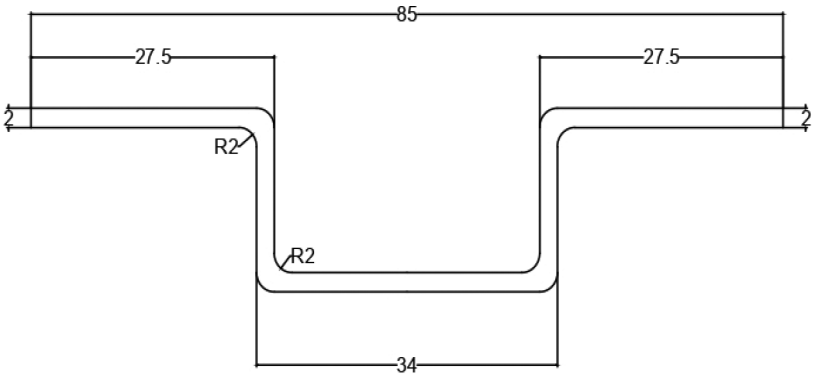


Рис. 2. Геометричні параметри коритного профіля

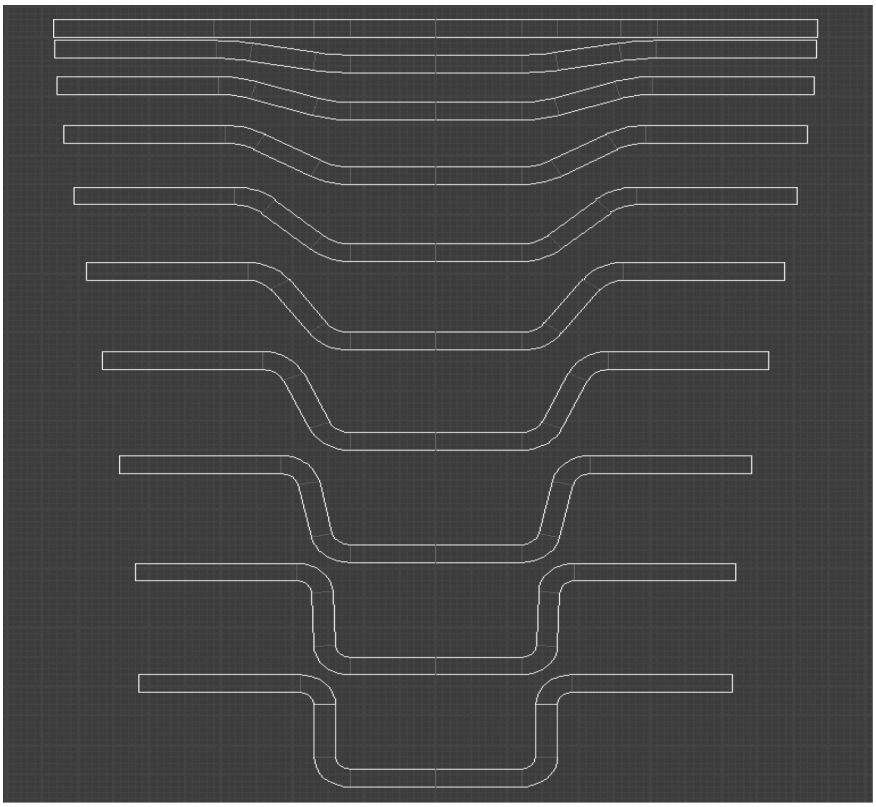


Рис. 3. Квіткова діаграма

лювання було визначення впливу міжклітьової відстані на якість кінцевого виробу.

Спосіб виготовлення гнутого коритоподібного профілю передбачає прикладання нормальних зусиль до ділянок вертикальних полиць поблизу зони згину після завершального проходу. На попередніх етапах заготовка центрується горизонтальними зусиллями, після чого виконується обтиснення дна профілю для покращення його геометричних характеристик (рис. 4) [14].

Для аналізу впливу міжклітьової відстані на процес виготовлення коритного профілю було використано програмне забезпечення QForm. В моделі технологічного процесу враховувалися різні варіанти міжклітьової відстані (400 мм,

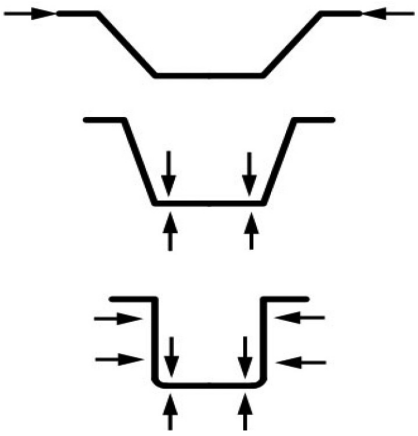


Рис. 4. Спосіб виготовлення гнутого коритоподібного профілю

500 мм, 600 мм, 800 мм та 1000 мм), які було досліджено з точки зору напружено-деформованого стану матеріалу (рис. 5).

QForm UK – це професійне інженерне програмне забезпечення, яке використовується для моделювання, аналізу та оптимізації процесів обробки металу тиском, що забезпечує чудову надійність. Він покриває основні потреби в моделюванні обробки металу тиском для великих і малих виробничих компаній, а також дослідницьких і навчальних закладів [15].

Під час аналізу графіків інтенсивності напружень для різних міжклітьових відстаней (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм та комбінації 400–1000 мм) було виявлено такі особливості:

Графік із міжклітьовою відстанню 400 мм. (рис. 6):

– напруження характеризуються різкими перепадами на початкових етапах, що свідчить про високий рівень деформації матеріалу;

– максимальне напруження сягає близько 500 МПа на початку процесу, але після декількох етапів стабілізується на рівні 200–300 МПа;

– така схема є ефективною для початкових етапів, але на фінальних етапах виникає нерівномірність напружень.

Графік із міжклітьовою відстанню 500 мм (рис. 7):

– загальна структура графіка схожа до попереднього варіанту, але напруження знижуються дещо швидше;

– максимальні піки досягають 450–500 МПа, а стабілізація відбувається на рівні 200 МПа;

– міжклітьова відстань 500 мм є більш прийнятною для зменшення інтенсивності пікових напружень.

Графік із міжклітьовою відстанню 600 мм. (рис. 8):

– різкі піки напружень на початкових етапах дещо згладжені, але їх амплітуда залишається високою (400–450 МПа);

– стабілізація відбувається після 4-го етапу, напруження поступово знижуються до 150–200 МПа;

– при цій міжклітьвій відстані є краща рівномірність напружень на середніх етапах, але вимагає додаткової уваги на початкових етапах.

Графік із міжклітьовою відстанню 800 мм (рис. 9):

– напруження характеризуються меншими піками на початкових етапах (350–400 МПа), але є помітні коливання в середині процесу;

– стабілізація напружень відбувається після 6-го етапу, де вони знижуються до рівня 100–150 МПа;

– така схема є ефективною на пізніх етапах, проте виникає ризик нерівномірності напружень у середній зоні.

Графік із міжклітьовою відстанню 1000 мм (рис. 10):

– пікові напруження значно нижчі на початку процесу (300–350 МПа), але графік має значні коливання протягом усього циклу;

– стабілізація напружень відбувається лише на фінальних етапах, де вони знижуються до 100 МПа;

– велика міжклітьова відстань ефективна для мінімізації напружень, але викликає значні перепади на ранніх етапах.

Графік із міжклітьовою відстанню від 400 до 1000 мм (рис. 11). Така схема дозволяє рівномірніше розподілити напруження на всіх етапах

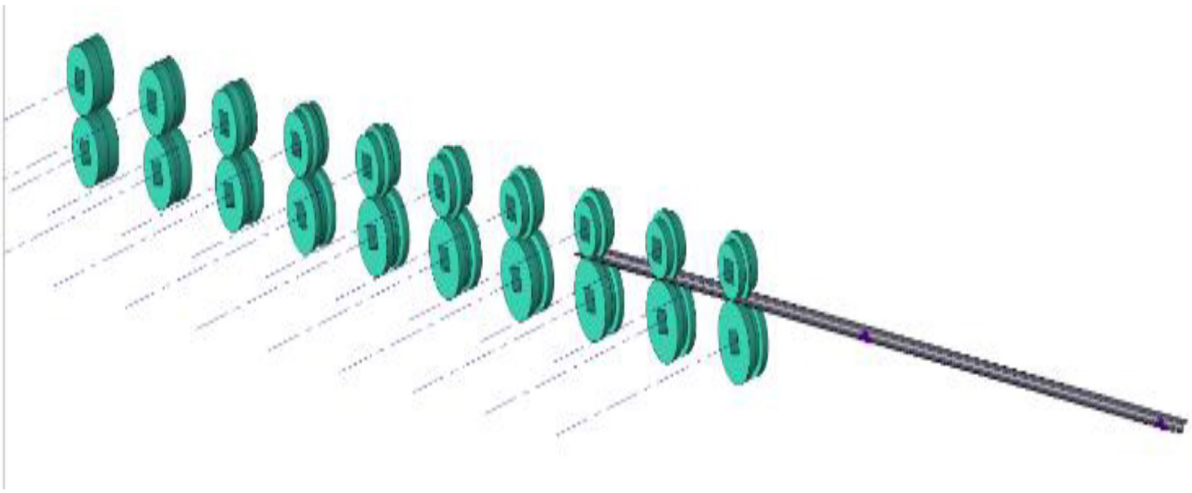


Рис. 5. Технологічний процес виготовлення коритного профіля

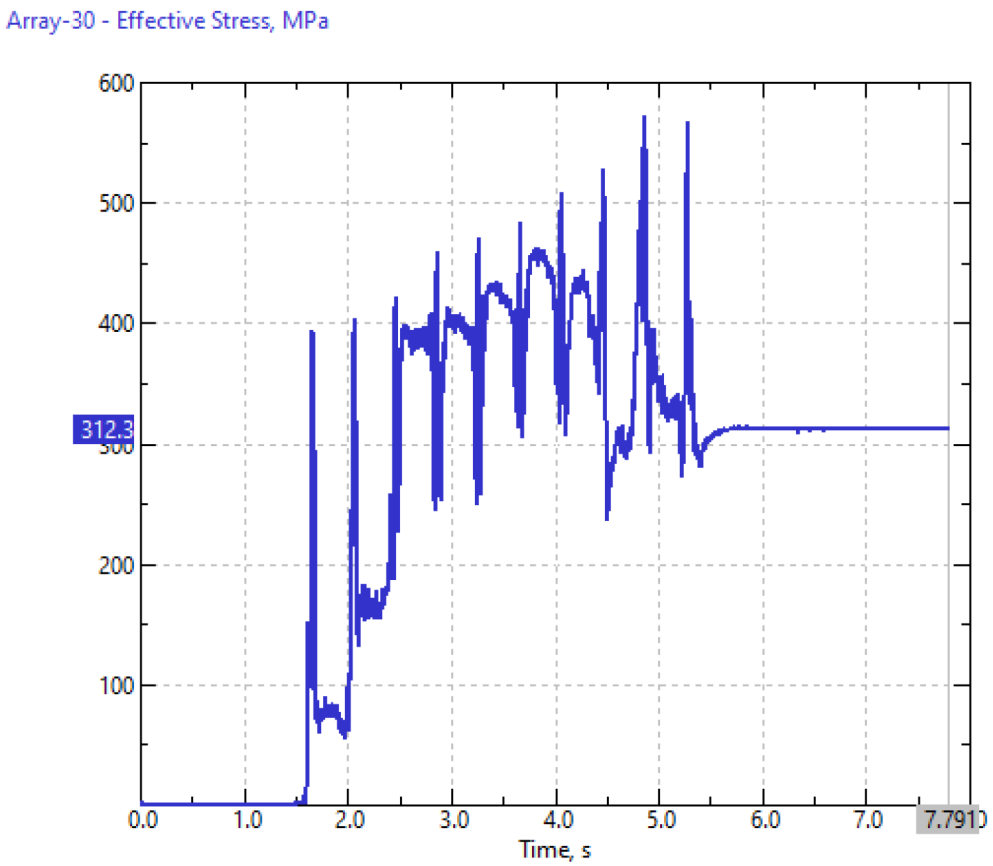


Рис. 6. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 400 мм

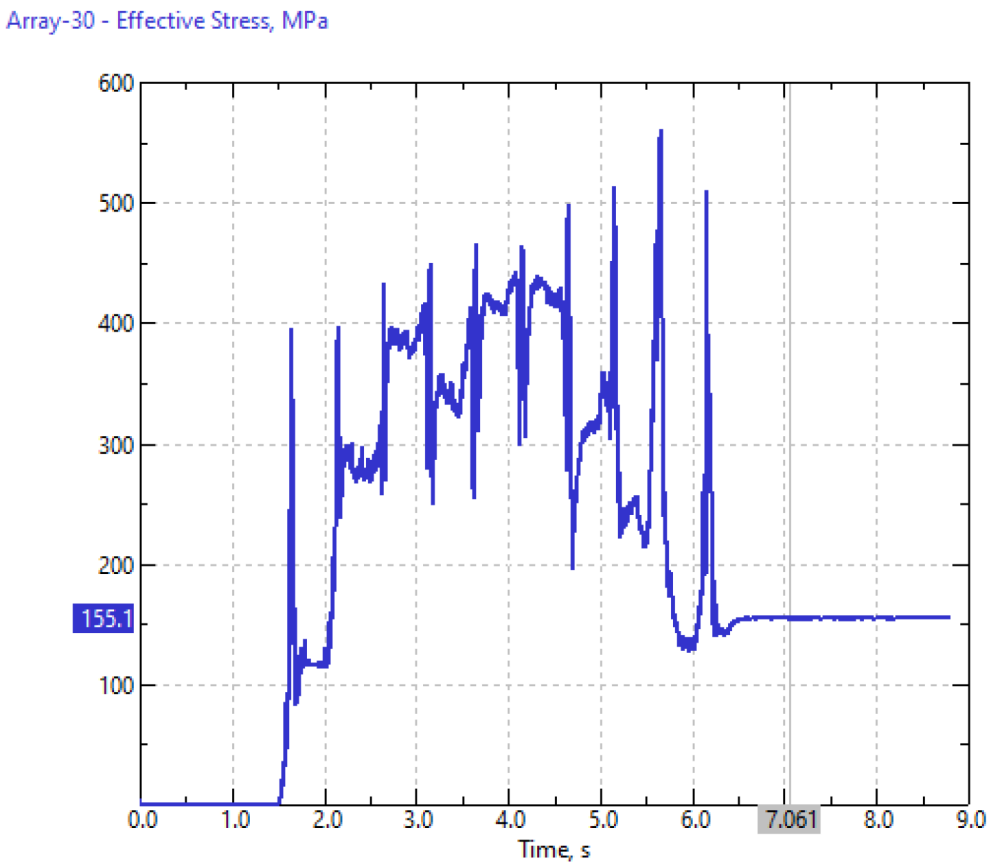


Рис. 7. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 500 мм

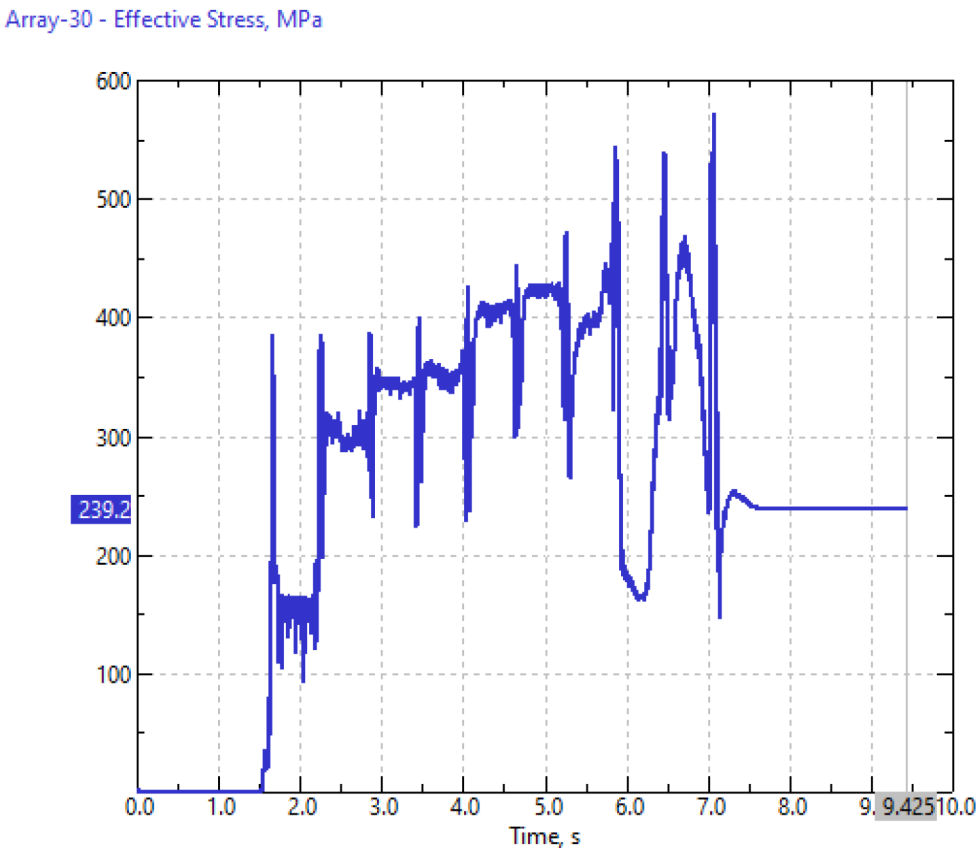


Рис. 8. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова 600 мм

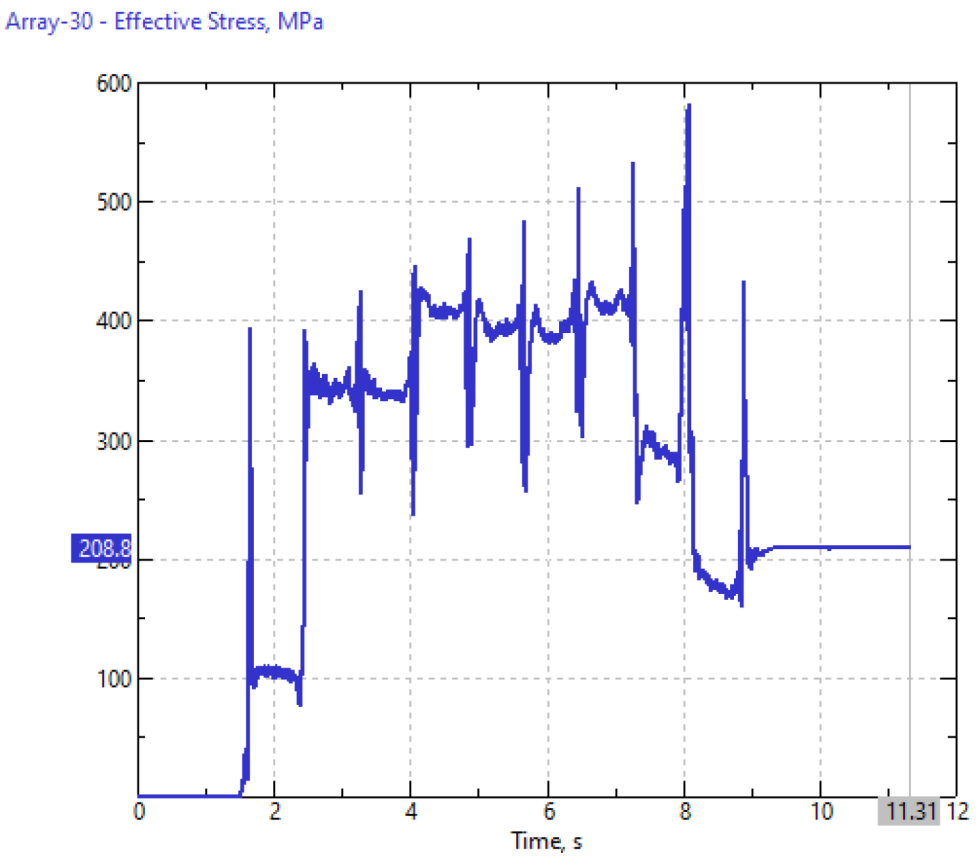


Рис. 9. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань 800 мм

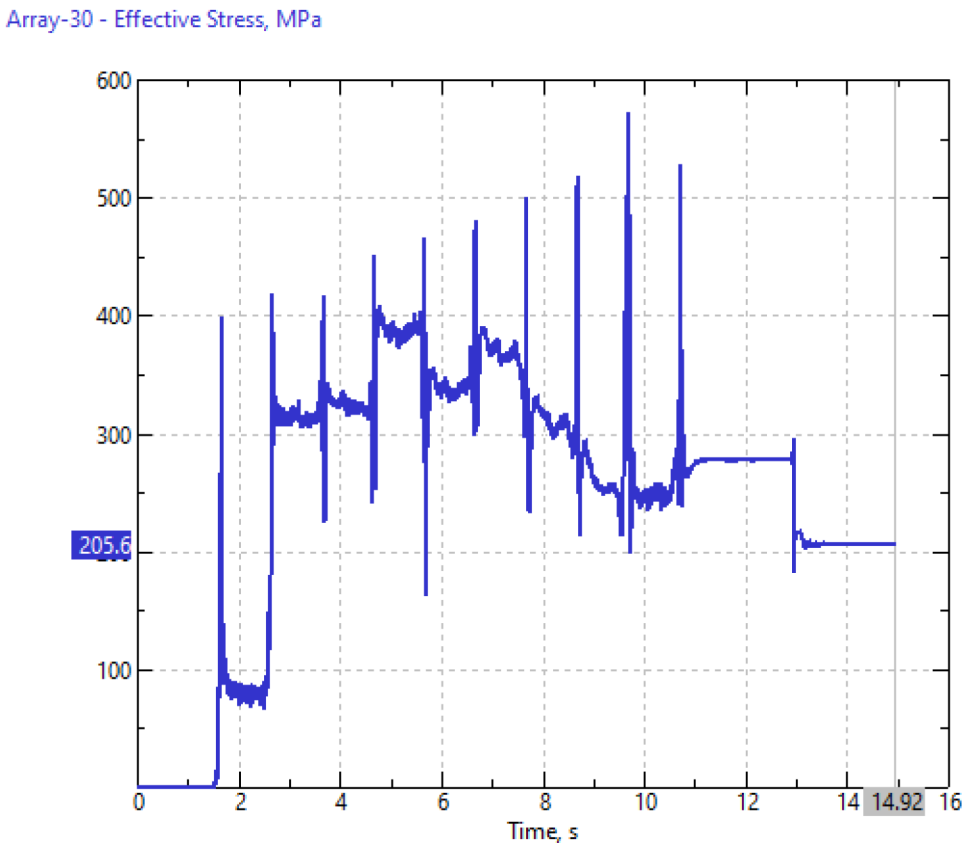


Рис. 10. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова 1000 мм

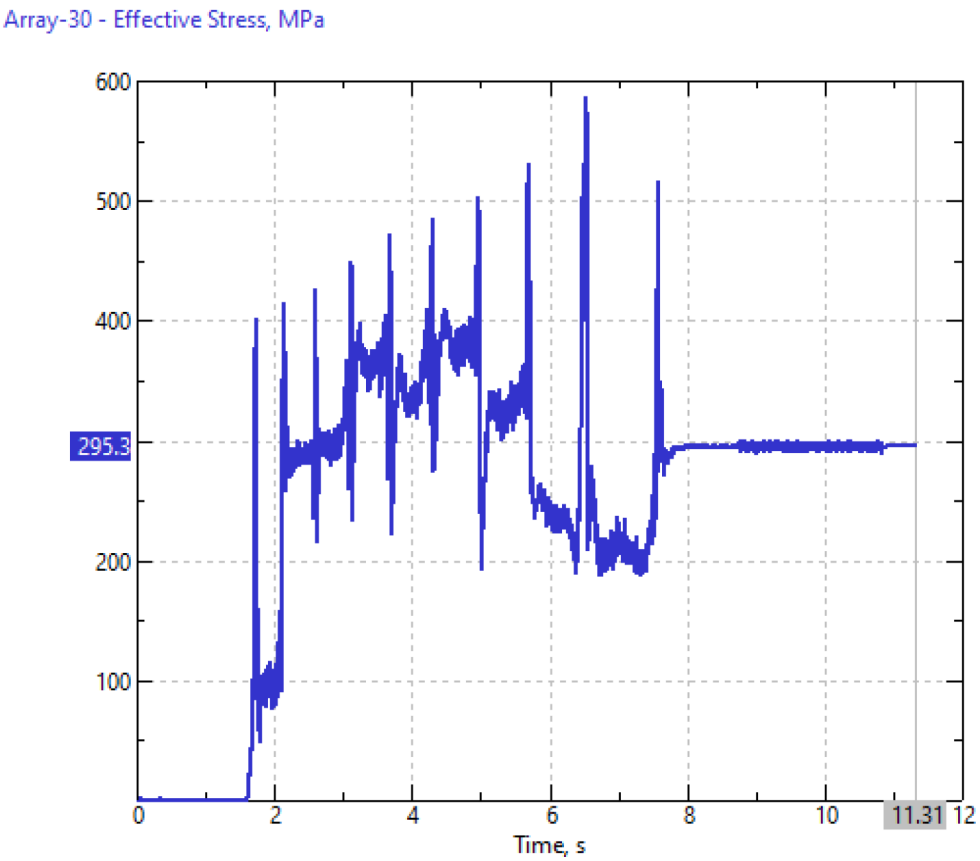


Рис. 11. Графік інтенсивних напружень, міжклітьова відстань від 400 до 1000 мм

формування профілю. Детально міжклітьова відстань була така: перша кліть – 400 мм, друга кліть – 450 мм, третя кліть – 500 мм, четверта кліть – 550 мм, п'ята кліть – 600 мм, шоста кліть – 650 мм, сьома кліть – 700 мм, восьма кліть – 800 мм, дев'ята кліть – 1000 мм. Графік із зростаючою міжклітьовою відстанню демонструє найбільш збалансовану структуру напружень (рис. 11):

– максимальні напруження сягають 450 МПа на початку процесу, але їх амплітуда поступово зменшується до 150–200 МПа на середніх та фінальних етапах;

– рівномірність напружень значно покращується порівняно з варіантами із фіксованими відстанями;

– найкращий баланс досягається завдяки поступовому збільшенню міжклітьових відстаней.

Висновки. В результаті проведеного моделювання процесу виготовлення коритного профілю в програмному забезпеченні QForm було проаналізовано вплив міжклітьової відстані на розподіл інтенсивних напружень під час деформації. Проведені дослідження показали, що застосування фіксованих міжклітьових відстаней (400 мм, 500 мм, 600 мм, 800 мм, 1000 мм) не забезпечує рівномірного розподілу напружень на всіх етапах обробки профілю. Це призводить до виникнення різких пікових значень на окремих етапах процесу, що може негативно впливати на якість готового виробу.

Оптимізована схема з поступовим збільшенням міжклітьових відстаней (від 400 мм до 1000 мм) дозволяє досягти збалансованого розподілу напружень. Результати моделювання показали, що максимальні напруження при використанні зростаючої міжклітьової відстанні зменшуються, а їх стабілізація відбувається швидше, що сприяє покращенню умов формування профілю. Така схема мінімізує пікові напруження на початкових етапах процесу та забезпечує їх рівномірність на середніх і фінальних етапах.

Таким чином, для забезпечення найкращих умов деформації коритного профілю та підвищення його геометричної точності рекомендовано використовувати поступове збільшення міжклітьових відстаней між валками. Це сприяє зниженню залишкових напружень у матеріалі та покращує якість кінцевого продукту.

Список літератури:

1. Kang, C.; Sun, B.; Zhang, X.; Yao, C. Research on the Mechanism and Processability of Roll Forming. *Materials* 2024, 17(13), 3126, pp. 1–20.

2. Jing, Y.; Sun, Q.; Zhao, Y. Design of Z Profile Roller Tooling and Research on Roller Clearance. *Machines* 2023, 11(7), 767, pp. 1–19.

3. Liang, J.; Chen, C.; Liang, C.; Li, Y.; Chen, G.; Li, X.; Wang, A. One-Time Roll-Forming Technology for High-Strength Steel Profiles with "日" Section. *Advances in Materials Science and Engineering 2019*, 2019, 6505914, pp. 1–10.

4. Marini D, Cunningham D, Corney JR. Near net shape manufacturing of metal: a review of approaches and their evolutions. *Proc IMechE, Part B: J Engineering Manufacture*. 2018; 232(4): 650–669.

5. Юрченко О. А. Розробка, дослідження та впровадження технології валкового формування гнутих профілів з просічно-витяжними елементами : автореф. дис.... канд. техн. наук: Процеси та машини обробки тиском / *Держ. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т»*. –Харків, 2000.

6. Проценко В. М., Бєлоконь Ю. О. Технологія виготовлення гнутих профілів : навчально-методичний посібник для здобувачів ступеня вищої освіти магістр спеціальності 136 «Металургія» освітніх-професійних програм «Обробка металів тиском». Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 104 с.

7. Бадюк С. І. Розвиток методів розрахунку технологічних параметрів виробництва якісного прокату на ливарно-прокатних комплексах : дис. ... канд. техн. наук: Процеси і машини обробки тиском / *Нац. акад. наук України, Ін-т чорної металургії ім. З. І. Некрасова*. – Дніпро, 2019.

8. Fu X, Wang B, Zhu X, et al. Numerical and experimental investigations on large-diameter gear rolling with local induction heating process. *Int J Adv Manuf Tech* 2016; 91: pp. 1–11.

9. Gan, W.; Wagoner, R. H.; Mao, K.; Price, S.; Rasouli, F. Practical Methods for the Design of Sheet Formed Components. *J. Eng. Mater. Technol*. 2004, 126, 360–367.

10. Б. П. Середа, В. М. Проценко Виготовлення спеціальних видів прокату: Навчально-методичний посібник для студентів ЗДІА спеціальності 7.090404 «Обробка металів тиском» / Б. П. Середа, В. М. Проценко. – Запоріжжя, ЗДІА, 2011. – 88 с.

11. Otzurk, F.; Dilmec, M.; Turkoz, M.; Ece, R.E.; Halkaci, H.S. Grid Marking and Measurement Methods for Sheet Metal Formability. *In Proceedings of the 5th International Conference and Exhibition on Design and Production of Machines and Dies/Molds, Aydin, Turkey*, 18–21 June 2009.

12. Miranda, S.S.; Barbosa, M.R.; Santos, A.D.; Pacheco, J.B.; Amaral, R.L. Forming and springback prediction in press brake air bending combining finite element analysis and neural networks. *J. Strain Anal. Eng. Des*. 2018, 53, 584–601.

13. Benabdallah, H.S. Static friction coefficient of some plastics against steel and aluminum under different contact conditions. *Tribol. Int*. 2007, 40, 64–73.

14. Li Y.G., Sun Y., Huang H.L., Li D.Y., Ding S.C. Finite Element Simulation of Chain-Die Forming U Profiles with Variable Cross-Section. *Mater. Sci. Forum*. 2017.

Sayenko O.F., Cherkashin D.V., Hubskyi S.O., Chukhlib V.L. INFLUENCE OF THE INTER-CAGE DISTANCE ON THE ROLL-FORMING PROCESS OF A TRAY PROFILE

The article investigates the effect of the interstand distance on the roll forming process of a channel profile. The study utilizes QForm software, enabling process simulation and stress distribution analysis at different interstand distances (400 mm, 500 mm, 600 mm, 800 mm, 1000 mm). Simulation results indicate that a gradual increase in interstand distance from 400 mm to 1000 mm promotes uniform deformation distribution, reduces peak stresses, and improves the geometric accuracy of the final product. It has been established that an excessively small interstand distance leads to the accumulation of residual stresses and potential defects, while an excessively large distance requires unjustifiably high energy and force expenditures. The optimal approach involves a gradual increase in interstand distance, allowing for an even redistribution of stresses at all stages of profile formation. In addition to simulation, the article examines the theoretical foundations of the roll forming process and analyzes the technological features of bent profile manufacturing. Particular attention is paid to the accuracy of geometric parameters, uniformity of deformation distribution, energy consumption of the process, and the impact of interstand distance on equipment durability. The proposed recommendations for selecting the interstand distance can be used to enhance the efficiency of industrial roll forming processes. The identified optimal scheme with a variable interstand distance ensures the best balance between profile quality, resource efficiency, and equipment longevity. The findings confirm that the correct choice of interstand distance contributes to reducing residual stresses in the material, which is a crucial factor in ensuring product durability and operational reliability.

Key words: *channel profile, interstand distance, roll forming machine, simulation, intensive stresses, geometric accuracy, technological process, residual stresses, QForm, profiling, deformation.*

ТЕХНОЛОГІЯ ХАРЧОВОЇ ТА ЛЕГКОЇ ПРОМИСЛОВОСТІ

УДК 637.143:613.22
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/27

Будник Н. В.
Полтавський державний аграрний університет

Ремізова Н. Л.
Державне підприємство «Полтавастандартметрологія»

Кайнаш А. П.
Полтавський державний аграрний університет

Калашник О. В.
Полтавський державний аграрний університет

Назаренко В. О.
Полтавський державний аграрний університет

Мороз С. Е.
Полтавський державний аграрний університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБАГАЧЕНИХ СУХИХ МОЛОЧНИХ СУМІШЕЙ ДЛЯ ДИТЯЧОГО ХАРЧУВАННЯ УДОСКОНАЛЕНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

У статті наведено аналіз літературних джерел щодо впливу есенціальних жирних кислот на здоров'я новонароджених, який свідчить про те, що жирні кислоти сприяють ранньому розвитку мозку та регулюють поведінкові та нейрохімічні аспекти, пов'язані з розладами настрою (реакції на стрес, агресію та ріст, пам'ять і когнітивні функції). Здійснено аналіз вітчизняних нормативно-правових актів та нормативних документів, що регламентують вимоги до продуктів для дитячого харчування, зокрема, сухих молочних сумішей (СМС) для дітей відповідно до вимог законодавства Європейського Союзу.

Розроблено рецептури та удосконалено технологію сухих молочних сумішей для дитячого харчування, збагачених омега-3 й омега-6 жирними кислотами, зокрема α-ліноленовою, докозагексаєновою й арахідоновою кислотами. Розроблено проєкти «Технологічна інструкція з виробництва сумішей сухих молочних для дитячого харчування» та технічні умови «Суміші сухі молочні для дитячого харчування» на збагачені сухі молочні суміші, які ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» планує пропонувати на ринку України.

У роботі використано широкий спектр сучасних органолептичних та фізико-хімічних методів дослідження. Сухі молочні суміші, що досліджувалися, за зовнішнім виглядом і консистенцією (дрібний сухий порошок без грудочок, у відновленому стані – однорідна рідина), смаком і запахом (молочний без сторонній присмаків і запахів), а також кольором (молочний) відповідали вимогам нормативних документів.

Проведено дослідження хімічного складу розроблених сухих молочних сумішей для дитячого харчування та основних показників якості на відповідність нормативним документам. За результатами проведених досліджень встановлена повна відповідність сухих молочних сумішей для дитячого харчування, збагачених омега-3 та омега-6 жирними кислотами, діючим вимогам нормативних документів, показано вплив добавок на вміст вітамінів та мінеральних речовин.

Ключові слова: *стандартизація, дослідження, технологія, дитяче харчування, сухі молочні суміші, омега-3, омега-6 жирні кислоти, якість.*

Постановка проблеми. Переваги грудного вигодовування загальновідомі [1], проте у багатьох випадках немовлятам потрібне спеціальне харчування. Це пов'язано з тим, що постійно зростає відсоток дітей, які мають схильність до харчових алергій, проблеми зі шлунково-кишковим трактом та ряд інших захворювань. Крім того, багато батьків вибирають сухі суміші як альтернативу та використовують для прикорму.

За даними Центру громадського здоров'я МОЗ України [2], лише 19,6 % дітей, віком до 6 місяців перебувають виключно на грудному вигодовуванні. У таких умовах проблему забезпечення дітей якісними і біологічно повноцінними продуктами можна вирішити лише шляхом промислового виробництва.

Так, як альтернатива для вигодовування, широко використовуються сухі молочні суміші (СМС) українських та закордонних виробників. Без сумнівів, СМС для дитячого харчування повинні містити достатню кількість основних поживних речовин і бути максимально наближеними до материнського молока. Ця проблема вирішується за рахунок внесення до сучасних сумішей добавок для збалансування хімічного складу. У зв'язку з цим, важливе місце відводиться вмісту в СМС ліпідів та їх якісному складу. Зокрема, згідно з Вимогами до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування, затверджених Наказом МОН України № 1084 від 23.06.2022 року, обмежується вміст трансжирних кислот та акцентується увага на обов'язковій наявності у складі сумішей лінолевої, α-ліноленової кислоти, а також докозагексаєнової та арахідонової кислот [3]. Ці вимоги поширюються на: дитячі суміші початкові та дитячі суміші для подальшого годування; дитяче харчування на основі зернових; продукти прикорму, крім дитячого харчування на основі зернових.

Враховуючи зазначене вище, актуальним є питання розроблення нових рецептур СМС, адаптованих для дітей віком від 6 місяців до року, збагачених омега-3, омега-6 жирними кислотами, та удосконалення технології їх виробництва.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Як повідомлялося вище у складі СМС обов'язково повинні міститися α-ліноленова кислота, а також докозагексаєнова та арахідонова кислоти. Це також підтверджується дослідженнями інших авторів.

Як стверджують автори [4] жирні кислоти є аліфатичними монокарбоновими кислотами, які отримані з рослинної сировини або містяться в етерифікованій формі в оліях або тваринних жирах чи восках. Їх поділяють на коротколанцюгові (SCFA), середньоланцюгові (MCFA), довголанцюгові (LCFA), дуже довголанцюгові (VLCFA).

До основних жирних кислот групи омега-3 відносять α-ліноленову кислоту (АЛК), цервонову або докозагексаєнову кислоти (DHA) і тимнодонову або ейкозапентаєнову кислоти (EPA), які разом з арахідоновою кислотою (АК) з групи омега-6, як правило, вважаються потужними протизапальними антиоксидантами та імуномодуляторними засобами [5, 6]. Це особливо важливі речовини для розвитку мозку, когнітивних функцій та імунної системи при дефіциті їх під час вагітності або лактації, що може мати негативний вплив на майбутню дитину [7]. В зазначеному джерелі автори підкреслюють, що, будучи незамінними для людей, а особливо немовлят, жирні кислоти повинні надходити в організм з їжею. Вони регулюють ліпідний обмін, балансують функції імунної, нервової та серцево-судинної систем, забезпечують утворення простагландинів, знижують агрегацію тромбоцитів, є структурною речовиною мозку та сітківки ока.

У роботі [8]. автор наголошує, що омега-3 поліненасичені жирні кислоти з довгим ланцюгом (*n*-3 LCPUFA) є важливими складовими формування клітин мозку і тому вони вважаються досить необхідними для розвитку мозку в ранньому дитинстві. При надходженні у відносно високих дозах n-3 LCPUFA можуть покращити гостроту зору у доношених немовлят.

Також, у статті [9] йдеться про те, що експериментальні, біохімічні та епідеміологічні дані підтримують гіпотезу, що низький вміст *n*-3 поліненасичених жирних кислот (*n*-3 LCPUFA) асоціюється з дисфункцією розвитку мозку і порушенням росту; наявні докази доводять, що ці есенціальні кислоти корисні для покращення конкретних параметрів, особливо ті, що стосуються пам'яті та пізнання. Поліненасичені жирні кислоти (*n*-3 LCPUFA) є привабливою додатковою альтернативою, оскільки вони сприймаються як натуральна речовина, а не штучна добавка. Автор робить висновки про те, що ці жирні кислоти мають значний вплив на фізичне і психічне здоров'я, а також розвиток малюка загалом.

Довголанцюгові поліненасичені жирні кислоти, особливо *n*-3 LCPUFA, такі як ейкозапентаєнова (EPA) і докозагексаєнова (DHA), мають відповідні біохімічні та фізіологічні функції в метаболізмі та здоров'ї людини. У цьому відношенні DHA є основною поживною речовиною для

росту та розвитку дітей; відіграє ключову роль у формуванні та роботі центральної нервової системи та сітківки ока.

У дослідженні [10] йдеться про те, що формули, які забезпечують мінімум 0,35 % DHA, сприяють кращому розвитку мозку, тобто отримані дані підтверджують, що раннє надходження DHA в їжу значно покращує розумову діяльність. Діти віком 9 і 12 місяців, які отримували риб'ячий жир (природне джерело EPA і DHA), продемонстрували вплив n-3 LCPUFA на показники їхньої уваги в тесті вільної гри.

Підсумовуючи результати дослідження, авторами [11] були представлені висновки про те, що *n*-3 LCPUFA відіграють ключову роль у зростанні та розвитку дітей, а саме суттєво впливають на центральну нервову систему (поліпшення різних параметрів когнітивної функції), розвиток зору (підвищується гострота), оздоровлення серцево-судинної та імунної систем, захищаючи дитину від алергії в ранньому дитинстві.

Загальновідомо, що застосування омега-3 жирної докозагексаєнової кислоти (DHA) і довголанцюгової омега-6 жирної арахідонової кислоти (ARA) є безпечним і підтримує розвиток немовлят, зокрема зорової та нервової систем. Тому вони рекомендовані для додавання до комерційних дитячих сумішей.

Проте автори підкреслюють, що через множинні подвійні зв'язки в структурах DHA та ARA вони дуже чутливі до взаємодії з іншими поживними речовинами та перекисного окислення. Для збереження цілісності цих жирних кислот у харчуванні немовлят використовуються спеціальні технології додавання олій, що містять DHA та ARA, під час виробничого процесу [12].

Отже, аналіз опублікованих досліджень свідчить про те, що жирні кислоти сприяють ранньому розвитку мозку та регулюють поведінкові та нейрохімічні аспекти, пов'язані з розладами настрою (реакції на стрес, агресію та ріст, пам'ять і когнітивні функції).

Постановка завдання. Метою статті є дослідження СМС для дитячого харчування, збагачених есенціальними жирними кислотами за удосконаленою технологією. Для досягнення поставленої мети потрібно виконати низку завдань, а саме:

здійснити аналіз літературних джерел щодо впливу есенціальних жирних кислот на здоров'я новонароджених;

провести аналіз нормативно-правових актів та нормативних документів, що регламентують вимоги до СМС для дитячого харчування;

провести дослідження органолептичних та фізико-хімічних показників якості розроблених СМС та оцінити їх відповідність нормативним документам;

сформулювати висновки та окреслити напрями подальших досліджень.

Виклад основного матеріалу. Робота виконана відповідно до плану науково-дослідної роботи кафедри харчових технологій Полтав-

Таблиця 1

Перелік нормативних документів, що регламентують вимоги до СМС для дитячого харчування

Нормативний документ	Назва	Чинність
Закон України [14]	Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо приведення законодавства України у сфері забезпечення дитячим харчуванням у відповідність з вимогами законодавства Європейського Союзу	Чинний від 21.10.2021
Закон України [15]	Про молоко та молочні продукти	Чинна редакція від 01.10.2023
Закон України [16]	Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів	Чинна редакція від 18.12.2024
Закон України [17]	Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів	Чинна редакція від 23.11.2023
Закон України [18]	Про охорону дитинства	Чинна редакція від 01.01.2025
Наказ МОЗ [3]	Про затвердження Вимог до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування	Чинна редакція від 23.06.2022
ДСТУ 8598:2015 [13]	Продукти молочні сухі для дитячого харчування. Суміші молочні сухі, адаптовані для дітей віком від народження до чотирьох місяців.	Чинний від 01.01.2017
Державні санітарні правила та норми 8.8.1.2.3.4-000-2001 [19]	Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті	Чинний від 20.09.2001

Таблиця 2

Рецептури сухих молочних сумішей, % в 100 г сухої суміші

Назва компонентів рецептури	Рецептура		
	класична	А	В
Високоякісне коров'яче молоко, нормалізоване (жирність 3,5 %)	56,44	21,5	10,1
Молоко знежирене	–	–	11,4
Демінералізована молочна сироватка	–	44,6	44,6
Молочний цукор	16,5	15,6	15,6
Низькоцукрова патока (мальтодекстрин)	15,5	–	–
Галактоолігоцукри з молока	–	3,2	3,2
Олія кукурудзяна	9,1	10,8	10,8
Вітаміни	0,2	0,2	0,2
Мінеральні речовини	2,26	2,26	2,26
Докозагексаєнова кислота з водоростей		0,9	0,9
Арахідонова кислота з мікрогрибів	–	0,9	0,9

ського державного аграрного університету в рамках наукових тем 0115U006745 «Інноваційні та ресурсозберігаючі технології харчових виробництв» та 0121U110650 «Якість і безпечність продукції у внутрішній і зовнішній торгівлі та торговельне підприємництво: сучасні вектори розвитку і перспективи».

Випробування проводились у науково-дослідному центрі харчової продукції Державного підприємства «Полтавастандартметрологія».

У роботі був використаний широкий спектр сучасних органолептичних та фізико-хімічних методів дослідження.

СМС, що досліджувалися, за зовнішнім виглядом і консистенцією (дрібний сухий порошок без грудочок, у відновленому стані – однорідна рідина), смаком і запахом (молочний без сторонній присмаків і запахів), а також кольором (молочний) відповідали вимогам ДСТУ 8598:2015 [13].

Наразі в Україні розроблена низка нормативних документів, що регламентують вимоги до якості та безпечності СМС для дітей (таблиця 1).

Керуючись цими нормативно-правовими актами та нормативними документами, на базі Хорольського молочного комбінату, який багато років поспіль випускає суміші для дитячого харчування, розроблено нові види СМС, збагачених ARA та DHA жирними кислотами, рецептури яких (А і В відповідно) подані у таблиці 2.

Технологічний процес виробництва сумішей здійснювали відповідно до схеми технологічного процесу, що складається з наступних операцій: приймання, зважування, очищення та охолодження молочної сировини; пастеризація та сепарування молока; приймання та підготовка компонентів, матеріалів; нормалізація та збагачення суміші; фільтрування, пастеризація, згущення; підігрів та приготування молочно-жирової емульсії; гомогенізація, пастеризація; сушіння, досушування та охолодження, просіювання сухої молочної основи; дозування та змішування сухих компонентів; просіювання, фасування, пакування та маркування сумішей.

Початком проведення досліджень було вимірювання фізико-хімічних показників якості розроблених СМС (таблиця 3).

Результати досліджень (таблиця 3) показали, що СМС для дітей, виготовлені за розробленими рецептурами, повністю відповідають вимогам ДСТУ 8598:2015 [13], за вмістом

Таблиця 3

Результати дослідження фізико-хімічних показників якості розроблених СМС

Назва показника	**Класична**	**А**	**В**
Масова частка загального жиру, г/100 г сухої суміші	19,56-31,11	26,0	25,0
Масова частка білка, г/100 г сухої суміші	8,0–12,96	10,0	10,0
Масова частка вологи, %	не ≤4	3,0	3,0
Вуглеводи г/100 г сухої суміші	32,0–59,0	56,0	56,0
Активна кислотність, pH	6,4–7,0	6,56	6,54
Індекс розчинності сирого осаду, $см^3$	не ≤0,3	0,2	0,2
Омега-3			
Докозагексаєнова кислота, мг/100 г сухої суміші	88,89–259,26	104,0	104,0
Ейкозапентаєнова кислота, мг/100 г сухої суміші	не більше 259,26	–	–
Альфа-ліноленова кислота, мг/100 г сухої суміші	222,22–518,52	509,0	466,0
Омега-6			
Арахідонова кислота, мг/100 г сухої суміші	88,89–259,26	104,0	104,0
Лінолева кислота, мг/100 г сухої суміші	2222,22–6222,22	5037,0	4037,0
Пребіотики (90 % ГОС / 10 % ФОС), г/100 г сухої суміші	1,7–4,0	2,3	2,3

Таблиця 4

Вміст вітамінів та мінеральних речовин СМС

Назва показника	Суміш суха молочна класична	Розроблені молочні суміші сухі	
		A	B
Вітаміни:			
Вітамін А, мкг/кг	3111,0–5911,0	4220,0	4220,0
Вітамін D, мкг/кг	89,0–130,0	110,0	112,0
Вітамін Е, мг/кг	26,67–259,26	95,0	96,0
Вітамін К, мкг/кг	44,0–1296,0	290,0	290,0
Вітамін С, мг/кг	177,78–1555,56	740,0	740,0
Тіамін, мг/кг	1,78–15,56	7,4	7,6
Рибофлавін, мг/кг	2,67–20,74	11,0	11,0
Ніацин, мг/кг	17,78–77,78	37,0	37,0
Вітамін B_6, мг/кг	0,89–9,07	6,7	6,7
Фолієва кислота, мкг/кг	400,0–1481,0	1320,0	1320,0
Фолат, мкг/кг	667,0–2468,0	2200,0	2200,0
Вітамін B_{12}, мкг/кг	4,0–26,0	13,0	13,0
Біотин, мкг/кг	44,0–389,0	320,0	320,0
Пантотенова кислота, мг/кг	17,78–103,7	62,0	62,0
Мінеральні речовини:			
Калій, мг/кг	3555,56–8296,3	4750,0	4750,0
Хлориди, мг/кг	2666,67–8296,3	3500,0	3500,0
Кальцій, мг/кг	2222,22–7259,26	3460,0	3460,0
Фосфор, мг/кг	1111,11–4666,67	2470,0	2470,0
Магній, мг/кг	222,22–777,78	590,0	590,0
Залізо*, мг/кг	13,33–67,41	34,0	34,0
Цинк*, мг/кг	22,22–51,85	44,0	44,0
Мідь*, мг/кг	2,67–5,19	3,5	3,5
Марганець, мг/кг	0,04–5,19	0,099	0,099
Селен*, мкг/кг	133,3–446,0	163,0	163,0
Йод, мкг/кг	670,0–1500,0	1040,0	1040,0
Натрій, мг/кг	1111,11–3111,11	1720,0	1720,0
Нуклеотиди, мг/кг	74,1–259,3	170,0	170,0
Цитидин 5-монофосфат, мг/кг	23,3–81,4	53,0	53,0
Уридин 5-монофосфат, мг/кг	19,3–67,4	44,0	44,0
Аденозин 5-монофосфат, мг/кг	16,2–56,7	37,0	37,0
Гуанозин 5-монофосфат, мг/кг	4,4–15,3	10,0	10,0
Інозин 5-монофосфат, мг/кг	11,0–38,4	25,0	25,0
L-карнітин, мг/кг	53,3–296,3	92,0	92,0
Таурин, мг/кг	185,2–622,2	345,0	345,0
Холін, мг/кг	1111,1–2592,6	1220,0	1220,0
Інозитол, мг/кг	177,8–2074,1	690,0	690,0

Примітка 1. Вказані значення можуть мати відхилення в межах, звичайних для продукції, виготовленої з натуральної сировини.

Примітка 2.* Нормується при додатковому збагаченні згідно з рецептурою.

Примітка 3. Вміст мінеральних речовин: калію, хлоридів, кальцію, фосфору, магнію, марганцю, натрію забезпечується вмістом їх у сировині.

омега-3 та омега-6 жирних кислот задовольняють «Вимоги до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування» [3]. Суміші з рецептурним складом В мають менший вміст жиру, та водночас менший вміст лінолевої та α-ліноленової кислот.

Також в досліджуваних сумішах визначали вміст вітамінів та мінеральних речовин. Результати наведені в таблиці 4.

На нові молочні суміші розроблено проєкти ТУ та ТІ, згідно яких проведена апробація нових сумішей в умовах виробництва.

Висновки. На основі результатів досліджень розроблено рецептури та удосконалено технологію сухих молочних сумішей для дитячого харчування, збагачених омега-3 та омега-6 жирними кислотами.

За результатами виконаної роботи, досліджено хімічний склад та основні показники якості дитячих молочних сумішей. Встановлено відповідність СМС для дитячого харчування, збагачених омега-3 та омега-6 жирними кислотами, діючим вимогам нормативних документів, показано вплив добавок на вміст вітамінів та мінеральних речовин. Розроблено проєкти нормативної документації на збагачені сухі молочні суміші, які ТОВ «Хорольський завод продуктів дитячого харчування» планує пропонувати на ринку України.

Гарантія якості та безпеки харчової продукції означає, що протягом усього терміну придатності фактичні значення показників якості та безпеки продукту повинні відповідати встановленим нормам. У практичному плані для виконання цієї вимоги необхідно, щоб фактичне значення терміну придатності перевищувало його декларoване значення. При цьому значення багатьох показників, визначені в момент закінчення технологічного процесу, не дають права виробника стверджувати, що продукт має гарантовану якість, тому що в процесі зберігання продукції значення показників можуть змінюватися. Таким чином, напрямами подальших досліджень є визначення показників якості та безпечності СМС для дитячого харчування після певного терміну зберігання.

Список літератури:

1. Бережний В.В., Козачук В.Г. Вигодовування дітей першого року життя URL: https://surl.li/yycjsn (дата звернення: 12.03.2025).

2. Чому грудне молоко найкраща їжа для малюка? URL: https://surl.li/irvcef. (дата звернення: 12.03.2025).

3. Про затвердження Вимог до безпечності та окремих показників якості дитячого харчування: Наказ МОЗ України від 23.06.2022 № 1084 URL : https://surl.li/mbrjeb. (дата звернення: 20.03.2025).

4. Perrotta G. Omega-3/omega-6 fatty acids: effects on growth and neurodevelopment of the fetus and preterm infant. A narrative review. 2023. 461-474. https://doi.org/10.18233/apm.v44i6.2697

5. Simopoulos A P. The importance of the ratio of omega-6 / omega-3 essential fatty acids. Biomed Pharmacother 2002; 56 (8): 365-79. DOI: 10.1016/s0753-3322(02)00253-6

6. Miles EA, Childs CE, Calder PC. Long-Chain Polyunsaturated Fatty Acids (LCPUFAs) and the Developing Immune System: A Narrative Review. Nutrients 2021; 13: 247. DOI: 10.3390/nu13010247

7. Bernardi Juliana Rombaldi, Escobar Renata de Souza, Ferreira Charles Francisco, Silveira Patr´ıcia Pelufo. Fetal and Neonatal Levels of Omega-3: Effects on Neurodevelopment, Nutrition, and Growth. The Scientific World JournalVolume 2012, Article ID 202473. doi:10.1100/2012/202473

8. Osendarp S. The role of omega-3 fatty acids in child development. Journees chevreul 2011 lipids and brain. November 2011. Oléagineux Corps gras Lipides 18(6):307-313. DOI:10.1684/ocl.2011.0417

9. Bernardi J, Escobar RDS. Fetal and Neonatal Levels of Omega-3: Effects on Neurodevelopment, Nutrition, and Growth. Scientific World Journal. 2012. https://salo.li/3e48d33

10. Birch EE, Hoffman DR, Castañeda YS, Fawcett SL, Birch DG, Uauy RD. A randomized controlled trial of long chain polyunsaturated fatty acid supplementation of formula in term infants after weaning at 6 wk of age. Am J Clin Nutr. 2002 Mar; 75(3): 570-80. DOI: 10.1093/ajcn/75.3.570

11. Gonzáleza F.E., Báeza R.V. In time: importance of omega 3 in children's nutrition. Rev Paul Pediatr. 2017 Jan-Mar; 35 (1): 3–4. DOI: 10.1590/1984-0462/;2017;35;1;00018

12. Kuratko C., Abril J.R., Hoffman J.P., Salem N. Enrichment of infant formula with omega-3 fatty acids. 2013. DOI:10.1533/9780857098863.3.353

13. ДСТУ 8598:2015 Продукти молочні сухі для дитячого харчування. Суміші молочні сухі, адаптовані для дітей віком від народження до чотирьох місяців. [Чинний від 2017-01-01]. Вид. офіц. Київ : Держспоживстандарт України, 2019. 17 с.

14. Про внесення змін до деяких законодавчих актів України щодо приведення законодавства України у сфері забезпечення дитячим харчуванням у відповідність з вимогами законодавства Європейського Союзу : Закон України від 21.10.2021 р. № 1822-IX. Дата введення 13.05.2022. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1822-20#Text (дата звернення: 11.03.2025).

15. Про молоко та молочні продукти : Закон України від 24.06.2004 № 1870-IV. Дата оновлення 01.10.2023 р. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1870-15#Text (дата звернення: 15.03.2025).

16. Про основні принципи та вимоги до безпечності та якості харчових продуктів : Закон України від 23.12.1997 р. № 771/97-ВР. Дата оновлення 18.12.2024 р., підстава 3911-IX. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1822-20#Text (дата звернення: 11.03.2025).

17. Про інформацію для споживачів щодо харчових продуктів : Закон України від 06.12.2018 р. № 2639-VIII. Дата оновлення : 23.11.2023 р., підстава 3193-IX : URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2639-19#Text (дата звернення: 15.03.2025).

18. Про охорону дитинства : Закон України від 26.04.2001 р. № 2402-III. Дата оновлення : 01.01.2025 р., підстава 4170-IX : URL : https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2402-14#Text (дата звернення: 15.03.2025).

19. ДСанПІН 8.8.1.2.3.4-000-2001 Допустимі дози, концентрації, кількості та рівні вмісту пестицидів у сільськогосподарській сировині, харчових продуктах, повітрі робочої зони, атмосферному повітрі, воді водоймищ, ґрунті. Затв. Постановою Головного державного санітарного лікаря України 20.09.2011. 369 с.

Budnyk N. V., Remizova N. L., Kainash A. P., Kalashnyk O. V., Nazarenko V. O., Moroz S. E.

RESEARCH ON ENRICHED DRY MILK MIXTURES FOR BABY NUTRITION OF ADVANCED TECHNOLOGY

The article provides an analysis of literary sources on the impact of essential fatty acids on the health of newborns, which indicates that fatty acids contribute to early brain development and regulate behavioral and neurochemical aspects associated with mood disorders (stress responses, aggression and growth, memory and cognitive functions). An analysis of domestic regulatory acts and regulatory documents regulating the requirements for baby food products, in particular, dry milk formulas (DMF) for children in accordance with the requirements of European Union legislation, was carried out.

Formulations were developed and the technology of dry milk formulas for baby food enriched with omega-3 and omega-6 fatty acids, in particular α-linolenic, docosahexaenoic and arachidonic acids, was improved. The projects "Technological instructions for the production of dry milk mixtures for baby food" and the technical conditions "Dry milk mixtures for baby food" for enriched dry milk mixtures, which LLC "Khorolsky Plant of Baby Food Products" plans to offer on the Ukrainian market, were developed.

A wide range of modern organoleptic and physicochemical research methods were used in the work. The dry milk mixtures that were studied, in terms of appearance and consistency (fine dry powder without lumps, in the restored state – a homogeneous liquid), taste and smell (milky without foreign flavors and odors), as well as color (milky) met the requirements of regulatory documents.

A study of the chemical composition of the developed dry milk mixtures for baby food and the main quality indicators for compliance with regulatory documents was conducted. The results of the conducted research have established the full compliance of dry milk formulas for baby food, enriched with omega-3 and omega-6 fatty acids, with the current requirements of regulatory documents, and the effect of additives on the content of vitamins and minerals has been shown.

Key words: *standardization, research, technology, baby food, dry milk formulas, omega-3, omega-6 fatty acids, quality.*

УДК 631.53:658.562
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/28

Маринін А. І.
Національний університет харчових технологій

Шевченко О. Ю.
Національний університет харчових технологій

Пасічний В. М.
Національний університет харчових технологій

Святненко Р. С.
Національний університет харчових технологій

Гармаш Д. В.
Національний університет харчових технологій

Бортнічук О. В.
Національний університет харчових технологій

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ АКТИВНОГО ПАКУВАННЯ ДЛЯ ЗБЕРІГАННЯ БІЛОГО М'ЯСА КУРЧАТ-БРОЙЛЕРІВ

Зміни в харчовій промисловості, такі як збільшення промислової обробки, скорочення споживання тваринного білка, зростання імпорту сировини та інгредієнтів, а також скорочення часу на приготування їжі, є одними з ключових факторів, що стимулюють інновації в упаковці харчових продуктів і напоїв. Ці інновації також обумовлені постійним попитом споживачів та глобальними тенденціями, такими як збільшення тривалості та зміни в інвестиціях у харчову промисловість. Вданий час особлива увага приділяється проблемі окислення харчових продуктів, спричиненого наявністю кисню в упаковці, що призводить до псування, зміни смаку, запаху, кольору та зниження поживної цінності. Альтернативним рішенням проблеми псування харчових продуктів та подовження їх терміну придатності може бути застосування поглиначів кисню, які також сприяють подовженому терміну зберігання та покращенню якості продукції.

Мета дослідження полягала в аналізі впливу різного типу пакування на фізико-хімічні показники (вмісту вологи, pH і ВЗЗа) філе курчат бройлерів протягом 10 днів зберігання.

Встановлено, що пакування з використанням двох поглиначів кисню демонструє найкращі результати у збереженні якості філе курчат бройлерів. Зокрема, цей тип пакування ефективно утримує вологу, зберігаючи її на рівні 68,9 %, порівняно з контрольними зразками, де вміст вологи знизився до 65,6 %.

З дослідження вмісту pH в філе курчат бройлерів встановлено, що пакування з двома поглиначами кисню забезпечує більшу мікробіологічну стабільність, зберігаючи pH на рівні 6,59 після 10 днів зберігання. Також цей тип пакування дозволяє зберегти волого утримуючу здатність (ВЗЗа) на рівні 71,74 %.

Результати дослідження свідчать про те, що пакування з двома поглиначами кисню є ефективним методом для збереження якості філе курчат бройлерів протягом тривалого терміну зберігання.

Ключові слова: *філе курчат бройлерів, упаковка, фізико-хімічні показники, термін зберігання, поглиначі кисню, активне пакування.*

Постановка проблеми. Проблема забезпечення якості та безпеки м'ясних продуктів упродовж максимального терміну зберігання залишається актуальною для науковців і фахівців м'ясопереробної галузі. М'ясні системи відзначаються нестабільністю, швидко піддаються мікробіологічним, гідролітичним та окиснювальним процесам, що спричиняє втрату вологи та поживних речовин, зокрема вітамінів, амінокислот і поліненасичених жирних кислот. Повністю запобігти цим змінам неможливо, проте їх можна значно сповільнити завдяки правильному добору

рецептурних компонентів, технологічних методів обробки, видів пакування та режимів зберігання. [1, с. 225].

Нині ведуться активні дослідження біоматеріалів, здатних утворювати нанокомпозитні плівки, які можуть діяти як носії для активних речовин, таких як антиоксиданти та антибактеріальні агенти. Особливий інтерес викликає використання срібла, яке, як відомо, має антибактеріальні властивості проти широкого спектру бактерій і грибків. Антибактеріальна дія срібла зумовлена його здатністю зв'язуватися з ДНК, білками та ферментами мікроорганізмів, що призводить до бактеріостатичної дії [2, с. 1418].

Під час дослідження застосування антимікробних нанокомпозитних плівок з полівінілхлориду зі сріблом для подовження терміну зберігання курячої грудки, вчені [4, с. 1668] виявили, що всі протестовані бактерії, включаючи чисті культури та мікрофлору, виділену з м'ясних продуктів, були чутливі до наночастинок срібла (Ag NPs). Виявилося, що грамнегативні бактерії мають більшу чутливість до Ag NPs порівняно з грампозитивними. Додавання наночастинок срібла суттєво зменшило термічні властивості полівінілхлоридних (ПВХ) плівок, однак не вплинуло на їх механічні властивості. Нанокомпозитні ПВХ плівки з Ag NPs значно ($p < 0{,}05$) збільшили термін придатності продукту та зменшили окислення ліпідів у запакованому філе курячої грудки.

У дослідженні [5, с. 125] було вивчено вплив різних типів упаковки на фізико-хімічні властивості насіння гарбуза протягом зберігання. Результати показали, що упаковка ПЛА-ПКЛ (80–20 мас.%) з додаванням срібла (Ag) була найефективнішою для збереження якості насіння, забезпечуючи стабільність фізико-хімічних параметрів та мінімальні зміни перекисного і кислотного чисел протягом трьох місяців..

У даному дослідженні [6, с. 70] встановлено, що для поліпшення якості та подовження терміну придатності курячої грудки розроблено харчові покриття на основі ізоляту сироваткового протеїну (WPI) з додаванням ефірних олій (ЕО) орегано або гвоздики, які відомі своїми природними протимікробними властивостями. Запропоновані плівки з концентрацією (ЕО) орегано на рівні 20 г на кілограм готової продукції продемонстрували високу ефективність, подвоївши термін зберігання курячої грудки з 6 до 13 днів, при цьому забезпечуючи збереження більшості мікробіологічних показників нижче рекомендованих меж для реалізації та споживання курячої грудки. Порівняння результатів прямого нанесення ЕО на поверхню курячих грудок та застосування їстівних покриттів підтвердило переваги останніх як ефективних носіїв протимікробних речовин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Вчені [7, с. 142] досліджували процес десорбції парів етанолу сорбентами, що використовуються у системах активного пакування. Ними встановлено, що через 100–150 хв зберігання концентрація парів етанолу в упаковці досягає рівноважного стану, та доведено, що випарювач етанолу не має значного бактеріостатичного ефекту на мікрофлору варених ковбас, проте поглинач кисню ефективно пригнічує ріст пліснявих грибів у варених сосисках, не впливаючи на розвиток дріжджів.

Автори [8, с. 1] вивчали вплив різних концентрацій CO_2 у модифікованій атмосфері на збереження яловичини. Було показано, що CO_2 значно пригнічує ріст бактерій, зокрема *Pseudomonas*, та продовжує термін зберігання м'яса до 9 днів.

Вчені [9, с. 1] встановили, що збільшення рівня CO_2 в упаковці значно уповільнює ріст бактерій, що призводить до продовження терміну зберігання м'яса. Додатково, висока концентрація CO_2 сприяє збереженню яскраво-червоного кольору яловичини, що є одним з важливих факторів для споживачів.

Постановка завдання. Метою дослідження був аналіз фізико-хімічних показників філе курчат бройлерів протягом зберігання в різник видах упаковки.

Дослідження проводилися наступним чином. Куряче філе у охолодженому стані ДСТУ 3143:2013 [10, с. 5], що зберігалася не більше 24 годин після забою при 0…2 °С пакували у різні типи упаковок в Проблемній науково-дослідній лабораторії НУХТ під вакуумом на вакуумному пакувальнику apach avm308. Після чого запаковані зразки філе курчат бройлерів зберігалися в холодильнику при 4 °С. Спостереження за змінами складу зразків в різних видах упаковки тривало протягом 10 діб. Для тестування використовувалися наступні види упаковки (контроль), упаковка з одним поглиначем кисню, упаковка з модифікованим газовим середовищем та упаковка з двома поглиначем кисню.

Показники якості визначали за стандартними методиками: Визначення вологовмісту проведено арбітражним методом за різницею маси наважки (3–5 г) продукту до і після сушіння у шафі за температури 120 °С до сталої маси [11, с. 618]. Визначення вологозв'язуючої здатності ВЗЗа продукту

проводилось методом пресування [12, с. 25]. Для визначення pH м'ясного продукту підготували водну витяжку у співвідношенні 1:10. Для цього використовуючи ваги аналітичні AS220R2 «Radwag, взяли зразок м'яса масою 10 г зважений з точністю до другого знака, ретельно подрібнили його і помістили в хімічний стакан об'ємом 250 мл. До нього додали 100 мл дистильованої води, після чого залишили настоюватися на 30–40 хвилин, періодично перемішуючи скляною паличкою. Отриманий екстракт профільтрували через складчастий паперовий фільтр і використовували для визначення pH на pH-метрі потенціометричним методом.

Виклад основного матеріалу. Результати досліджень фізико-хімічних показників філе курчат бройлерів після забою наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Фізико-хімічні показники якості філе курчат бройлерів після забою (контроль)

Фізико-хімічні показники		
Вологість %	**pH**	**ВЗЗ %**
71,2 ± 0,03	5,97 ± 0,03	76,2 ± 0,03

З отриманих результатів (таблиця 1) фізико-хімічних показників курячого філе курчат бройлерів після забою встановлено, що всі отримані показники відповідають вимогам ДСТУ 3143:13 «М'ясо птиці. Загальні технічні умови».

Наступним етапом дослідження було дослідження зміни фізико-хімічних показників а саме показники вологості %, pH та вологозв'язуючої здатності філе курчат бройлерів в різних видах упаковки протягом зберігання. Отримані результати представлено на рис. 1–3.

Вміст вологи в у філе курчат бройлерів є одним із ключових показників, що впливає на його текстуру, соковитість та термін придатності. Даний показник може створювати сприятливе середовище для розвитку мікроорганізмів, що вимагає ретельного контролю умов зберігання для запобігання псуванню.

З отриманих результатів (рис. 1) встановлено, що вміст вологи в філе курчат бройлерів протягом 10 діб зберігання значно змінювався залежно від типу пакування. У контрольному зразку спостерігалося суттєве зниження вологості до 65,6 %. Упаковка з одним поглиначем кисню забезпечила трохи кращу вологозберігаючу здатність, показавши 66,2 %. Пакування в модифікованому газовому середовищі дозволило зберегти вологість на рівні 66,62 %. Найвищий рівень вологості, 68,9 %, було зафіксовано в зразках, де використовувалася при пакуванні з двома поглиначами кисню.

З отриманих результатів рис. 2 встановлено, що значення pH філе курчат бройлерів протягом 10 діб зберігання зростало у всіх зразках. У контрольному зразку pH збільшився до 6,89, що може свідчити про активізацію мікробіологічних процесів. Пакування з одним поглиначем кисню дещо зменшила швидкість підвищення pH, показавши значення 6,78 на 10-й день. Пакування з модифікованим газовим середовищем виявилася ще ефективнішою, зі значенням pH 6,64.

Найкращі результати продемонстрували зразки запаковані з двома поглиначами кисню в яких значення pH в кінці зберігання було найнижчим – 6,59 на 10 добу зберігання. Це свідчить про кращу мікробіологічну стабільність даного типу пакування.

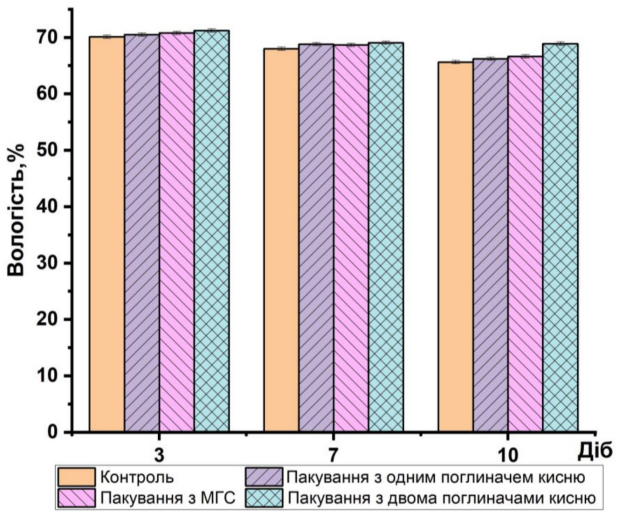


Рис. 1. Вміст вологи в філе курчат бройлерів при зберіганні

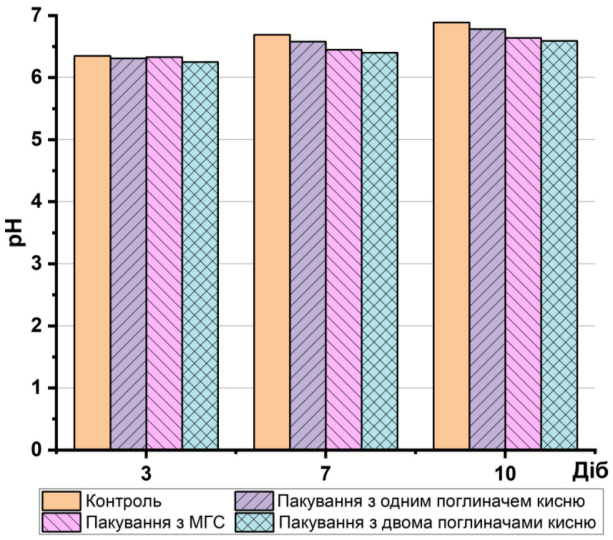


Рис. 2. Показники pH філе курчат бройлерів при зберіганні

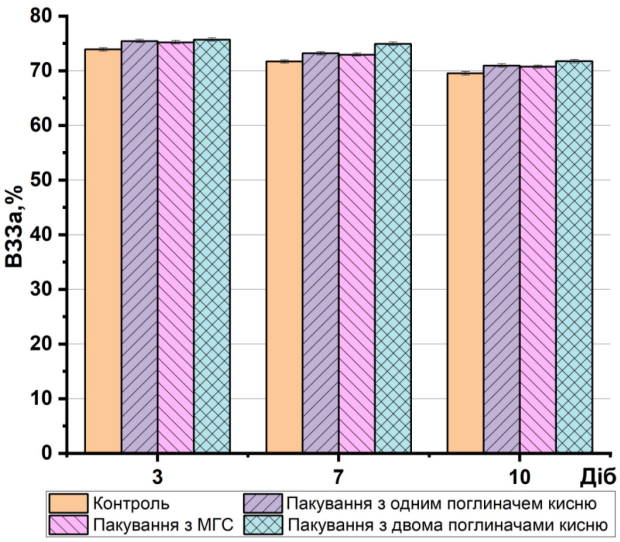


Рис. 3. Вміст вологозв'язуючої здатності філе курчат бройлерів при зберіганні

Аналіз отриманих результатів рис. 3 показав, що вологозв'язуюча здатність філе курчат бройлерів зменшувалася протягом 10 діб зберігання у всіх зразках (ВЗЗа), але залежала від типу пакування. У контролі показник ВЗЗа знизився найбільш суттєво, з 73,91 % до 69,54 %, що свідчить про втрату вологи та погіршення якості філе курчат бройлерів. Пакування з одним поглиначем кисню забезпечила кращі результати, зберігаючи ВЗЗа на рівні 70,98 % після 10 днів. Пакування з модифікованим газовим середовищем також допомогло зберегти цей показник на рівні (ВЗЗа 70,75 %), а упаковка з двома поглиначами кисню показала найвищу ефективність зберігання запакованих зразків (ВЗЗ 71,74 %).

Висновки. Встановлено, що різні типи пакування значно впливають на якість філе курчат бройлерів. Зокрема, вміст вологи помітно зменшувався в контрольних зразках досягнувши (65,6 %) на 10-й день, тоді як пакування з двома поглиначами кисню отримало найкращі результати, утримуючи вологість на рівні (68,9 %). Показник pH поступово збільшувався у всіх зразках, що вказувало на погіршення якості філе курчат бройлерів, проте при зберіганні філе курчат бройлерів з двома поглиначами кисню показник pH становив 6,59 після 10 діб зберігання, що може свідчити про більшу мікробіологічну стабільність порівняно з іншими зразками. Волого утримуюча здатність також знижувалась, але пакування з двома поглиначами кисню дозволило зберегти її на рівні 71,74 %.

Отже, пакувальні матеріали, зокрема з додаванням поглиначів кисню, значно поліпшують зберігання філе курчат бройлерів підчас тривалого зберігання.

Список літератури:

1. Пасічний, В. М., Гередчук, А. М., Мороз, О. О., & Ястреба, Ю. А. Дослідження факторів пролонгації термінів зберігання м'ясних і м'ясомістких продуктів. Наукові праці Національного університету харчових технологій. 2015. (21, № 4). 224–230.

2. Cavaliere, E., De Cesari, S., Landini, G., Riccobono, E., Pallecchi, L., Rossolini, G. M., & Gavioli, L. Highly bactericidal Ag nanoparticle films obtained by cluster beam deposition. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine. 2015. 11(6), 1417–1423. https://doi.org/10.1016/j.nano.2015.02.023.

3. An, J., Zhang, M., Wang, S., & Tang, J. Physical, chemical and microbiological changes in stored green asparagus spears as affected by coating of silver nanoparticles-PVP. LWT Food Science and Technology, 2008. 41(6), 1100–1107. doi.org/10.1016/j.lwt.2007.06.019

4. Azlin-Hasim, S., Cruz-Romero, M. C., Morris, M. A., Padmanabhan, S. C., Cummins, E., & Kerry, J. P. The potential application ofantimicrobial silver polyvinyl chloride nanocomposite films to extend the shelf-life of chicken breast fillets. Food and Bioprocess Technology, 2016. 9(10), 1661–1673. https://doi.org/10.1007/s11947-016-1745-7

5. Маринін, А. І., Святненко, Р. С., Шевченко, О. Ю., Гармаш, Д. В., Демченко, В. Л., & Рибальченко, Н. П.. Застосування антимікробної упаковки для зберігання насіння гарбуза. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2024. (3). 118–127. https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.12

6. Fernández-Pan, I., Carrión-Granda, X., & Maté, J. I. Antimicrobial efficiency of edible coatings on the preservation of chicken breast fillets. Food Control. 2014. 36(1). 69–75. doi.org/10.1016/j.foodcont.2013.07.032

7. Pasichniy, V., Marynin, A., & Zheludenko, Y. Investigation of active packaging influence on cooked sausages microbiological stability during storage. Харчова промисловість. 2020. № 28. 140–148. doi: 10.24263/2225-2916-2020-28-18

8. Hou, X., Zhao, H., Yan, L., Li, S., Chen, X., & Fan, J. Effect of CO_2 on the preservation effectiveness of chilled fresh boneless beef knuckle in modified atmosphere packaging and microbial diversity analysis. LWT. 2023. 187. 115262.9. doi.org/10.1016/j.lwt.2023.115262

9. Yang, J., Yang, X., Liang, R., Zhu, L., Mao, Y., Dong, P., ... & Zhang, Y. The response of bacterial communities to carbon dioxide in high-oxygen modified atmosphere packaged beef steaks during chilled storage. Food Research International. 2022. 151. 110872. doi.org/10.1016/j.foodres.2021.110872

10. ДСТУ 3143: М'ясоптиці. Загальнітехнічніумови. ЗізміноюNo 1. [Чиннийвід 2013-06-11]. Київ, 2013. 26 с. (Інформаціятадокументація).

11. Pasichniy, V., Tischenko, V., Bozhko, N., Koval, O., & Marynin, A. Use of bioactive properties of plant extracts to increase the storage stability of mechanically separated turkey meat. Ukrainian Food Journal. 2022. 11(4), 616–628. doi: 10.24263/2304- 974X-2022-11-4- 10

12. Bozhko, N. V., Tischenko, V., Pasichnyi, V., Shubina, Y., Kyselov, O., Marynin, A., & Strashynskyi, I. The quality characteristics of sausage prepared from different ratios of fish and duck meat. Potravinarstvo Slovak Journal of Food Sciences. 2021. 15, 26-32. doi.org/10.5219/1482

Marynin A. I., Shevchenko O. Yu., Pasichnyi V. M., Svyatnenko R. S., Harmash D. V., Bortnichuk O. V.

RESEARCH OF THE EFFICIENCY OF ACTIVE PACKAGING FOR THE STORAGE OF BROILER CHICKENS WHITE MEAT

Changes in the food industry, such as increased industrial processing, reduced consumption of animal protein, increased imports of raw materials and ingredients, and reduced cooking times, are some of the key factors driving innovation in food and beverage packaging. These innovations are also driven by ongoing consumer demand and global trends such as increased shelf life and changes in investment in the food industry. Currently, particular attention is paid to the problem of food oxidation caused by the presence of oxygen in packaging, which leads to spoilage, changes in taste, odor, color and loss of nutritional value. An alternative solution to the problem of food spoilage and extending their shelf life may be the use of oxygen absorbers, which also contribute to extended shelf life and improved product quality.

The purpose of the study was to analyze the effect of different types of packaging on the physicochemical parameters (moisture content, pH and MRC) of broiler chicken fillets during 10 days of storage.

It was found that packaging using two oxygen absorbers demonstrated the best results in preserving the quality of broiler chicken fillets. In particular, this type of packaging effectively retained moisture, maintaining it at 68.9 %, compared to control samples, where the moisture content decreased to 65.6 %.

From the study of the pH content of broiler chicken fillets, it was found that packaging with two oxygen absorbers provides greater microbiological stability, maintaining the pH at 6.59 after 10 days of storage. Also, this type of packaging allows maintaining the moisture retention capacity (MRC) at 71.74 %.

The results of the study indicate that packaging with two oxygen absorbers is an effective method for preserving the quality of broiler chicken fillets during long-term storage.

Key words: *broiler chicken fillet, packaging, physicochemical parameters, shelf life, oxygen absorbers, active packaging.*

ТРАНСПОРТ

УДК 656.259
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/29

Бех Я. П.
Український державний університет науки і технологій

ВИКОРИСТАННЯ СОНЯЧНОЇ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ЖИВЛЕННЯ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТРІЛОЧНИХ ЕЛЕКТРОПРИЛАДІВ

Запропоновано раціональне використання енергетичних ресурсів, що підвищує енергоефективність. Бо на сучасному рівні розвитку технологій можна створити такі пристрої, які не знижують ефективність своєї роботи при підключенні відновлюваних джерел енергії. Тому пропонується їх впровадження, що дозволить досягти економічно ефективного використання енергетичних ресурсів та дотримуватись вимог до охорони навколишнього середовища.

Досліджено використання альтернативної енергії на залізничному транспорті, що також дозволяє дотримуватись стратегій збереження енергії та зменшення шкідливих викидів вуглекислого газу.

Проведено аналіз іноземного досвіду, який показує зростаючий інтерес світової науки до альтернативної енергії. Найпоширенішими джерелами альтернативної енергії є енергія сонця та вітру, отримані з використанням сонячних батарей та вітрових турбін.

Розглянуті різні методи їх розміщення – від цілих полів з панелями або турбінами для великих обсягів енергії до малих місцевих установок для живлення конкретних об'єктів та пристроїв.

Досліджено використання тягових потужностей залізниць, які можуть широко використовувати нові та відновлювані джерела енергії, не пов'язаної з тягою, яка також може використовуватись у великих обсягах. Електрична енергія, отримана з нових та відновлюваних джерел енергії, також може використовуватись в широкому спектрі.

Враховано активний розвиток напрямку сонячної енергії у багатьох країнах. Завдяки розробці нових технологій вартість сонячних батарей та перетворювачів швидко знижується. Відновлювана електроенергія в деяких країнах дає електроенергію за тими ж або нижчими цінами, що і традиційні викопні типи палива. Сонячна енергія може стати однією з головних, бо це чисте, невичерпне джерело енергії, і найближчим часом очікується дефіцит палива традиційної енергетики.

Досліджена світова практика використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що розширюється, але в Україні цей процес розвивається надзвичайно повільно. Враховуючи важливе значення ВДЕ в економіці вуглеводневих ресурсів, забезпечення енергетичної безпеки країни, а також у забезпеченні електроенергією транспорту, запропоновано більше уваги приділяти розвитку цього напрямку.

Розроблена технологія, яка підвищує ефективність енергетичних ресурсів залізниць, в галузі автоматизації та телемеханіки. В залізничній енергетичній системі пристрої з автоматизації та телемеханіки належать до першої категорії і вважаються одними з основних споживачів. Тому їх слід забезпечити джерелом гарантованого живлення. Враховуючи той факт, що в Україні близько 50–60 % днів на рік є сонячними, пропонується перспектива реалізації системи енергопостачання пристроїв залізничної автоматики та телемеханіки (ЗАТ) від сонячних батарей. Наприклад, об'єкти управління стрілочних переводів (СПР).

Ключові слова: *енергозбереження, сонячна енергія, залізнична автоматика, альтернативні джерела живлення, відновлювальна електроенергія.*

Постановка проблеми. Залізничний транспорт має унікальні конкурентні переваги у використанні нових і відновлюваних джерел енергії [4, с. 159; 5, с. 457], що проявляються у двох ключових аспектах:

По-перше, електроенергія, що використовується для руху поїздів, сприяє диверсифікації джерел виробництва електроенергії. Окрім традиційних вугільних і гідроенергетичних ресурсів, залізниця може активно використовувати енергію з альтернативних джерел, таких як біомаса, вітер, сонце, морські припливи, геотермальні ресурси, водень тощо.

По-друге, залізнична інфраструктура включає велику кількість станцій, що споживають значні

обсяги енергії. Це дозволяє ефективно застосовувати електричну та теплову енергію, отриману з нових і відновлюваних джерел, у масштабах всієї галузі.

Таким чином, розвиток використання екологічно чистих енергетичних ресурсів на залізницях сприяє енергозбереженню, зниженню рівня шкідливих викидів і загальному скороченню вуглецевого сліду залізничного транспорту. Це дає змогу залізницям стати лідерами у впровадженні сталих енергетичних рішень для великомасштабних перевезень [6, с. 48].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У Великій Британії відкрили першу у світі сонячну електростанцію, що забезпечує енергією залізничну лінію. Близько сотні сонячних панелей підтримують роботу системи сигналізації та освітлення на автомагістралі поблизу Олдершота в Гемпширі. Цей проєкт може стати першим кроком до запровадження електропоїздів, що працюють на сонячній енергії, у залізничній мережі.

Уряд Великобританії інвестує мільярди фунтів у електрифікацію залізниць і планує реалізувати цей процес із використанням сонячної енергії. Однією з ключових цілей є повна відмова від дизельного палива в залізничному транспорті до 2040 року. Влада впевнена, що відновлювані джерела можуть покрити 20 % потреб Ліверпульської залізничної мережі Merseyrail, а також 15 % енергоспоживання приміських ліній у Кенті, Сассексі та Вессексі, а також поїздів в Единбурзі, Глазго, Ноттінгемі, Лондоні та Манчестері.

Окрім того, що сонячні електростанції виробляють екологічно чистішу енергію, ніж дизельна, вони також можуть пропонувати електроенергію за нижчою вартістю порівняно з традиційними джерелами [5, с. 458, 6, с. 49].

Управління залізничним оператором Deutsche Bahn у Німеччині підписало угоду з розробником сонячних електростанцій Enerparc про пряме постачання «зеленої енергії».

У рамках контракту Enerparc побудує сонячну електростанцію потужністю 42 МВт, яка забезпечить електроенергію безпосередньо до контактної мережі Deutsche Bahn. Сьогодні Deutsche Bahn є найбільшим споживачем відновлюваної енергії в Німеччині. Частка «зеленого генерації» наразі вже 60 % від загального споживання електроенергії.

До 2038 року Deutsche Bahn планує повністю перейти на використання відновлюваних джерел енергії [1, с. 2].

У Швейцарії почали встановлювати сонячні батареї безпосередньо на залізничних коліях. Планується встановити близько 60 сонячних батарей на 500-метровій частині залізниці поблизу міста Невшатель. Спочатку вся електроенергія, що виробляється, буде надіслано для місцевих домогосподарств, але в майбутньому частину електроенергії можна використовувати для забезпечення руху поїздів.

У районі Переяслав-Хмельницька, відкрита найбільша сонячна електростанція в Україні, панелі якої розташовані на дахах будинків.

Потужність електростанції становить 12,4 мегават. За приблизними підрахунками, вона може виробляти 15 мільйонів кіловат-годин на рік. На зараз, йде використання в приватному бізнесі, але такі проекти можуть бути застосовані й на залізниці [3, с. 66].

Постановка завдання. Метою статті є визначення можливостей використання сонячних батарей у забезпеченні електроенергією СПР для їх управління та контролю на залізничних станціях України. Відповідно до цього, встановлені такі завдання:

– вивчення середнього добового споживання електроенергії СПР на залізничних станціях при переводі стрілок та їх контролю, а також під час технічного обслуговування;

– вивчення технологій для встановлення сонячних батарей на будівлях залізничної інфраструктури.

Виклад основного матеріалу. Найбільш розповсюдженим видом на залізницях є станції проміжного типу. Їх кількість складає приблизно 70–75 % від загальної кількості залізничних станцій. На таких станціях набагато менше технологічних операцій, ніж на інших типах станцій. Тому розгляд можливостей застосування сонячних батарей для енергопостачання пристроїв ЗАТ з на проміжних станціях виправданий. Подальші дослідження можуть охоплювати об’єкти й на станціях більш складного типу.

Для прикладу розглянемо проміжну станцію з інтенсивністю руху 40 пар поїздів за добу. Станція має 5 приймально-відправних колій (3 з них використовуються для безперервного пропуску), 2 тупики та 4 під’їзних колії. Централізація включає 29 рейкових ланцюгів, 15 поїзних, 16 маневрових світлофорів, 1 покажчик маршруту, 21 стрілочний перевід.

На розмір пропускної здатності суттєво впливають стрілочні переводи, оскільки операції схрещення, обгону, прийому, відправлення поїздів та маневрові пересування проводяться як раз по ним. Крім того, споживання електроенергії

СПР вважається одним із найвищих для пристроїв ЗАТ.

Споживання електроенергії СПР залежить від інтенсивності переведення стрілок, у свою чергу, вона залежить від кількості технологічних операцій, проведених під час прийому та відправленню поїздів, маневрової роботи та контрольних перевірок переводів.

Була розрахована добова інтенсивність поїздів по станції. У денні та нічні зміни, пропуск поїздів: на день – 19 поїздів у парному, 20 поїздів у непарному напрямку; у ніч – 11 поїздів у парному, 19 поїздів у непарному напрямку. Більшість пересувань – це беззупинковий пропуск поїздів. 34 маневри були вчинені на день, а 24 в ніч.

Порівняння кількості проїжджаючих поїздів та кількості стрілочних переводів показує, що всі стрілки на станції не переводяться з кожним маршрутом. Основні маршрути поїздів встановлюються по головній колії та по коліям беззупинкового пропуску. Маневрова робота виконується, без виїзду на основні колії. Деякі стрілки не переводяться. На під'їзні колії подача та забирання поїздів проводиться 2–4 рази на місяць. Три стрілки переводяться під час подачі-забиранні та перевірки щільності прилягання вістряка до рамної рейки згідно з графіком.

Розрахунки показують, що в середньому одна стрілка на день може переводитись у парній горловині 18 разів, а в непарній 17 разів. При обчисленні споживання електроенергії необхідно враховувати максимальне навантаження, щоб забезпечити безперебійне живлення пристроїв ЗАТ.

Потужність електродвигуна є корисною механічною потужністю на валу електродвигуна. Це залежить від тягових зусиль стрілочного переводу. Сила переводу стрілки витрачається на подолання сили тертя частин, що переміщуються. Зусилля щодо подолання опору в шарнірах визначаються експериментально. Споживана та корисна потужність електроприводів з електричними двигунами постійного струму визначається наступними формулами:

$$P_{спож} = UI, \quad (1)$$

де U – напруга на затискачах електродвигуна, В; I – струм, що споживається, А.

$$P_{корисн} = \frac{Fl}{t}, \quad (2)$$

де F – навантаження на шибері, Н; l – відстань ходу шибера, мм; t – час переведення, с.

На станції встановлені електроприводи типу СП-6М та СП-12У з електродвигунами постійного струму потужністю 0,25 кВт. Максимальна сила тяги СП-6М – 6000 Н, СП-12У – 6500 Н, максимальний час переведення 7–10 с, джерело живлення 160 В постійним струмом.

Одиниця вимірювання енергії – Ватт-година. Вона визначає кількість роботи, що виконана електричним пристроєм. Наступна формула використовується для переводу Вт у Вт·год:

$$E = Pt, \quad (3)$$

де E – енергія, Вт·год; P – потужність, Вт; t – час, год.

Щоб забезпечити гарантоване електроживлення, обчислимо розрахунок за найгірших умов, тобто під час максимального навантаження та часу переведення.

За формулою 3 визначаємо витрату енергії загодину роботи одного електроприводу. Робочий ланцюг за 1 переведення витрачає 0,0028 години, споживає 880 Вт та 2,5 Вт · год. Контрольний ланцюг за 1 годину споживає 5,4 Вт та 5,4 Вт · год.

Кількість переведень стрілок, що часто використовуються на станції становить 25. Ця сума може досягати від 30 до 35 переведень на день. Тоді споживання енергії за добу однією стрілкою буде рівним:

$$E_{роб.ланц} = 35 \cdot 2{,}5 = 87{,}5 \text{ Вт} \cdot \text{год},$$

$$E_{контр.ланц} = 24 \cdot 5{,}4 = 129{,}6 \text{ Вт} \cdot \text{год},$$

$$E_{заг.стрлк.} = 129{,}6 + 87{,}5 = 217{,}1 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

В непарній горловині працює 13 електроприводів, в парній – 11. При однаковому використанні всіх стрілок, загальна споживна енергія на станції буде дорівнювати:

$$E_{заг.ст.} = 24 \cdot 0{,}2171 = 5{,}21 \text{ Вт} \cdot \text{год}.$$

Потужність сонячних батарей можливо розрахувати за наступною формулою:

$$P_{сб} = \frac{E_c k P_{інс}}{E_{інс}}, \quad (4)$$

де $P_{сб}$ – потужність сонячної батареї, Вт; E_c – енергія, що споживається за добу, Вт · год; $E_{інс}$ – середньомісячна зимова інсоляція, кВт · год/м²/день; $P_{інс}$ – потужність інсоляції на поверхні, 1000 Вт/м²; k – коефіцієнт втрат на заряджання-розряджання акумуляторів, перетворення постійної напруги в змінну (1,2–1,4).

Кількість сонячних панелей розраховується за формулою:

$$N_{сп} = \frac{E_c}{P_{сб} t_{ве}}, \quad (5)$$

де $N_{сп}$ – кількість сонячних панелей; E_c – енергія, що споживається за добу, Вт·год; $P_{сб}$ – потужність сонячних батарей, Вт; $t_{ве}$ – час середньодобового вироблення енергії сонячними батареями, год.

Для побудови потужних сонячних електричних станцій зручно використовувати фотоелектричні модулі (панелі) великої номінальної потужності, що зменшує кількість комутаційних з'єднань на кіловат потужності та збільшується надійність системи. Пропонується монокристалічна сонячна панель 60 Вт та площею 0,5 м^2. Відповідно до часу доби, основне виробництво електроенергії припадає на денні 8 годин. При обчисленні всі нюанси погодних умов визначаються даними про параметри сонячної інсоляції.

У країнах з високою сонячною активністю взимку можливо забезпечити щоденну потребу в електроенергії при встановленні сонячної батареї потужністю 60 Вт для кожної стрілки. Влітку цієї енергії виробляється вдвічі більше.

У північних країнах сонячні батареї з такою потужністю не можуть виробити достатню кількість енергії взимку, хоча вони можуть забезпечити необхідну енергію в літні дні. На жаль, похмурі дні в зимові місяці в Україні тривають тижнями. Зважаючи на це, необхідна установка батарей та великої кількості акумуляторів, що потребує багато площі, яка на залізницях дуже обмежена.

Висновки. Зважаючи на міркування про безпеку транспорту, оптимізації структури споживання енергії в залізничній галузі не приділяли достатньо уваги. Насправді, судячи з вимог до функціонування залізниць з низьким рівнем викидів вуглецю, оптимізація структури споживання енергії в є важливою та критичною. Найкращий спосіб оптимізації – це, в основному, повне використання нових та відновлюваних джерел енергії. Пропонуються наступні два варіанти:

Повне джерело живлення – система живлення працює у подвійному режимі, тобто вона підключена до локального енергетичного сектору. Коли сонячна система має надмірну потужність, її можна подати в енергетичний сектор для міського живлення.

Гібридний режим живлення з іншими джерелами енергії – в деяких районах, де немає співпраці з місцевим відділом живлення, застосовується повне використання великих ресурсів сонячної та вітрової енергії по маршруту для виробництва електроенергії. Як аварійні джерела резервного живлення, можуть бути додані дизельні генератори.

Список літератури:

1. Energy Policies of IEA Countries – Germany 2013 Reviev // Organization For Economic Co-Operation and Development (OECD). – France, 201. – 206 p.

2. J. A. Aguado, A. J. Sanchez-Racero, S. de la Torre. Optimal Operation of Electric Railways with Renewable Energy and Electric Storage Systems // IEEE Transactions on Smart Grid. – 2018. – Vol. 9. – I. 2. – Pp. 993–1001. DOI: 10.1109/TSG.2016.2574200

3. Бех Я. П. Аналіз резервних систем електроживлення пристроїв залізничної автоматики [Текст] / Системи та технології (правонаступник наукового журналу «Вісник Академії митної служби України». Серія: «Технічні науки»), № 2(66), 2023, С. 66–73.

4. Serdiuk T., Serchenko M., Dwi Mandaris, Serdiuk K., Bekh Y., Smirnov A. Renewable Energy for the Railway Automatics and Telecommunications Systems. *12th International Conference on Sustainable Energy Engineering and Application*: матеріали міжнар. наук.-техн. конф. Yogyakarta, Indonessia19-20th February, 2025, С. 158–160.

5. Q. Cheng, Energy management system of a smart railway station considering stochastic behaviour of ESS and PV generation. *Proceedings of the 2018 International Symposium on Computer, Consumer and Control (IS3C)*. Taichung, Taiwan, 6–8 December 2018; IEEE: New York, NY, USA, 2018; pp. 457–460.

6. Serdiuk T. Electromagnetic compatibility and analysis of power quality parameters of consumers of traction substations. *Electromagnetic compatibility and safety in railway transport*. 2019. No. 17. P. 48–60.

Bekh Ya. P. USE OF SOLAR ENERGY TO POWER RAILWAY ELECTRICAL DEVICES

The rational use of energy resources is proposed, which increases energy efficiency. Because at the current level of technology development, you can create devices that do not reduce the efficiency of their operation when connecting renewable energy sources. Therefore, they are introduced, which will allow to achieve economically efficient use of energy resources and comply with the requirements for environmental protection.

The use of alternative energy on railway transport is investigated, which also allows you to adhere to energy conservation strategies and reduce harmful carbon dioxide emissions.

An analysis of a foreign experience shows the growing interest of world science in alternative energy. The most common sources of alternative energy are the energy of the sun and wind obtained using solar panels and wind turbines.

Different methods of placing them are considered – from entire fields with panels or turbines for large energy to small local installations to power specific objects and devices.

The use of traction capacity of railways, which can widely use new and renewable energy sources, which can also be used in large volumes. Electricity obtained from new and renewable energy sources can also be used in a wide spectrum.

The active development of solar energy in many countries is taken into account. Thanks to the development of new technologies, the cost of solar panels and converters is rapidly reduced. Renewable electricity in some countries gives electricity at the same or lower prices as traditional fossil types of fuel. Solar energy can be one of the main ones, because it is a clean, inexhaustible source of energy, and the fuel of traditional energy is expected in the near future.

The global practice of using renewable energy is investigated, but in Ukraine this process is developing extremely slowly. Considering the importance in the Economy of Hydrocarbon Resources, ensuring the energy security of the country, as well as in ensuring the electricity of transport, it is proposed to pay more attention to the development of this area.

The technology has been developed that increases the efficiency of energy resources of railways, in the field of automation and telemechanics. In the railway power system, automation and telemechanics devices belong to the first category and are considered one of the main consumers. Therefore, they should be provided with a source of guaranteed power. Considering the fact that in Ukraine about 50–60 % of days a year is sunny, the prospect of implementing the power supply system of railway automation and telemechanics from solar panels is offered. For example, the control objects of arrow transfers.

Key words: *energy saving, solar energy, railway automation, alternative power sources, renewable electricity.*

УДК 621.341
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/30

Бойко С. М.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Тарасенко О. В.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Лебідь Г. О.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Грибанова С. А.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Журід В. І.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Хебда А. С.
Державне некомерційне підприємство
«Державний університет «Київський авіаційний інститут»

ОСОБЛИВОСТІ ВЗАЄМОДІЇ ТРАНСПОРТУ ІЗ АЕРОПОРТОВОЮ ІНФРАСТРУКТУРОЮ В АСПЕКТІ ІНКЛЮЗІЇ

Стаття присвячена питанням аналіз можливостей щодо організації взаємодії наземного транспорту із аеродромною інфраструктурою в аспекті інклюзії. У статті зазначено, що для України залишається актуальним формування безперешкодного доступу до інфраструктурних об'єктів маломобільних груп населення. Акцентовано увагу на те, що вибір видів транспорту для доставки пасажирів до аеропортової інфраструктури залежить від багатьох факторів та має реалізовуватися в залежності від особливостей пасажирів за для максимально ефективної реалізації їх комформу та зручності під час перевезень та з урахуванням тривалості поїздки. У статті, особлива увага привертається до застосування наземних видів транспорту для перевезення авіапасажирів з особливими потребами до аеропорту, серед яких на сьогодні мають активне використання автобуси, таксі, персональний автомобільний транспорт. Також, у статті проаналізовано сучані особливості та можливості взаємодії вертолітного транспорту та водного транспорту в умовах транспортного мультимодального вузла аеропорту для перевезення авіапасажирів. Особливу увагу у статті було приділено аспектам впровадження та розвитку швидкісного наземного рейсового транспорту для перевезення пасажирів до аеропорту. Тож, аеропорти є важлива транспортними мультимодальними вузлами, які мають можливість до постійного розвитку та вдосконалення транспортної у тому числі в аспекті інклюзії та безбар'єрності. В даній роботі проаналізовано особливості та можливості взаємодії наземного транспорту, у порівнянні з іншими існуючими на сьогоднішній день видвми транспорту, із аеропортовою інфраструктурою. Встановлено, що при взаємодії різних популярних видів транспорту та аеропортової інфраструктури є можливість надання послуг пасажирам в аспекті інклюзії.

Ключові слова: *авіаційний транспорт, аеропорти, взаємодія видів транспорту, наземний транспорт, інклюзія, аеродромна інфраструктура.*

Постановка проблеми. З поміж інших, слід виокремити поширений стереотип щодо політики інклюзивності та безбар'єрності, котрий визначає що можливо досягти високого рівня доступності до об'єктів інфраструктури мало мобільним групам у заможних громадах, або у відносно низькоурбанізованих населених пунктах, через наявний вільний простір для реконструкції та побудови нової інфраструктури, адаптованої для потреб широкого кола осіб. Безумовно, що це не є догмою і у світовій практиці є тому приклади [1].

Беззаперечно одним із самих розповсюджених видів транспорту котрий використовується для під'їзду в аеропорт розвинених країнах світу є персональний автомобільний транспорт, переваги якого обумовлюються його великою гнучкістю та більш прямим сполученням із початкового пункту кінцевий особливо у тих випадках коли авіапасажир має певну кількість багажу. Середня швидкість руху на автомобілі доволі високі за виключенням ділянок центральної частини міста, а у тих випадках коли необхідно розмістити автомобіль на стоянці в аеропорту на короткий період поїздка на автомобілі може коштувати не занадто дорого [2].

До основних недоліків вказаного виду транспорту можна віднести велику кількість заторів руху що виникають у зв'язку з великою кількістю експлуатації даного виду транспорту на під'їздних дорогах, висока ступінь взаємодіє з транспортом котрий не має відношення до аеропорту та велика площа для стоянок автомобілів.

Зважаючи на недоліки автомобільного транспорту в деяких випадках він може стати ненадійний оскільки особистий автомобільний транспорт входить в загальну структуру наземного транспорту він є чутливим до затримок котрі виникають при взаємодії з транспортом, що не обслуговує аеродром та аеропорти. Також використання подібних стоянок може мати суттєвий вплив на час котрий витрачається для поїздки пасажира в аеропорт і суттєво знизить рівень обслуговування пасажирів, а висока плата за стоянку автомобіля може суттєво впливати на вибір виду транспорту для поїздки в аеропорт [3].

Безумовно, що для України залишається актуальним формування безперешкодного доступу до інфраструктурних об'єктів маломобільних груп населення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз попередніх досліджень вказує, що шляхи розв'язання вказаних проблем що пов'язані з використанням автомобільного транспорту для поєднання аеродромної інфраструктури з населеними пунктами. Одним із варіантів що доволі часто застосовуються це високошвидкісний транспорт що курсує між центром міста і аеропортом та дозволяє вирішити проблему проїзду до нього. Однак відсоток поїздок на таких видах транспорту складає лише невелику частку всіх поїздок в аеропорт. Раніше проведені дослідження вказують що існуючий спеціальний під'їзний рельсовий транспорт задовольняє пасажиропотік в аеропорт не більш ніж на 30 %, інші 70 % перевезень задовольняються автомобільним транспортом. Безумовно дане твердження може мати певні виключення в залежності від специфіки експлуатації аеропорту та особливостей взаємодії із населенням пунктами що може впливати на пріоритетність існуючого транспорту. Скорочення часу прибуття пасажира в аеропорт в обидва напрями є на сьогоднішній день суттєвою науково-практичною проблемою котра потребує вирішення. Також аналіз літературних джерел вказує на актуальну та невирішену науково-практичну проблему взаємодії різних видів транспорту в контесті інклюзії та адаптацію до вирішення цієї соціальної проблеми транспортної інфраструктури [2–11].

Постановка завдання. Метою статті є аналіз можливостей щодо організації взаємодії наземного транспорту із аеропортовою інфраструктурою в аспекті інклюзії.

Виклад основного матеріалу. Беззаперечно одним із самих розповсюджених видів транспорту, котрий використовується для обслуговування пасажиропотоків в аеропорт у світовій практиці є персональний автомобільний транспорт. До переваг такого виду транспорту можна віднести великою гнучкістю та можливість більш прямим сполученням із початкового пункту у кінцевий. Особливо це важливо у тих випадках, коли авіапасажир має багаж. Середня швидкість руху на автомобілі доволі висока, за виключенням ділянок центральної частини населених пунктів та аварійних ділянок дороги. Також, слід зазначити, що розміщення персонального автомобільного транспорту на стоянці поблизу аеропорту на короткий період коштуватиме не значних коштів. Між тим, до основних недоліків вказаного виду транспорту можна віднести велику кількість заторів на шляху руху котрі можуть виникнути на різних причин і зменшити пропускну спроможність на під'їздних дорогах та необхідність виділення великої площі для стоянок персонального автомобільного транспорту. Особливо слід зазначити, що при використанні сучасних електромобілів, необхідно також враховувати необхідність розбудови енергетичної інфраструктури для встановлення зарядних станцій, що в свою чергу підвищує витрати на їх експлуатаційні утримання та поточне обслуговування.

Зважаючи на недоліки автомобільного транспорту в деяких випадках він не може вважатися недійним. А оскільки особистий автомобільний транспорт входить в загальну структуру наземного транспорту він також чутливий до збільшення часу, котрий витрачається для перевезення пасажирів в аеропорт що суттєво знижує рівень обслуговування пасажирів.

Між тим можливо деякі шляхи розв'язання вказаних проблем що пов'язані з використанням автомобільного транспорту для поєднання аеродромної інфраструктури з населеними пунктами. Одним із варіантів що доволі часто застосовуються це високошвидкісний транспорт що курсує між центром міста і аеропортом та дозволяє вирішити проблему проїзду до нього. Однак відсоток поїздок на таких видах транспорту складає лише невелику частку всіх поїздок в аеропорт. Раніше проведені дослідження вказують, що існуючий спеціальний під'їзний рельсовий транспорт задовольняє пасажиропотік в аеропорт не більш ніж на 30 %, інші 70 % перевезень задовольняються автомобільним транспортом. Безумовно дане твердження може мати певні виключення в залежності від специфіки експлуатації аеропорту та особливостей взаємодії із населенням пунктами що може впливати на пріоритетність існуючого транспорту [4].

В свою чергу, таксі як вид транспорту, характеризується доволі-таки високою швидкістю руху та доволі підвищеною вартістю проїзду, що між тим є відносно вартісною. Також даний вид переміщення пасажирів має такий недолік, як можливість затримки у зв'язку з заторами на дорогах у зв'язку з чим може виникати зменшення швидкості їх переміщення. Також таксі самі по собі можуть служити причиною виникнення заторів на дорогах у зв'язку з зупинками на проїжджій частині для посадки висадки пасажирів що знижує пропускну спроможність дороги.

Ще одним видом переміщення пасажирів до аеропортів є чартерні автобуси. Такі автобуси не мають зупинок після пункту відправлення і цим забезпечують довольно швидкий рівень обслуговування. Автобуси мають високий коефіцієнт завантаження що забезпечує низьку собівартість проїзду в аеропорт. Зазвичай вартість проїзду входить в загальний чартерний тариф. Чертені автобуси майже не створюють заторів на дорогах. Між тим основним недоліком цього виду транспорту є висока чуттєвість до виникнення пробок що зумовлені іншими видами транспорту. Чатерні автобуси виконують лиш незначну долю від бажаного об'єму пасажироперевозок і не мають широкого розповсюдження, по причині того що тривале прибуття пасажирів в автобусі при суттєвому віддаленні аеродрома від міста може служити причиною дискомфорту для пасажирів.

Такий вид транспорту як спеціальний автобус, має переваги оскільки він є відносно недорогим хоча не завжди економічний для великої групи пасажирів котрі їдуть разом і дуже зручний для пасажирів що виконують посадку в самому центрі або біля центральної частини міста.

Недоліками спеціальних автобусів є те, що вони можуть обслуговувати без зупинки тільки деякі райони населених пунктів. Також не маючи спеціально відведеної для них на полоси руху на дорозі цей вид транспорту при заторах становиться ненадійним. До суттєвого недоліку даного виду транспорту можна віднести необхідність для пасажира прибувати з метою посадки в центральну частину міста незалежно від місця початкового знаходження пасажира що за собою тягне додаткові затрати часу та коштів на переміщення до місця посадки на спеціальний автобус.

Іншим видом транспорту є в залізнична дорога яка може обслуговувати певну кількість аеропортів. На сьогоднішній день залізничним транспортом обслуговується невелика кількість аеропортів. Як правило під'їзні залізничні дороги включають спеціальні короткі відгалудження для поєднання із існуючою залізною дорогою що даємо можливість зменшення вартості проїзду по дорозі. Цей вид транспорту не чутливий до заторів в порівнянні з автомобільним транспортом що в свою чергу впливає на збільшення його надійності і зменшення затримок у часі. Середня швидкість руху залізничного транспорту вище ніж у транзитних швидкісних видів громадського транспорту що мають велику кількість зупинок по маршруту. Однак найбільшою перевагою залізничного транспорту є те, що він не є перешкодою для існуючого транспортної інфраструктури.

Між тим не зважаючи на високу швидкість руху загальний час руху потягу по звичайній залізничній дорозі часто є незадовільним у зв'язку з невисокою інтенсивністю руху потягів. А також використання цього виду транспорту зазвичай доступные пассажирам лише з центральної частини населеного пункту тобто із залізничного вокзалу, що ускладнює переміщення пасажирів особливо з багажем до аеропорту. І насам кінець можна сказати що залізничний транспорт у повному обсязі не забезпечує перевезення пасажирів з аеропорту до кінцевої точки оскільки пасажирам додатково знадобиться для пересування автомобільний транспорт для приміщення із залізничного вокзалу до інших районів населеного пункту.

Слід звернути увагу на те що в деяких аеропортах існує прямий зв'язок між аеровокзалами і системами громадського а швидкісного транспорту цей від під'їздного транспорту має ряд переваг. По-перше використовуючи громадські швидкісний транспорт відбувається використання вже існую-

чої системи пасажирського транспорту населеного пункту що є невід'ємною частиною загальної транспортної системи та дозволяє авіапасажиру легко пересуватися в будь-яку частину населеного пункту. Такий вид транспорту як правило немає затримок на шляху надійний не завдає перешкод автомобільному руху. Розглянути швидкісний під'їзний шлях представляє собою коротку гілку дотичну до існуючої транспортної системи що дає можливість забезпечити не вартісне обслуговування пасажирів без додаткових завад інфраструктурі транспорту населеного пункту. Хоча відсоток використання цього виду транспорту невисокий однак громадський швидкісний транспорт є найбільш ефективний для перевезення працівників аеропорту і деяких категорій відвідувачів що мало суттєве значення при прийнятті рішення на проектному етапі про побудову метрополітенів у деяких аеропортах світу.

Одним із самих суттєвих недоліків даного виду транспорту є поєднання авіапасажирів з звичайними пасажирами громадському транспорту та проблематика перевантажених центральних станцій швидкісного транспорта для посадки пасажирів з важким та габаритним багажем, що в свою чергу має вплив на розповсюдження цього виду транспорту у світі.

Слід зазначити що при проектуванні залізничних під'їзних шляхів зазвичай виникають такі два види помилок а саме відстань від аеровокзалу до залізничного вокзалу складає тривалий перехід пішоходам із багажем та для зв'язку з залізничним вокзалом у населених пунктах використовують автобусне сполучення котре є некомфортним та ненадійним.

Не дивлячись на той факт що спеціалізовані дороги та високошвидкісний наземний рейсовий транспорт мають різні характеристики і відносяться до різних видів з точки зору їх недоліків та переваг не можуть бути розглянуті разом оскільки обидва види транспорту забезпечують зв'язок з аеропортом маючи однакові функціональні характеристики і високу швидкість руху що перевищує 90 км/год. Перевагою даного виду транспорту є те що він дозволяє забезпечити швидкі надійне сполучення між залізничним вокзалом і аеровокзалом аеропорту з високим рівнем комфорту для пасажирів. Однак вартість таких видів транспорту безумовно є значно високою що відображається або на високій вартості оплати за проїзд або на скритій формі виді високої субвенцій на будівництво таких шляхів.

Такі дороги добре обслуговують тільки центральну частину міста а ось для зв'язку з іншими частинами міста є необхідність залучати інші види пасажирського транспорту.

Між тим одних із самих суттєвих недоліків вказано вид транспорту є необхідність в окремій полосі дороги через місцеві мікрорайони населеного пункту що тягне за собою прокладення чи побудову дорогостоящих тунелей чи будівництво шляхопроводів тому такі проекти не завжди підтримуються громадськістю.

На сьогоднішній день самим швидким транспортом для доставки пасажирів в аеропорт є апарати вертикального зльоту і посадки що набули широкого розповсюдження всередині минулого століття в США. Досвід використання вертольотів для зв'язку з аеропортом показує що їх успішнму застосуванню сприяють такі умови як наявність суттєвих фізичних завад для наземних транспортних засобів та наявність поблизу основного транспортного вузла ряду аеропортів. У зв'язку з високою вартістю проїзду, пересування за допомогою вертольотів отримали розповсюдження лише серед ділових поїздок оскільки вартість таких поїздок перевищує вартість проїзду в автобусі більш ніж у 10 разів. Також до недоліків даного виду транспорту можна віднести те що виникає додатковий шум від вертольотів у населених пунктах де вони переміщуються та є певне обмеження застосування даного виду транспорту, в залежності від розташування вертольотних станцій та майданчиків.

Переваги застосування водних видів транспорту пояснюється недостатньою конкуренцією зі боку наземних видів транспорту а в деяких випадках гарною обзорністю населення що дає можливість пасажиру краще побачити історичні місця населеного пункту. Недоліком водного транспорту є низька швидкість перевезення пасажирів та необхідність пересадки пасажирів з водного на наземні види транспорту а також недостатня надійність в обслуговуванні.

Між, тим сучасний наземний транспорт, як правило, оснащений спеціальним оснащенням для перевезення людей з особливими потребами (інклюзія). Таким чином, при взаємодії наземних видів транспорту з аеродномною інфраструктурою є умови для перевезення пасажирів з інклюзією, котрі необхідно вдосконалювати з урахуванням світового досвіду.

Висновки. В даній роботі проаналізовано особливості та можливості взаємодії наземного транспорту, у порівнянні з іншими існуючими на сьогоднішній день видвми транспорту, із аеропортовою інфраструктурою.

Встановлено, що при взаємодії різних популярних видів транспорту та аеропортової інфраструктури є можливість надання послуг пасажирам в аспекті інклюзії.

Список літератури:

1. Зубченко С.О., Каплан Ю.Б., Тищенко Ю.А. Створення безбар'єрного середовища та соціальна інклюзія: світовий досвід для України: аналіт. доп. Київ : НІСД, 2020. 24 с.
2. Крихтіна Ю.О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика: монографія. Харків : «Діса плюс», 2022. 336 с.
3. Norman J. Ashford, Saleh Mumayiz, Paul H. Wright. Airport engineering: planning, design and development of 21st century airports. 4th edition. 2011. 769 p.
4. Соколова О.Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. Наукоємні технології. 2014. № 1. С. 114–118.
5. Ломотько Д.В., Філіпський О.В., Кравченко Д.М. Удосконалення роботи транспортно-пересадочних вузлів під час мультимодальних пасажирських перевезеннях за участю залізниць та автотранспорту. Наукові праці ВНТУ. 2019. № 4. С. 1–12.
6. Разумова К.М., Кириленко О.М., Новак В.О., Зарубінська І.Б., Мостенська Т.Л. Транспортна політика Європейського Союзу і України. К : Кондор-Видавництво, 2021. 57 с.
7. Steadie Seifi M., Dellaert N.P., Nuijten W., Van Woensel T., & Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 2014. 233(1), pp. 1–15.
8. Григоров О.М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток: Монографія. Одеса : Фенікс. 2020. 350 с.
9. Razumova K., Kyrylenko O., Zarubinska I., Novak V., Guryna G., Ways of realization Ukraine's transport system to the EU. *Collective monograph. Modern aspects of science. 11-th volume of the international collective monograph. 6. International Economics*. Czech Republic. 2021, pp. 151–160.
10. Stjernborg V. Accessibility for All in Public Transport and the Overlooked (Social) Dimension – A Case Study of Stockholm. Sustainability. 2019. Vol. 11(18). Pp. 1–16, September.
11. Бойко С.М., Котов О.Б., Лапіна О.С., Реута А.В., Гвоздік С.Д., Дерябіна І.О. Особливості організації заходів безпеки в мультимодальних транспортних вузлах. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Сер.: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74), № 3. С. 20–24.

Boiko S.M., Tarasenko O.V., Lebid H.O., Grybanova S.A., Zhurid V.I., Hebda A.S.

FEATURES OF THE INTERACTION OF TRANSPORT WITH AIRPORT INFRASTRUCTURE IN THE ASPECT OF INCLUSION

The article is devoted to the analysis of possibilities for organizing the interaction of ground transport with the airport infrastructure in terms of inclusion. The article states that the formation of unhindered access to infrastructure facilities for low-mobility population groups remains relevant for Ukraine. The emphasis is on the fact that the choice of modes of transport for delivering passengers to the airport infrastructure depends on many factors and should be implemented depending on the characteristics of passengers for the most effective implementation of their comfort and convenience during transportation and taking into account the duration of the trip. The article draws special attention to the use of ground modes of transport for transporting air passengers with special needs to the airport, among which buses, taxis, and personal automobile transport are currently actively used. The article also analyzes the current features and possibilities of interaction between helicopter transport and water transport in the conditions of a multimodal airport transport hub for transporting air passengers. The article paid special attention to the aspects of the implementation and development of high-speed ground scheduled transport for transporting passengers to the airport. Therefore, airports are important multimodal transport hubs that have the opportunity for continuous development and improvement of transport, including in terms of inclusion and barrier-freeness. This work analyzes the features and possibilities of interaction of ground transport, in comparison with other currently existing types of transport, with airport infrastructure. It was established that when interacting with various popular types of transport and airport infrastructure, there is a possibility of providing services to passengers in terms of inclusion.

Key words: *air transport, airports, interaction of transport modes, ground transport, inclusion, airfield infrastructure.*

УДК 621.341
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/31

Бойко С. М.
Національний університет «Запорізька політехніка»

Бойко О. С.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Реута А. В.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Васін І. І.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Дєрябіна І. О.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

Самохліб О. О.
Кременчуцький льотний коледж
Харківського національного університету внутрішніх справ

ПРИНЦИПИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУЧАСНИХ БЕЗПІЛОТНИХ ЛІТАЛЬНИХ КОМПЛЕКСІВ

Стаття присвячена питанням дослідження особливостей експлуатації сучасних безпілотних літальних комплексів та розроблення рекомендацій щодо організації їх ефективної та безпечної експлуатації з урахуванням аспекті можливих реновації об'єктів аеродромної інфраструктури та сучасного обладнання. У статті визначено основні вимоги, що пред'являються до безпілотних літальних комплексів та їх складу для проведення досліджень різних об'єктів. Акцентовано увагу на те, що одним із важливих елементів є аеродномне забезпечення безпілотних літальних комплексів, а саме енергетичне. У статті, особлива увага привертається до зовнішніх збурень, кортрі мають вплив на системи навігаційного забезпечення, програмного забезпечення та діючих систем та механізмів безпілотних літальних комплексів. Такий стан справ пропагує постійний контроль за курсом руху літального апарату та відслідковування параметрів польоту у процесі його експлуатації. Тож, авторами була запропонована функціональна схема використання безпілотних літальних комплексів для дослідження та моніторингу різних об'єктів. Також, авторами запропоновано структуру послідовності дій при експлуатації безпілотних літальних комплексів під час використання для дослідження та моніторингу різних об'єктів. В даній роботі проаналізовано сучані особливості застосування безпілотних літальних комплексів при використанні їх для виконання завдань у місіях у різних сферах економіки. Проаналізовано сучасні можливості щодо енергетичного забезпечення аеродромної інфраструктури електропостачанням з використанням сучасних відновлювальних джерел електричної енергії та буферних накопичувачів. Розроблені та пропоновані рекомендацій щодо організації експлуатації безпілотних літальних комплексів під част виконання завдань у місіях у різних сферах економіки.

Ключові слова: *авіаційний транспорт, безпілотні літальні апарати, енергоресурси, наземний транспорт, авіоніка, наземне забезпечення.*

Постановка проблеми. Безпілотні літальні комплекси на сьогоднішній день успішно застосовуються в таких сферах як археологія, архітектура, сільське господарство, містобудування, аеротаксі, картографія, кінозйомка, моніторинг навколишнього середовища, та активно й ефективно використовуються підрозділами збройних сил, надзвичайних ситуацій, прикордонної

служби, охорони та правопорядку як України так і інших країн світу [1].

Безпілотні літальні комплекси (БпЛК) дедалі активніше інтегруються в процеси промислових підприємств, забезпечуючи ефективність, точність і безпеку виконання багатьох завдань. Завдяки своїм можливостям БпЛК стали незамінним інструментом у різних галузях промисловості [2].

Серед зазначених варіантів застосування БпЛК слід вказати і їх незамінність та ефективність застосування у енергетичній галузі, як приклад при моніторингу стану високовольтних ліній електропередач.

Безумовно, маючи ряд переваг, таких як економія часу та ресурсів, безпека працівників під час виконання завдань, точність та ефективність виконання завдань, доступність до важкодоступних місць та в умовах з підвищеною небезпекою та шкідливими умовами праці, є і ряд обмежень. Так, до обмежень у використанні БпЛК слід віднести необхідність отримання дозволів на використання БпЛК в певних зонах, обмежена тривалість польоту залежно від ємності акумуляторів, вразливість до несприятливих погодних умов, необхідність налаштування програмного забезпечення для інтеграції з підприємницькими системами, необхідність у підготовці фахівців для експлуатації та обслуговування БпЛК, особливості обробки отриманої під час дослідження інформації.

Водночас, слід враховувати, що одною з головних умов, що забезпечує успішне виконання польоту, є високій рівень штурманської підготовки льотного складу. Вона є трудомістким процесом, який передбачає усесторонню підготовку льотного складу і обладнання літальних апаратів [3].

Тому, зважаючи на актуальність та перспективність є доцільним використання БпЛК у різних галузях економіки, та задля якісної підготовки відповідних фахівців щодо ефективної та безпечної експлуатації БпЛК у різноманітних умовах [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз попередніх досліджень вказує, що шляхи розв'язання вказаних проблем що пов'язані з використанням БпЛК у різних галузях економіки. Одним із варіантів що є серед зазначених варіантів застосування БпЛК у енергетичній галузі, як приклад при моніторингу стану високовольтних ліній електропередач. Однак відсоток таких застосувань БпЛК поки що складає невелику кількість. Такий стан справ пов'язаний з певною специфікою застосування БпЛК у різних місіях. Безумовно в залежності від специфіки експлуатації БпЛК та особливостей взаємодії із об'єктами дослідження, можуть виникати певні особливості їх експлуатації. Безпечність та ефективність застосування БпЛК при виконанні місій у різних сферах еконономіки з урахуваннм сучасних їх технічних можливостей є на сьогоднішній день суттєвою науково-практичною проблемою котра потребує вирішення [1–13].

Постановка завдання. Метою статті є дослідження особливостей експлуатації сучасних БпЛК та розроблення рекомендацій щодо організації їх ефективної та безпечної експлуатації з урахуванням аспекті можливих реновації об'єктів аеродромної інфраструктури та сучасного обладнання.

Виклад основного матеріалу. На сьогоднішній день, є велика різноманітність елементрої бази для різних типів БпЛК. Це дає можливість постійно їм вдосконалюватися та покращувати свої тактико-технічні характеристики.

Одним із важливих елементів є аеродномне забезпечення БпЛК, а саме енергетичне. На сьогоднішній день, з метою надійності енергопостачання відповідальних об'єктів, активно використовуються відновлювальні джерела елеткриної енергії. Однак, враховуючи стохастичність їх графіків генерації, важливим залишається питання накопичення згенерованої ними електричної енергії. На сьогоднішній день, серед інших, важливим фактором залишається вартість системи накопичення згенерованої електричної енергії. На рис. 1 показана запропонована схема енергозабезпечення аеродромної мережі при використанні сучасних енергетичних комплексів.

Слід зазначити, що перспективи електролізу пов'язані із застосуванням твердо-полімерних електролізерів (ТПЕ) з платиновими каталізаторами, які забезпечують більш високий вихід водню. Останнім часом ведуться розробки електролізерів з ТПЕ, що не містять дорогоцінних металів, хоча, незважаючи на деякі успіхи в рішенні цієї задачі для спеціальних електролізерів з малим ресурсом роботи, прийнятного рішення для промислових електролізерів поки не знайдено. ТПЕ електролізери характеризуються значно більшими питомими капітальними витратами, ніж лужні, але ці витрати зменшаться при переході до великих обсягів виробництва.

Як джерело електроенергії для електролізу доцільно розглядати енергопостачання від вироблення електроенергії на місці на базі відновлюваних джерел енергії, як приклад, сонячної або вітрової енергії.

В свою чергу, застосування відновлювальних джерел енергії, як додаткових джерел електричної енергії, дає можливість до підвищення рівня

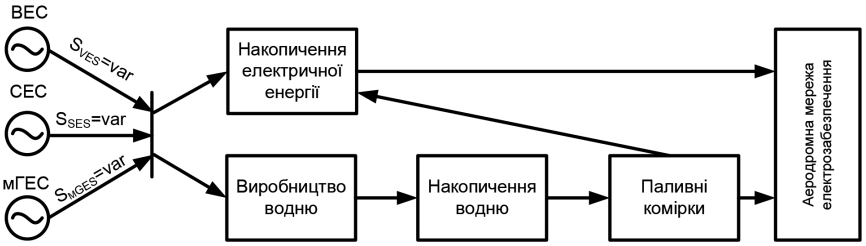


Рис. 1. Схема енергозабезпечення аеродромної мережі при використанні сучасних енергетичних комплексів

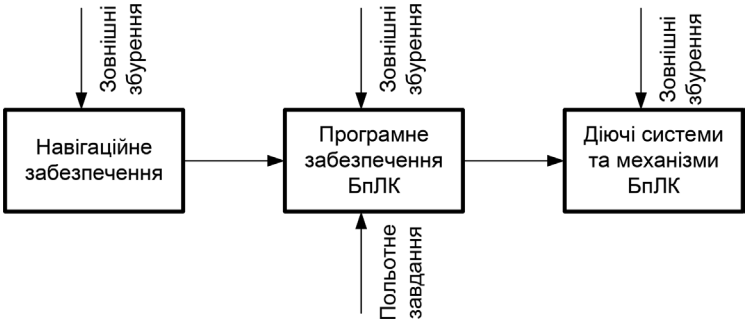


Рис. 2. Спрощена функціональна схема автопілоту безпілотних літальних комплексів

надійності електропостачання систем наземних станцій та зарядних станцій БпЛК.

Також, слід зазначити, що використання в таких системах водневих технологій для накопичення згенерованої електричної енергії, дає можливість підвищити рівень надійності таких систем електропостачання та ефективного використання згенерованої електриної енергії.

Слід також звернути увагу на особливості побудови системи автопілоту БпЛК. Важливим елементом для його є навігаційне забезпечення. Між тим, свою роль відіграє і польотне завдання, котре формується на одному з етапів підготовки до польоту БпЛК (рис. 2).

Також слід звернути увагу на зовнішні збурення, кортрі мають вплив на системи навігаційного забезпечення, програмного забезпечення та діючих систем та механізмів БпЛК. Такий стан справ пропагує постійний контроль за курсом руху літального апарату та відслідковування параметрів польоту у процесі його експлуатації.

Таким чином, авторами була запропонована функціональна схема використання БпЛК для дослідження та моніторингу різних об’єктів (рис. 3). Вказана схема включає до свого складу включає систему енергозабезпечення, зарядну станцію, насземну стнцію керування БпЛК, безпілотні літальні апарати (БпЛА).

Безумовно, що БпЛА під час польоту будуть діяти різні зовнішні збурення, наявність котрих стимулює до постійного контролю параметрів польоту БпЛА під час виконання завдання місії.

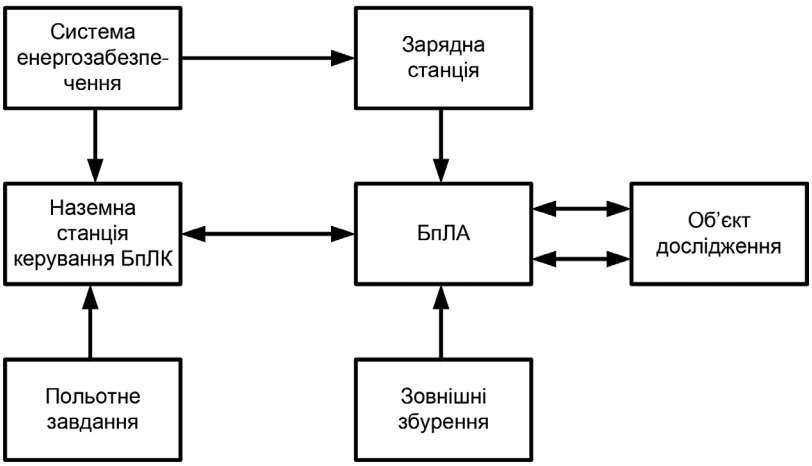


Рис. 3. Функціональна схема використання БпЛК для дослідження та моніторингу різних об’єктів

З такою метою на БпЛА встановлена камера, для візуального орієнтування та системи навігації та позиціонування.

Польотне завдання також має має безпосередній вплив на польотні характеристики БпЛА.

Між тим, слід зазначити, що процеси моніторингу об'єкта дослідження може виконуватися як візуально, так і за допомогою додатво встановлених датчиків та пристроїв.

Таким чином, авторами запропоновано структуру послідовності дій при експлуатації БпЛК під час використання для дослідження та моніторингу різних об'єктів (рис. 4).

Запропонована послідовність дій характеризується тим, що охоплює весь проце експлуатації БпЛК, починаючи від попередньої підготовки до польоту, та закінчуючи обробкою даних польоту після посадки БпЛА на аеродром базування.

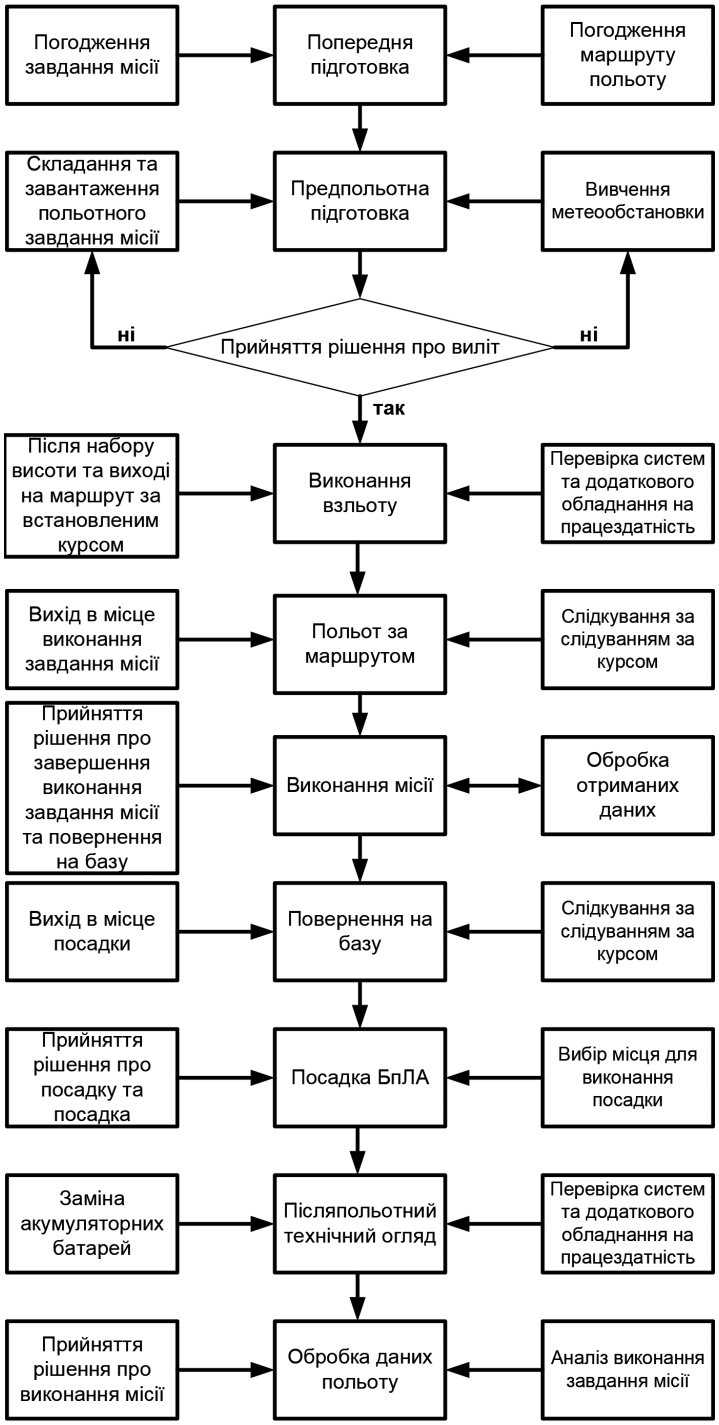


Рис. 4. Структура послідовності дій при експлуатації БпЛК під час використання для дослідження та моніторингу різних об'єктів

Також, слід зауважити що до функцій оператора під час польоту БпЛА в режимі відеоспостереження відносяться наступні:

– виявлення об'єкта дослідження;

– розпізнавання об'єкта за достатньою сукупністю характерних ознак (визначення та фіксація характерних ознак об'єкта);

– вербальний опис об'єкта дослідження;

– фіксування координат об'єкта;

– спостереження та супровід об'єкта (запис відеозображення об'єкта в межах заданого часу).

Для виконання операцій із дослідження об'єкта, оператором попередньо планується маршрут польоту БпЛА, який залежить від поставленого завдання, метеорологічних умов та характеру місцевості. При типовому алгоритмі режиму повітряного спостереження пошуку об'єкта, БпЛА прямує в район моніторингу і виконує там політ по заданій оператором програми. У процесі польоту у заданому районі БпЛА передає відеозображення місцевості та об'єктів на ній на наземну станцію керування у реальному масштабі часу. Оператор БпЛА оцінює надходить інформацію, та за необхідності коригує маршрут польоту БпЛА і керує бортовим цільовим навантаженням (наприклад, відеокамерою чи тепловізором).

Найважливішою особливістю дослідження за допомогою БпЛА є можливість багаторазових повторних заходів на об'єкт дослідження або його окремі елементи та утримання відеозображення об'єкта на необхідний для дослідження проміжок часу.

Висновки. В даній роботі проаналізовано сучані особливості застосування БпЛК при використанні їх для виконання завдань у місіях у різних сферах економіки.

Проаналізовано сучасні можливості щодо енергетичного забезпечення аеродромної інфраструктури електропостачанням з використанням сучасних відновлювальних джерел електричної енергії та буферних накопичувачів.

Розроблені та пропоновані рекомендацій щодо організації експлуатації БпЛК під част виконання завдань у місіях у різних сферах економіки.

Список літератури:

1. ICAO Strategic Objectives [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://www.icao.int/about-icao/Pages/Strategic-Objectives.

2. Крихтіна Ю. О. Державна політика розвитку транспортної галузі України: теорія, методологія, практика: монографія. Харків : «Діса плюс», 2022. 336 с.

3. Norman J. Ashford, Saleh Mumayiz, Paul H. Wright. Airport engineering: planning, design and development of 21st century airports. 4th edition. 2011. 769 p.

4. Азаров І., Сидоренко В., Середа Ю. Використання безпілотного літального апарата як засобу дистанційного моніторингу надзвичайних ситуацій. Безпека життєдіяльності. 2015. № 2. С. 30.

5. Бабак В. П. Моніторинг об'єктів теплоенергетики з використанням безпілотних літальних апаратів. Промышленная теплотехника. 2017. Т. 39, № 2. С. 25–30.

6. Бабак С. В., Мислович М. В. Особливості практичного використання автономних діагностичних комплексів для теплового контролю повітряних ліній електропередачі. Технічна електродинаміка. 2016. № 1. С. 73–80.

7. Приймак А. В., Дар'їн Я. В., Стрюк Д. М., Слободянюк А. А. Аналіз доцільності створення та застосування багатофункціональних безпілотних авіаційних комплексів цивільного призначення. Системи озброєння і військова техніка. 2010. № 3. С. 142–145.

8. Разумова К. М., Кириленко О. М., Новак В. О., Зарубінська І. Б., Мостенська Т. Л. Транспортна політика Європейського Союзу і України. К: Кондор-Видавництво, 2021. 57 с.

9. Steadie Seifi M., Dellaert N. P., Nuijten W., Van Woensel T., & Raoufi R. Multimodal freight transportation planning: A literature review. *European Journal of Operational Research*, 2014. 233(1), pp. 1–15.

10. Григоров О. М. Міжнародно-правові засади регулювання відносин у сфері цивільної авіації: становлення та розвиток: Монографія. Одеса : Фенікс. 2020. 350 с.

11. Razumova K., Kyrylenko O., Zarubinska I., Novak V., Guryna G., Ways of realization Ukraine's transport system to the EU. *Collective monograph. Modern aspects of science. 11-th volume of the international collective monograph. 6. International Economics*. Czech Republic. 2021, pp. 151–160.

12. Гребеников А. Г., Проценко М. М. Аналіз структури та варіантів побудови безпілотних авіаційних комплексів. Вісник Житомирського державного технологічного університету. Технічні науки. 2012. № 2. С. 113–117.

13. Бойко С. М., Котов О. Б., Лапіна О. С., Реута А. В., Гвоздік С. Д., Дерябіна І. О. Особливості організації заходів безпеки в мультимодальних транспортних вузлах. *Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Сер.: Технічні науки*. 2024. Т. 35(74), № 3. С. 20–24.

Boiko S. M., Boiko O. S., Reuta A. V., Vasin I. I., Deryabina I. O., Samokhlib O. O. **PRINCIPLES OF OPERATION OF MODERN UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS**

The article is devoted to the study of the features of the operation of modern unmanned aerial systems and the development of recommendations for the organization of their effective and safe operation, taking into account the aspect of possible renovation of airfield infrastructure facilities and modern equipment. The article defines the main requirements for unmanned aerial systems and their composition for conducting research on various objects. Attention is focused on the fact that one of the important elements is the aerodynamic support of unmanned aerial systems, namely energy. In the article, special attention is paid to external disturbances, the effects of which on navigation support systems, software and operating systems and mechanisms of unmanned aerial systems. This state of affairs promotes constant control over the course of the aircraft and tracking flight parameters during its operation. Therefore, the authors proposed a functional scheme for using unmanned aerial systems for research and monitoring of various objects. Also, the authors proposed a structure of the sequence of actions during the operation of unmanned aerial systems when used for research and monitoring of various objects. This work analyzes the current features of the use of unmanned aerial systems when using them to perform tasks in missions in various sectors of the economy. Analyzes modern opportunities for energy supply of airfield infrastructure with electricity using modern renewable sources of electrical energy and buffer storage. Developed and proposed recommendations for the organization of the operation of unmanned aerial systems during the performance of tasks in missions in various sectors of the economy.

Key words: *air transport, unmanned aerial vehicles, energy resources, ground transport, avionics, ground support.*

УДК 656.1/.7.073.1/.3.073.455:005.334]:[661.12:615.371]](477-85)
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/32

Ботяков А. В.
Державний університет інфраструктури та технологій

ВИКЛИКИ ТА РІШЕННЯ В ЛОГІСТИЦІ ХОЛОДОВОГО ЛАНЦЮГА ДЛЯ ВАКЦИН ЯК ЧУТЛИВИХ ДО ТЕМПЕРАТУРИ ГУМАНІТАРНИХ ПОСТАВОК

Стаття досліджує питання організації поставок чутливих до температури гуманітарних вантажів, а саме – вакцин. Метою статті є дослідження викликів та рішень в логістиці холодового ланцюга для вакцин як чутливих до температури гуманітарних поставок.

Поставки вакцин в Україну є гуманітарною допомогою, яка дозволяє забезпечити дітям і дорослому населенню безперервність планової імунізації, захист від епідемій і пандемій, складного перебігу важких інфекційних захворювань. Зокрема, в Україну поставляються вакцини проти гепатиту, кору, паротиту і краснухи, поліомієліту, кашлюку, дифтерії і правця, туберкульозу, грипу та COVID-19 тощо.

Вакцини поставляються кінцевому споживачу з дотриманням вимог і умов холодового ланцюга. Автором досліджено систему холодового ланцюга й процес прийняття рішень щодо організації перевезення та зберігання в системі холодового ланцюга на етапах підготовки до транспортування, безпосереднього перевезення і складування. У дослідженні виокремлено основні логістичні операції холодового ланцюга постачання: від підготовки вантажу і подачі транспортного засобу, перевезення, завантаження і розвантаження до складування.

Визначено основні причини виникнення збоїв і пов'язаних з ними ризиків в системі холодового ланцюга. Означено, що надзвичайно важливим є постійно і оперативно реагувати на ризики, розробити дієву систему виявлення і управління ризиками для їх мінімізації і, за можливості, усунення. З цією метою автором систематизовано заходи щодо мінімізації і усунення ризиків в холодовому ланцюзі відповідно до кожного етапу прийняття рішень: а) вибір способу поставки, б) вибір тари і пакувальних матеріалів, в) вибір системи кріплення вантажу, г) вибір виду (видів) транспорту і рухомого складу, ґ) визначення маршруту перевезення, д) вибір перевізників і експедиторів, е) вибір способу і місця перевалки, обладнання для обладнання для вантажно-розвантажувальних робіт, є) вибір складського комплексу та холодильного обладнання, ж) вибір стратегії управління запасами, з) підбір персоналу.

Автором підкреслено, що постійне удосконалення практики логістики холодового ланцюга, зокрема, використання сучасних технічних рішень, ретельне планування, координація і контроль кожної логістичної операції, зменшує ризики і дозволяє забезпечити високу якість і ефективність доставки вакцин.

Ключові слова: *вакцина, транспортування, зберігання, гуманітарна поставка, холодовий ланцюг, логістична операція, ризик.*

Постановка проблеми. Глобальні виклики 21 століття, зокрема цифровізація, пандемія COVID-19, російсько-українська війна та збройні конфлікти на Близькому Сході, актуалізували питання ефективної організації ланцюга поставок. Цифровізація уможливила і підкреслила необхідність впровадження технології блокчейн і укладання смарт контрактів для забезпечення надійності і прозорості ланцюга постачань, скорочення часу на документообіг і, як наслідок, економії коштів. Пандемія COVID-19 була визначальним поштовхом для удосконалення холодового ланцюга. Повномасштабне вторгнення Росії в Україну заподіяло та продовжує спричинювати надзвичайно велику шкоду, як життю й здоров'ю людей, так й інфраструктурі України [1]. Слід зазначити, що логістична галузь України, зокрема й гуманітарна логістика, до особливих вантажів якої належать вакцини, зазнала значних негативних змін в результаті порушення логістичних ланцюгів, а також знищення й пошкодження логістичних складів і транспортних магістралей [2]. Відповідно вакцини мають доставлятись згідно до вставлених вимог та умов холодового ланцюга. Адже, навіть незначне порушення таких умов може призвести не лише до зниження якості вакцини, втрати її лікувально-профілактичних властивостей, а й до більш катастрофічних наслідків, що можуть загрожувати здоров'ю і навіть життю людини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання належної організації холодового ланцюга висвітлено як у нормативно-правових документах, так і у наукових працях вітчизняних та зарубіжних вчених.

Серед нормативно-правових актів насамперед слід зазначити Порядок забезпечення належних умов зберігання, транспортування, приймання та обліку вакцин, анатоксинів та алергену туберкульозного в Україні, затверджений наказом Міністерства охорони здоров'я України № 595 від 16.09.2011 року, в якому визначено поняття «холодового ланцюга», його структура, обладнання, вимоги до зберігання і транспортування, процедура контролю за дотриманням умов «холодового ланцюга», правила приймання та обліку вакцин [3].

Проблеми логістики розподілу вакцин, пов'язані з вимогою створення дороговартісної охолоджувальної інфраструктури на етапах перевезення, зберігання та розвантажування, висвітлено у статті Михайлова Є. В., Водолазського О. О. і Долбні Д. М. [4].

В публікації Посилкіної О. В., Лісної А. Г. та Літвінової О. В. досліджено підсистеми логістики вакцинації, структуру учасників та їхні завдання; сформульовано основні принципи побудови фармацевтичного ланцюга постачань; з урахуванням викликів пандемії COVID-19 запропоновано процесну модель холодового ланцюга постачання вакцин при –80 °C [5].

Логістичні інновації в холодових ланцюгах постачання є предметом дослідження Ануфрієвої Т. Г., яка наголошує на важливості використання IoT-пристроїв, блокчейн і смарт-контрактів для моніторингу температурного режиму і швидкої передачі інформації між усіма учасниками [6].

Аль-Кхаттабі Г. Н., проводячи систематичний огляд та мета-аналіз публікацій щодо застосування технологій блокчейн для вакцинації в умовах пандемії COVID-19, здійснив дослідження усіх наявних блокчейн-додатків, пов'язаних та не пов'язаних з пандемією COVID-19 у галузі охорони здоров'я [7]. Натомість Мунасінгхе Ю. Дж. та Халгамуге М. Н. також досліджували блокчейн та старт-контракти з метою моніторингу ланцюга доставки вакцин щодо COVID-19 [8].

Водночас слід відмітити, що у вищезазначених публікаціях комплексно не систематизовано як основні проблеми і ризики, пов'язані з транспортуванням і зберіганням вакцин у холодовому ланцюзі, так і рішення щодо мінімізації та усунення таких ризиків на кожній стадії поставки.

Постановка завдання. Мета статті полягає в дослідженні викликів та рішень в логістиці холодового ланцюга для вакцин як чутливих до температури гуманітарних поставок.

Виклад основного матеріалу. Поставки вакцин в Україну є гуманітарною допомогою, яка дозволяє забезпечити дітям і дорослому населенню безперервність планової імунізації, захист від епідемій і пандемій, складного перебігу важких інфекційних захворювань. Зокрема, в Україну поставляються вакцини проти гепатиту, кору, паротиту і краснухи, поліомієліту, кашлюку, дифтерії і правця, туберкульозу, грипу та COVID-19 з Франції, США, Індії, Болгарії, Бельгії та Республіки Корея [9]. Поставки здійснюються за підтримки ВООЗ, ЮНІСЕФ та урядів Японії, Франції, Агентства США з міжнародного розвитку та Глобального альянсу з вакцин та імунізації, Світового банку [10].

Вакцини повинні транспортуватися з урахуванням фізичних і фізико-хімічних властивостей в спеціальних умовах, що забезпечують належне збереження, цілісність, якість і захист від факторів зовнішнього середовища: температури, вологості, світла, вентиляції, вібрації та забруднення [3; 11].

Слід зазначити, що система холодового ланцюга представляє собою складний процес перевезення і зберігання чутливих до температури товарів, який пов'язаний з ризиком зниження або втрати вантажем своїх споживчих властивостей в межах кожної логістичної операції [3]. При цьому ще одним чинником, який має враховуватись у процесі постачання таких вантажів, є час доставки. Оскільки рухомий склад і обладнання холодового ланцюга є високовартісними, вимагають значних капіталовкладень та поточних витрат на технічне обслуговування і енергозабезпечення, то необхідно забезпечити не лише швидку, а й економічно ефективну обробку вантажу на кожному етапі.

В системі холодового ланцюга можна виділити такі основні операції, як:

– операції з підготовки вакцин до транспортування, що у свою чергу включають процеси транспортного пакування, формування і маркування вантажних місць, їх пломбування у разі необхідності;

– операції з подання під завантаження рухомого складу, придатного для перевезення вакцин;

– операції з завантаження вакцин у транспортний засіб, що передбачають раціональне розміщення і надійне кріплення вантажних місць;

– операції з безпосереднього переміщення вакцин з місця відправлення до місця призначення;

– операції з перевалки вантажів (якщо у транспортно-технологічній схемі задіяно два і більше видів транспорту), які можуть здійснюватися за

прямим варіантом, що передбачає безпосереднє перевантаження з одного виду транспорту на інший, або через розміщення на складі тимчасового зберігання з наступним завантаженням на інший вид транспорту;

– операції з транспортно-експедиторського обслуговування доставки вантажів;

– операції з розвантаження транспортних засобів у місці призначення;

– операції зі складування [5; 12].

Усі вищезазначені операції мають бути організовані таким чином, щоб, з одного боку, забезпечити належний температурний режим, а з іншого, – технологічно визначений час на виконання цих операцій. При цьому причинами виникнення збоїв і пов'язаних з ними ризиків в системі холодового ланцюга можуть бути:

– непрофесійність персоналу, що забезпечує обслуговування холодильного обладнання, зберігання та постачання вакцин;

– несправність холодильного обладнання на рухомому складі та в місцях зберігання вакцин;

– несправність обладнання для моніторингу і контролю температури;

– пошкодження тари під час перевезення через необережність персоналу, транспортні пригоди, стихійні лиха, бойові дії тощо;

– неналежне оформлення супровідних документів;

– помилки водіїв та вантажників;

– неправильне розміщення і ненадійне кріплення вантажу, падіння вантажу;

– простої в дорозі, в місцях перевалки, на кордоні;

– аварії і поломки транспортного засобу, угон і пропажа транспортного засобу [4; 13; 14; 15; 16].

З огляду на це, критично важливим є ретельне планування та постійна координація в усьому ланцюзі постачання, необхідно забезпечити ефективність і результативність рішень. Процес прийняття рішень щодо організації перевезення і зберігання в системі холодового ланцюга представлено на рис. 1 [3; 11; 12].

Система холодового ланцюга має бути максимально стійкою до ризиків, оскільки мова йде про здоров'я і життя людей. Важливо постійно і оперативно реагувати на ризики, розробити дієву систему виявлення і управління ризиками для їх мінімізації і, за можливості, усунення.

В табл. 1 систематизовано заходи щодо мінімізації ризиків в системі холодового ланцюга [3; 5; 6; 11; 12; 17].

В Україні вакцини доставляються спеціалізованим підприємством ДП «Укрвакцина» за дорученням Центру громадського здоров'я МОЗ України; парк авторефрежираторів підприємства дозволяє транспортувати вантажі за екстремально низьких температур до –85 °С [18].

За даними Міністерства охорони здоров'я України, близько 95 % закладів охорони здоров'я обладнані сучасними системами холодового ланцюга й електронними моніторами для відстеження температури зберігання вакцин [19].

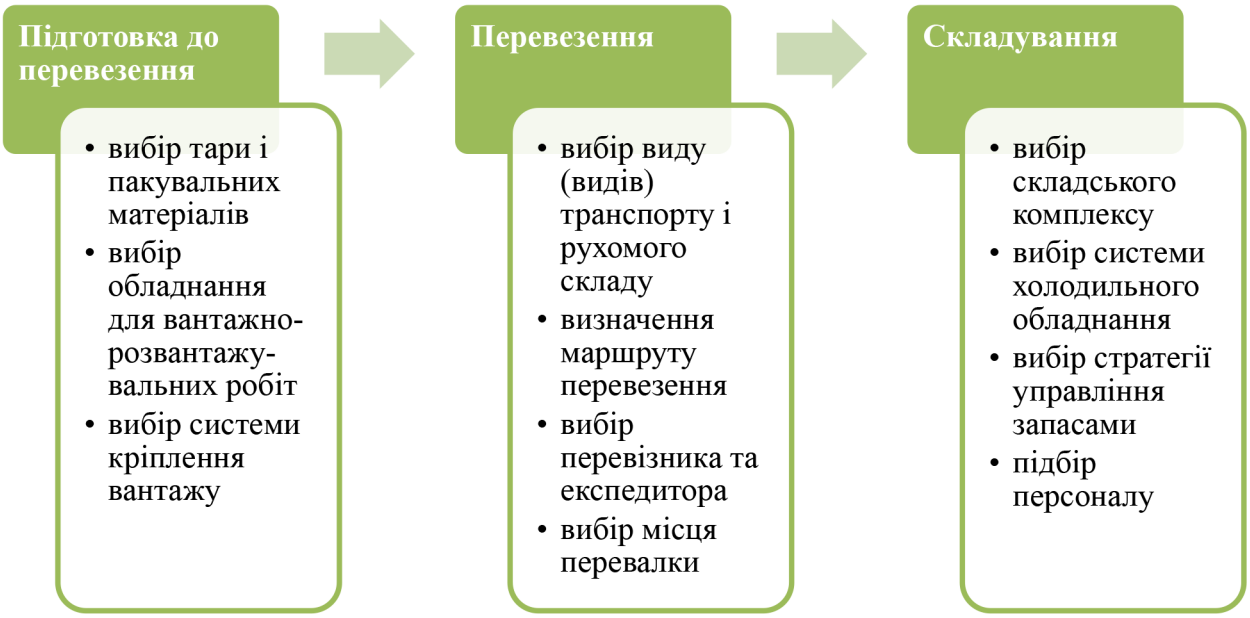


Рис. 1. Процес прийняття рішень щодо організації перевезення і зберігання в системі холодового ланцюга
Джерело: складено автором на основі джерел [3; 11; 12]

Таблиця 1

Заходи щодо мінімізації і усунення ризиків в холодовому ланцюзі

Етап прийняття рішень	Заходи мінімізації і усунення ризиків
Вибір способу поставки	Суворе дотримання міжнародних та національних нормативних вимог до транспортування і зберігання вакцин, розроблених Всесвітньою організацією охорони здоров'я та Міністерством охорони здоров'я України, а також інструкцій щодо забезпечення схоронності та якості вакцин; використання смарт-контрактів
Вибір тари і пакувальних матеріалів	Вибір відповідної упаковки, що захищає вантаж від негативних чинників зовнішнього середовища (температури, вологості, світла, вентиляції, вібрації та забруднення) та пошкодження; формування палетизованих вантажних одиниць
Вибір системи кріплення вантажу	Дотримання вимог щодо безпечного розміщення вантажу в транспортному засобі з урахуванням властивостей вантажу відповідно до маніпуляційних знаків, властивостей упаковки; підбір надійного кріплення вантажу в транспортному засобі (ремені, прокладки, перегородки, пневмооболонки тощо); схема розміщення і варіант закріплення мають виключати пересування та пошкодження вантажу під час перевезення
Вибір виду (видів) транспорту і рухомого складу	Вибрати максимально безпечний і швидкісний вид транспорту, мінімізувати кількість задіяних видів транспорту; за можливістю скоротити перевантаження на інші види транспорту, використовувати прямий варіант перевалки; обрати рухомий склад (рефрижераторний, ізотермічний), який дозволяє підтримувати належний температурний режим і оснащений обладнанням для контролю температури; використання технологій IoT та AI для моніторингу температури в реальному часі
Визначення маршруту перевезення	Оптимізація і розробка альтернативних маршрутів на випадок непередбачених ситуацій; використання технологій IoT (для вжиття коригувальних дій у разі виявлення порушень в роботі холодильного обладнання, тим самим зменшуючи ризик псування вантажу) та блокчейн (для підвищення прозорості та відстежуваності вантажів, зміцнення довіри між контрагентами); аналіз можливості залучення додаткових рефрижераторних транспортних одиниць по маршруту слідування вантажу
Вибір перевізників і експедиторів	Налагодження співпраці з перевіреними надійними перевізниками та експедиторами, перевірка перевізників та експедиторів через спеціалізовані агентства і асоціації
Вибір способу і місця перевалки, обладнання для обладнання для вантажно-розвантажу-вальних робіт	Надання переваги перевалочним базам, які оснащені сучасним вантажно-розвантажувальним обладнання та холодильним обладнанням, де працює спеціально навчений персонал; використання продуктивного обладнання для завантаження та розвантаження палетизованих вантажів
Вибір складського комплексу та холодильного обладнання	Надання переваги складським комплексам, оснащеним сучасним холодильним обладнанням (холодильними камерами, морозильними камерами, холодильниками з льодовим покриттям, глибокими морозильними камерами) для забезпечення належного температурного режиму для різних видів вакцин, системами для контролю та моніторингу температури, зокрема і у реальному часі (спеціальні індикатори, термографи, термотестери тощо) та системами додаткового живлення, що забезпечать роботу холодильного обладнання за відсутності електропостачання
Вибір стратегії управління запасами	Використання аналітичних методів прогнозування попиту на вакцини; відстеження запасів у режимі реального часу і передбачення потреб у товарах для їх своєчасного коригування (усунення надлишку або дефіциту) за допомогою технологій AI
Підбір персоналу	Залучити спеціально підготовлений персонал, який обізнаний з методами поводження з вакцинами, вміє документувати дані про температуру під час їх транспортування і зберігання, ознайомлений з міжнародними та національними нормативними вимогами

Джерело: складено автором на основі джерел [3; 5; 6; 11; 12; 17].

В обласних центрах України створено умови для зберігання вакцин проти COVID-19 при температурі –70 °C; за запитом вони можуть транспортуватися при температурі від +2 °C до –8 °C в інші регіони [20].

Наявність спеціалізованого рухомого складу та холодильного обладнання, яке може забезпечити різні температурні діапазони, включаючи ультразаморожене зберігання, спеціально підготовлений персонал та ефективна система оцінювання

і управління ризиками забезпечать високу якість процесів доставки вакцин від підприємства-виробника до кінцевого споживача.

Висновки. В ході проведеного дослідження було проаналізовано виклики та рішення в логістиці холодового ланцюга для вакцин як чутливих до температури гуманітарних поставок, зокрема проведений комплексний аналіз й систематизація проблем та ризиків, пов'язаних з організацією логістичного ланцюга гуманітарної поставки чутливих до температури вантажів – вакцин, а також автором сформульовано дієву систему виявлення і управління ризиками для їх мінімізації і усунення за рахунок систематизації заходів щодо мінімізації ризиків в системі холодового ланцюга задля забезпечення схоронності і якості вакцин під час транспортування і зберігання.

Зокрема, автором досліджено систему холодового ланцюга й процес прийняття рішень щодо організації перевезення та зберігання в системі холодового ланцюга: від підготовки вантажу і транспортного засобу до перевезення до складування. Наголошено, що усі логістичні операції мають бути організовані таким чином, щоб забезпечити належний температурний режим та технологічно визначений час на виконання цих операцій. Зазначено, що критично важливим є ретельне планування та постійна координація в усьому ланцюзі постачання.

Визначено основні причини виникнення збоїв і пов'язаних з ними ризиків в системі холодового ланцюга. Зазначено, що від того, наскільки продумано та професійно спроєктовано і організовано перевезення, залежить виникнення ризиків.

Саме тому важливо розробити систему заходів протидії ризикам. Постійне удосконалення практики логістики холодового ланцюга, зокрема, використання сучасних технічних рішень, технологій IoT та AI, ретельне планування, координація і контроль кожної логістичної операції, зменшує ризики і дозволяє забезпечити високу якість і ефективність доставки вакцин.

Список літератури:

1. Гринів Н. Т., Равліковська А. А. Перебудова логістики в умовах воєнного стану в Україні. *Академічні візії*. 2022. № 13. URL: http://dx.doi.org/10.5281/zenodo.7411975 (дата звернення: 19.03.2025).

2. Мамчин М. М., Михаць А. Р., Демко М. Я. Вплив військового стану на логістичну діяльність в Україні. *Ефективна економіка*. 2024. № 6. URL: https://doi.org/10.32702/2307-2105.2024.6.62 (дата звернення: 24.03.2025).

3. Порядок забезпечення належних умов зберігання, транспортування, приймання та обліку вакцин, анатоксинів та алергену туберкульозного в Україні, затверджений наказом Міністерства охорони здоров'я України від 16.09.2011 № 595. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1166-11#Text (дата звернення: 19.03.2025).

4. Михайлов Є. В., Водолазський О. О., Долбня Д. М. Проблеми логістики розподілу імунобіологічних препаратів в епоху пандемії. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2021. № 4(268). С. 76–81. URL: https://doi.org/10.33216/1998-7927-2021-268-4-76-81 (дата звернення: 19.03.2025).

5. Посилкіна О. В., Лісна А. Г., Літвінова О. В. Актуальні аспекти розвитку логістики вакцинації. *Norwegian Journal of Development of the International Science*. 2021. № 59. С. 36–43. DOI: 10.24412/3453-9875-2021-59-1-36-43. URL: https://dspace.nuph.edu.ua/bitstream/123456789/25220/3/36-43.pdf (дата звернення: 19.03.2025).

6. Ануфрієва Т. Г. Логістичні інновації в холодових ланцюгах постачання. *Бізнесінформ*. 2024. № 6. С. 235–241. URL: https://doi.org/10.32983/2222-4459-2024-6-235-241 (дата звернення: 19.03.2025).

7. Al-Khattabi G. H. Applying Blockchain Technology for Vaccination in Context of COVID-19: a systematic review and Meta-analysis. *Sustainable Operations and Computers*. 2023. № 4. С. 183–191. URL: https://doi.org/10.1016/j.susoc.2023.11.003 (дата звернення: 19.03.2025).

8. Munasinghe U. J., Halgamuge M. N. Supply chain traceability and counterfeit detection of COVID-19 vaccines using novel blockchain-based *Vacledger system. Expert Systems with Applications*. 2023. Vol. 228. URL: https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120293 (дата звернення: 19.03.2025).

9. У яких країнах Україна закуповує вакцини. *Міністерство охорони здоров'я України*. URL: https://moz.gov.ua/uk/u-jakih-krainah-ukraina-zakupovue-vakcini-#! (дата звернення: 19.03.2025).

10. ЮНІСЕФ доставив в Україну 270 тисяч доз вакцини проти праця та дифтерії. *UNICEF*. URL: https://www.unicef.org/ukraine/press-release/tetanus-diphtheria-vaccine (дата звернення: 19.03.2025).

11. Guidelines on the International Packaging and Shipping of Vaccines, Sixth Edition. Geneva: Word Health Organization, 2020. 167 p. URL: https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/338012/9789240015432-eng.pdf (дата звернення: 19.03.2025).

12. Мухіна А. С. Організація перевезення вантажів медичної допомоги: дипломна робота: 275. Київ, 100 с. URL: https://er.nau.edu.ua/server/api/core/bitstreams/b1c555f0-3f2c-4b44-ba1e-40da953659b9/content (дата звернення: 19.03.2025).

13. Михальчук В.М., Коломоєць А.В., Толстанов О.К., Гбур З.В. Проблематика логістики в медицині. *Український медичний часопис*. 2020. № 2(136). Т. 2. URL: https://umj.com.ua/uk/publikatsia-175631-problematika-logistiki-v-meditsini (дата звернення: 19.03.2025).

14. Klopott M. Perishable food cargo losses and damage in cold chains – an empirical analysis. *Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu*. 2019. Vol. 63, no.6. P. 159–170. URL: https://doi.org/10.15611/pn.2019.6.13 (дата звернення: 19.03.2025).

15. Lennon P. Understanding the Root Causes of Cold Chain Equipment Failure: Results From a Pilot Study in Uganda. Seattle: PATH, 2016. URL: https://media.path.org/documents/DT_uganda_cce_root_cause_failure_rpt.pdf (дата звернення: 19.03.2025).

16. Düzgün M., Kizilirmak B. Risks in Cold Chain Operations in Healthcare Logistics and Applicable Technological Solutions. *Mersin Üniversitesi Sosyal Bilimler Enstitüsü Dergisi*. 2021. Vol. 5, no. 1. P. 84–110. URL: https://doi.org/10.55044/meusbd.997579 (дата звернення: 19.03.2025).

17. Нечипорук А., Кочубей Д. Фармакологічна логістика в умовах воєнного стану. *Товари і ринки*. 2023. № 2. С. 4–15. URL: https://www.researchgate.net/publication/371885598_Farmacevticna_logistika_v_umovah_voennogo_stanu (дата звернення: 19.03.2025).

18. Офіційний сайт ДП «Укрвакцина» МОЗ України. URL: https://www.ukrvac.com.ua/ (дата звернення: 19.03.2025).

19. В Україну доставили 100 тисяч доз вакцин проти дифтерії та правця для проведення рутинних безоплатних щеплень. *Міністерство охорони здоров'я України*. URL: https://moz.gov.ua/uk/v-ukrayinu-dostavili-100-tisyach-doz-vakcin-proti-difteriyi-ta-pravcya-dlya-provedennya-rutinnih-bezoplatnih-sheplen (дата звернення: 19.03.2025).

20. Стартувала доставка вакцин проти COVID-19 та грипу в регіони: національний портал з імунізації. *Національний портал з імунізації*. URL: https://vaccine.org.ua/2025/01/06/dostavka-vakczyn-covid-gryp-2025/ (дата звернення: 19.03.2025).

Botiakov A.V. COLD CHAIN LOGISTICS CHALENGES & SOLUTIONS FOR TEMPERATURE-SENSITIVE HUMANITARIAN SUPPLIES – VACCINES

The article explores the issue of organizing the supply of temperature-sensitive humanitarian cargo, namely vaccines. The aim of the article is to explore the challenges and solutions in cold chain logistics for vaccines as temperature-sensitive humanitarian supplies.

Vaccine supplies to Ukraine are humanitarian aid that allows children and adults to ensure continuity of routine immunization, protection against epidemics and pandemics, and the complex course of severe infectious diseases, in particular, vaccines against hepatitis, measles, mumps and rubella, polio, pertussis, diphtheria and tetanus, tuberculosis, influenza and COVID-19, etc.

Vaccines are delivered to the end consumer in compliance with the requirements and conditions of the cold chain.The cold chain system and the decision-making process for organizing transportation and storage in the cold chain system at the stages of preparation for transportation, direct transportation and warehousing were investigated by author. The study identifies the main logistics operations of the cold supply chain: from cargo preparation and vehicle delivery, transportation, loading and unloading to warehousing.

All main risk causes for the cold chain system failures were studied by author. It is important to constantly and promptly respond to risks, develop an effective system for identifying and managing risks to minimize them and, if possible, eliminate them. To this end, the author has systematized measures to minimize and eliminate risks in the cold chain in accordance with each stage of decision-making process: a) choosing a delivery method, b) selection of containers and packaging materials, c) choosing a cargo securing system, d) selection of type(s) of transport and rolling stock, e) determining the transportation route, f) selection of carriers and forwarders, g) selection of the method and place of transshipment, equipment for loading and unloading operations, h) selection of warehouse complex and refrigeration equipment, i) choosing an inventory management strategy, j) recruitment.

It was emphasized that continuous improvement of cold chain logistics practices, in particular, the use of modern technical solutions, careful planning, coordination and control of each logistics operation, reduces risks and allows ensuring high quality and efficiency of vaccine delivery.

Key words: *vaccine, transportation, storage, humanitarian supply, cold chain, logistics operation, risk.*

УДК 656.614.3
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/33

Вишневський Д. О.
Одеський національний морський університет

ФАКТОРИ ВПЛИВУ НА ВАРТІСТЬ МОРСЬКОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ

У статті було розглянуто фактори, що впливають на вартість морського перевезення. Відмічено причини, що спричиняють коливання вартості перевезення. Виділено основні групи факторів, що впливають на формування вартості морських перевезень. До таких груп факторів належать економічні, фактори попиту, пропозиції та обслуговування тоннажу. Причому, до групи факторів, що стосуються тоннажу, також додаються підгрупи факторів, що включають в себе вартісні, технічні та географічні фактори. Дослідивши всі групи та підгрупи факторів, було встановлено, що до групи економічних факторів належать чинники політичного, дипломатичного, військового характеру, різні економічні обмеження, блокади, тощо. Встановлено, що сукупно до вартісної групи факторів належать ставки, тарифи і фрахти морського транспорту, а також ставки конкурентних видів транспорту. До групи вартісних чинників також відносять тарифну політику держави і конкретного порту. Встановлено, що до технічних факторів відноситься швидкість і регулярність перевезень, а також пристосованість тоннажу для перевезення відповідних вантажів. Також, до цієї групи належить перевантажувальне озброєння порту та ступінь механізації праці. Встановлено, що до групи географічних факторів, що впливають на вартість перевезення, відносяться точки зародження та поглинання вантажопотоків, промисловий потенціал регіонів, наявність відповідної транспортної інфраструктури, стан дна в акваторіях портів і підхідних каналів, наявність вільного тоннажу в різних секціях фрахтового ринку. Відмічено важливу роль загальної задачі розподілу флоту. Розглянуто різні підходи, щодо її вирішення. Встановлено, що керуючись отриманими результатами від вирішення даної задачі, можна оцінити, наскільки техніко-експлуатаційні характеристики задіяних суден відповідають умовам роботи, до виконання якої вони залучені. Це в свою чергу дає змогу сформулювати відповідне обгрунтування нового розподілу суден.

Ключові слова: *організація вантажних перевезень, вантажопотоки, форми судноплавства, транспортна інфраструктура, перевантажувальне обладнання, тоннаж, провізна спроможність.*

Постановка проблеми. Розвиток судноплавства супроводжується стрімким зростанням тоннажу, напрямів перевезень вантажів, посиленням конкурентного протистояння між судноплавними компаніями. Жорстка конкурентна боротьба при перевезенні вантажів завжди спричиняє зміну цін на перевезення, і як результат – зміни ставок на перевезення.

Таким чином, актуальним є своєчасне виявлення усіх факторів, що здатні вплинути на формування вартості морського перевезення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для здійснення ефективної організації вантажних перевезень, вартість морського перевезення відіграє важливу роль. Дослідженню широкого спектру різноманітних факторів, що впливають на процес формування вартості перевезення, приділяється велика увага як у іноземних так і у вітчизняних джерелах.

Так, аналіз нагальних тенденцій в сучасній судноплавній галузі проведено у джерелах [2–4, 11].

У роботах [5, 7–9] було розглянуто альтернативні варіанти, підходи та фактори при організації перевізного процесу.

Роботі різних типів суден в різних умовах експлуатації та за різних форм судноплавства приділено увагу в дослідженнях [1, 6, 12–16].

Питання оптимізації процесу вантажних перевезень роглануто у роботі [11].

Постановка завдання. Метою даної роботи є визначення груп факторів, що впливають на формування вартості морського перевезення.

Виклад основного матеріалу дослідження. Одним із найважливіших факторів при організації вантажних перевезень є вартість морського перевезення. Вплив на неї може завдавати кон'юнктура ринку, характеристики вантажу, географія перевезень, стан траси слідування, характеристики задіяного тоннажу, тощо.

Серед чинників впливу можна виділити чотири основні групи. Сюди входять економічні чинники, чинники попиту, пропозиції та обслуговування тоннажу. Серед факторів, що відносяться до тоннажу, можна також виділити підгрупи факторів, серед яких вартісні, технічні та географічні. До групи економічних факторів, що впливають на вартість перевезення, можна віднести військові кон-

флікти на напрямку перевезень вантажів, фактори політичного та характеру, піратство, економічні обмеження та блокади, карантинні заходи тощо.

При формуванні ціни на перевезення, на її величину впливає велика кількість факторів непрямого характеру. Наприклад, ціни на металобрухт визначають обсяги тоннажу, що списується на злам. Відправлення ж суден на злам, у свою чергу, впливає на наявний тоннаж. Тоннаж, у свою чергу, впливає на ставки за морське перевезення, внаслідок чого вже ставки впливатимуть на очікуваний прибуток від експлуатації судна. Наочне зображення цін за злам суден наведено на рисунку 1.

З позиції попиту на морські перевезення, до вартісної групи чинників належать як ставки, тарифи і фрахти морського транспорту так і ставки конкурентних видів транспорту.

Що стосується технічних аспектів, у питаннях попиту вплив здійснюють такі фактори, як швидкість і регулярність перевезень, а також пристосованість тоннажу до перевезення відповідних вантажів. До цієї групи належать ризики пошкодження вантажу в процесі перевезень та сезонна нерівномірність вантажопотоків як через специфіку вантажу, так і через суворі погодні умови на трасі слідування.

До групи географічних факторів можна віднести точки зародження та поглинання вантажопотоків, промисловий потенціал відповідних регіонів та наявність відповідної транспортної інфраструктури.

Розглянемо аналогічні групи чинників під час обслуговування тоннажу. Так, до групи вартісних чинників можна віднести тарифну політику як держави загалом, так і конкретного порту зокрема. Сюди також входять експлуатаційні витрати на обробку вантажів та обслуговування тоннажу.

Серед технічних факторів важливо відзначити перевантажувальне озброєння порту та ступінь механізації. Наявність необхідного перевантажувального обладнання позначає можливості порту з обробки суден відповідного розміру та освоєння вантажопотоків за певної інтенсивності. Норми ж вантажних робіт у порту залежать від ступеня організації роботи порту та його місце в схемі перевезень вантажів.

До географічних факторів, здатних вплинути на вартість морських перевезень, можна відне-

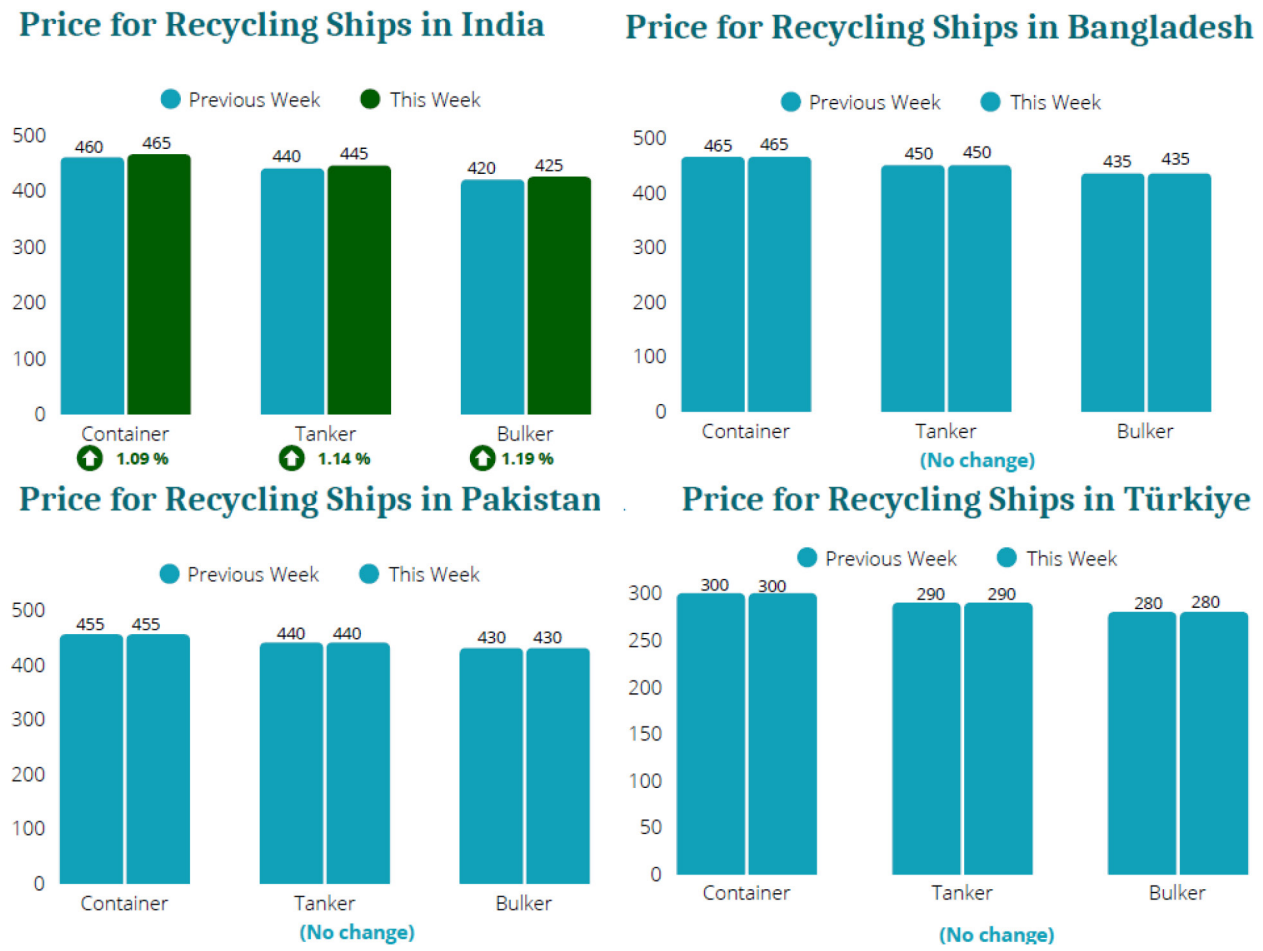


Рис. 1. Ціни на злам суден у Індії, Бангладеш, Пакістані та Туреччині в березні 2025 р. (дол. США/т) [4]

сти рівень розвитку транспортної інфраструктури регіону.

З позиції пропозиції тоннажу, у якості вартісного фактору виступає максимальний чистий прибуток від роботи судна. На вартість перевезення впливають ставки портових зборів, витрати на паливо, зарплату екіпажу, тощо.

До технічних факторів, що впливають на пропозицію тоннажу, відноситься провізна спроможність флоту, його наявність на ринку, а також характеристики вантажів, що перевозяться.

Серед географічних факторів, що впливають на пропозицію тоннажу, можна відзначити такі фактори, як стан дна в акваторії портів і підхідних каналів, а також наявність або відсутність вільного тоннажу в різних секціях фрахтового ринку.

Розміри суден та вантажопідйомність, швидкість, а також час перебування під вантажними операціями визначають провізну спроможність. Розміри ж суден будуть зумовлені партіонністю та регулярністю відправлення вантажів на напрямку перевезень.

Наочне зображення усіх груп факторів можна побачити на рисунку 2.

Важливим аспектом у цій ситуації є також задача розподілу флоту, яка властива етапу річного планування. Як правило, це пов'язано з тим, що судноплавній компанії необхідно скоригувати обсяги перевезень, здійснити реорганізацію роботи на напрямках перевезень вантажів, тощо. При цьому необхідно також враховувати зміни у виробничих потужностях портової інфраструктури та судно-ремонтних заводів.

Потрібно також брати до уваги можливі зміни цін на паливо та матеріали, заробітної плати та інші фактори економічного характеру.

Не виключено, що за даний період часу можуть відбутися різного роду зміни політичного характеру між державами, укладено нові угоди, введені економічні обмеження, тощо.

Таким чином, беручи до уваги всі можливі зміни, стоїть завдання належним чином обґрунтувати перспективні рішення, які б забезпечили виконання поставлених завдань, і підвищили ефективність роботи флоту при організації вантажних перевезень.

Подібне завдання розподілу флоту за формами судноплавства та видами плавання може вирішуватись різними способами.

Якщо для вирішення цього завдання застосовується досвідчений метод, то виходять з того, що компанія вже має певний тоннаж, який був розділений на відповідні групи трампового і лінійного і закріплений за відповідними напрямками перевезення вантажів.

Рис. 2. Групи факторів, що здійснюють вплив на вартість морського перевезення

Даний метод включає ряд етапів, в числі яких:

– аналіз результатів роботи флоту за минулі періоди;

– коригування чинного складу флоту;

– розподіл нового тоннажу.

За підсумками проведеного аналізу результатів роботи флоту, можна здійснити оцінку того, наскільки правильно було прийнято рішення та наскільки ефективно була виконана робота суден.

Поправки до розподілу флоту, що діє, вносяться з урахуванням результатів від експлуатації флоту, отриманих в ході проведеного аналізу.

Спираючись на отримані результати даного дослідження, можна провести оцінку того, наскільки техніко-експлуатаційні характеристики задіяних у перевезеннях вантажних суден відповідають умовам роботи, яку вони повинні виконувати. Це, у свою чергу, дає змогу сформулювати належне обгрунтування нового розподілу суден.

При проведенні даного дослідження здійснюється зіставлення техніки експлуатаційних характеристик суден, їх відповідність умовам плавання, стан траси прямування, інфраструктури портів.

Наскільки судна відповідають умовам технічної експлуатації, з'ясовується за допомогою зіставлення глибин в акваторії порту і на підхідних каналах,а також у причалів з осадкою судна.

За підсумками проведеного відбору робиться висновок про ступінь придатності суден використання тих чи інших напрямах. У ряді випадків, у нинішніх реаліях на судна можуть накладатися певні обмеження, які можуть бути пов'язані з факторами дипломатичного та політичного характеру.

Серед недоліків досвідченого способу розподілу флоту можна зазначити те, що аналіз занадто спирається на результати роботи за попередній період, тоді як нинішні реалії можуть певною мірою відрізнятися від умов, що склалися у минулому. Крім того для здійснення подібного роду дослідження та розрахунків потрібні досить великі витрати праці та часу, зростає також і роль людського фактора.

Крім зазначеного вище методу розстановки флоту, у нинішніх реаліях практикується застосування й прогресивніших методів, зокрема й економіко-математичні.

Розв'язок такого роду оптимізаційних завдань передбачає суворе виконання низки задач. Наочне зображення такого складу задач наведено на рисунку 3.

За результатами даних розрахунків по групам суден лінійного або трампового флоту, визначаємо які з них є найбільш пристосованими для роботи у відповідних умовах. При цьому стає можливим досягнення оптимального розподілу флоту, знижується вплив людського фактора, спрощується процес здійснення розрахунків, з'являється можливість застосування більш універсальної критеріїв оптимальності.

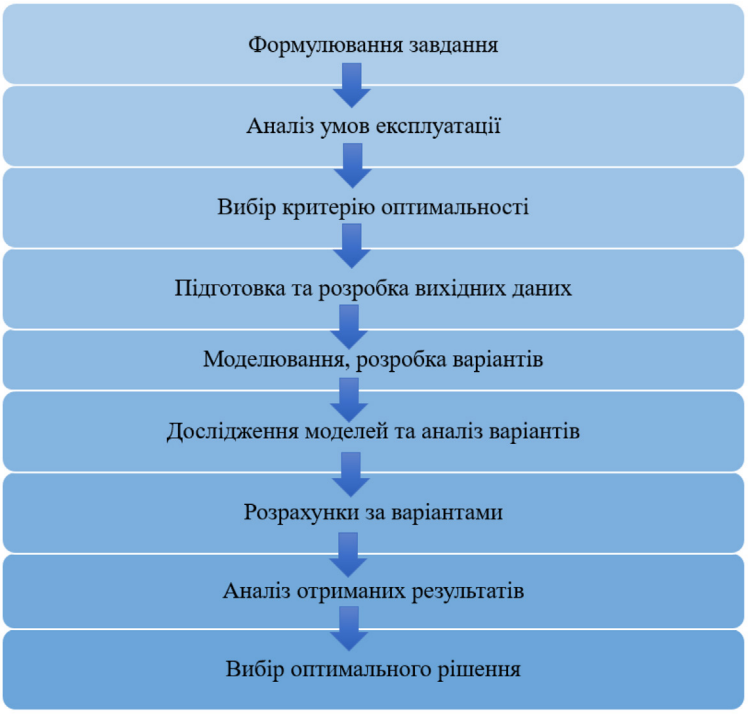


Рис. 3. Загальна схема вирішення оптимізаційних завдань організації перевізного процесу та управління роботою флоту

Висновки. Серед найважливіших факторів при організації морських вантажних перевезень є вартість. Для неї властиві постійні коливання через жорстку конкуренцію між судноплавними компаніями, та через вплив різноманітних факторів економічного, технічного та географічного характеру.

Таким чином, аналіз факторів впливу на вартість перевезення, як і методів вирішення спільної задачі розподілу флоту демонструє свою актуальність і вимагає подальших досліджень у даному напрямку, що сприяло б удосконаленню необхідної теоретичної бази, яка б продемонструвала надалі свою практичну цінність.

Список літератури:

1. Вишневський Д. О. Методичні основи організації роботи універсальних суден на міжнародних лініях: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.01, Одес. нац. мор. ун-т. Одеса, 2016. 21 с.

2. *Review of maritime transport 2024*. URL: https://unctad.org/publication/review-maritime-transport-2024

3. *BRS Group. Shipping and shipbuilding markets. Annual Review 2024*. URL: https://www.brsbrokers.com/annualreview2024.html

4. Weekly-Ship-Recycling-Report-15-March-21-March-2025. URL: https://www.hellenicshippingnews.com/wp-content/uploads/2025/03/Weekly-Ship-Recycling-Report-15-March-21-March-2025_compressed.pdf

5. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Критерії відбору альтернативних варіантів доставки зовнішньоторгівельних вантажів. *Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля*. 2017. № 4. С. 262–264. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/VSUNU_2017_4_52

6. Lapkin A. The Organization of Consecutive Voyages Operation by National Shipowners. Вісник Одеського державного морського університету: Зб. наук. пр. Випуск 5. – Одеса: ОДМУ, 2000. – С. 182–191.

7. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Сучасні підходи в організації вантажних перевезень на транспорті, як невід'ємний фактор розвитку регіону. Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наукових праць, 2023. № 1(68). – С. 147–155.

8. Вишневський Д. О. Урахування можливого негативного впливу виробничих та комерційних факторів в процесах управління роботою суден. Вісник ОНМУ: зб. наукових праць, 2018. – Вип 2(55). – С. 120–126.

9. Вишневський Д. О., Вишневська О. Д. Фактори успішності функціонування підприємства морського транспорту. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського Серія: Технічні науки.2023. Том 34(73). № 2. С. 106–114. DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2023.2.2/19

10. Прокудін Г. С. Моделі та методи оптимізації вантажних перевезень в транспортних системах: автореф. дис... докт. техн. наук: 05.22.20. Національний транспортний університет. – К., 2009. – 44 с. Режим доступу: http://www.nbuv.gov.ua/ard/2009/09pgspts.zip

11. Шевчук О. А., Гайванович Н. В. Сучасний стан, проблеми та перспективи розвитку морських вантажних перевезень в Україні та світі. Економічний вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут». 2023. Вип. 25. С. 59–64. doi:10.20535/2307-5651.25.2023.278603

12. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія «Технічні науки». 2024. Т. 35(74). № 1. С. 139–146.

13. Кириллова О. В. До питання обґрунтування розподілу контейнеропотоків між суднами, обслуговуючими магістрально-фідерної лінії. Науковий вісник Херсонської державної морської академії. 2014. Т. 2. №. 11. С. 55–68.

14. Управління роботою суден-балкерів з урахуванням невизначеності умов їх експлуатації: автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.22.01 / Вишневська Ольга Дмитрівна ; Одес. нац. мор. ун-т. – Одесса, 2018. – 26 с.

15. Мельник О. М. Експлуатація неспеціалізованих суден при транспортуванні негабаритних і великовагових вантажів. – Одеса : «Одеська морська академія», 2021. – 27 с.

16. Дрожжин О. Л. Організація роботи суден-контейнеровозів на фідерних лініях: автореф. дис. … канд. техн. наук : 05.22.01 / Дрожжин Олексій Леонідович; Одес. нац. мор. ун-т. – Одеса, 2019. – 22 с.

Vyshnevskyi D. O. FACTORS INFLUENCING THE COST OF MARITIME TRANSPORTATION

The article examines the factors affecting the cost of maritime transportation. It notes the reasons causing fluctuations in the cost of transportation. It identifies the main groups of factors affecting the formation of the cost of maritime transportation. Such groups of factors include economic factors, demand, supply and maintenance of tonnage. Moreover, the group of factors related to tonnage also includes subgroups of factors that include cost, technical and geographical factors. Having studied all the groups and subgroups of factors, it was found that the group of economic factors includes factors of a political, diplomatic, military nature, various economic restrictions, blockades, etc. It was determined that the cost group of factors collectively includes rates, tariffs

and freights of maritime transport, as well as rates of competitive types of transport. The group of cost factors also includes the state tariff policy and tariffs of a specific port. It was determined that the technical factors include the speed and regularity of transportation, as well as the suitability of tonnage for the transportation of goods. This group also includes the port's handling equipment and the extent of labor mechanization. It has been established that the group of geographical factors influencing the cost of transportation includes the points of origin and absorption of cargo flows, the industrial potential of regions, the availability of appropriate transport infrastructure, the state of the bottom in the waters of ports and approach channels, the availability of free tonnage in various sections of the freight market. The important role of the general task of fleet distribution is determined. Various approaches to its solution are considered. It has been established that, guided by the results obtained from solving this problem, that it is possible to assess to what extent the technical and operational characteristics of the vessels involved meet the conditions of the work to which they are involved. This, in turn, allows us to formulate an appropriate justification for the new distribution of vessels.

Key words: *organization of cargo carriages, cargo flows, freight market, forms of shipping, transport infrastructure, cargo handling gear, tonnage, throughput.*

UDC 629.735.015.2:621.398
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/34

Ienina I. I.
Ukrainian State Flight Academy

Chornohor N. O.
Ukrainian State Flight Academy

ANALYSIS OF DIGITAL TECHNOLOGIES WITH IOT FOR THE MAINTENANCE OF AVIATION EQUIPMENT

The article explores digital IoT-based platforms in the field of aviation maintenance.

Digital platforms based on the Internet of Things (IoT) in aviation maintenance enhance efficiency, accuracy, and operational safety. With connected sensors and big data analytics, IoT enables real-time aircraft condition monitoring, early detection of potential failures before they occur, and optimization of maintenance planning. All of this contributes to reduced downtime, lower maintenance costs, and increased overall reliability of aviation equipment. The use of IoT-powered digital platforms unlocks new opportunities for predictive analytics, automation, and integration of maintenance processes, making aviation more technologically advanced, economically efficient, and safe.

This study examines modern complex IoT platforms, including GE Aviation Predix, Honeywell Forge for Airlines, Airbus Skywise, IBM Maximo for Aviation, Collins Aerospace Ascentia, Rolls-Royce Engine Health Management (EHM), Safran Cassiopée™, Boeing AnalytX, IFS Cloud for Aviation Maintenance, and Lufthansa Technik AVIATAR.

The article tracks the dynamics of the adoption of intelligent aviation IoT platforms and presents their classification. Aviation IoT platforms were categorized into groups: industrial platforms for predictive maintenance, digital platforms for maintenance management and analytics, analytical and monitoring platforms for aviation equipment, monitoring and management platforms for aircraft engines, and platforms for flight data analysis and safety. The study also examines the applicability of IoT platforms for passenger, cargo, business jets, military, light aircraft, and eVTOL aircraft to ensure efficient maintenance operations. Special attention is given to predictive maintenance.

The research investigates the functional capabilities of IoT platform integration with other aviation systems to provide centralized data access and facilitate coordination among technical personnel, airlines, and equipment manufacturers. A detailed analysis of the functional capabilities of these platforms has revealed key features that enhance aviation equipment operational efficiency, optimize maintenance costs, and improve flight safety.

Key words: *Internet of Things, maintenance engineering, digital platforms, aviation equipment, aircraft engine, monitoring.*

Formulation of the problem. The modern aviation industry faces a number of challenges related to increasing the efficiency of aircraft maintenance, reducing operational costs, and ensuring a high level of flight safety. One of the promising solutions is the implementation of intelligent IoT platforms, which enable real-time monitoring of aviation equipment, predictive analytics, and optimization of maintenance processes.

However, despite the active development of such platforms, there is a pressing need for a detailed and comprehensive comparative analysis of IoT platforms. Thus, the necessity to systematize and evaluate the functional capabilities of intelligent IoT platforms for aviation maintenance determines the relevance of this study.

Analysis of recent research and publications. The issue of digital maintenance technologies in aviation has been studied by a significant number of global researchers, including S. Li, M. Dan, I. Kabashkin, V. Perekrestov, L. Yang, S. Fu, N. Avdelidis, M. Kordestani, M. E. Orchard, K. Khorasani, M. Saif, W. Verhagen, B. F. Santos, F. Freeman, P. Kessel, D. Zarouchas, T. Loutas, R. C. Yeun, I. Heiets, A. Altay, O. Ozkan, G. Kayakutlu, C. Che, H. Wang, X. Ni, and others [1–5]. Many publications focus on specific IoT platforms for aviation equipment.

Task statement. The work involves a analysis of IoT-based digital platforms for aviation maintenance. To achieve this goal, a comprehensive comparative analysis of the main platforms is proposed to identify their advantages, disadvantages, and application features.

Outline of the main material of the study. Modern aviation is actively implementing digital technologies to enhance the efficiency and safety of aircraft maintenance. The development of information systems, the IoT, artificial intelligence, and big data enables significant optimization of diagnostics, monitoring, and maintenance planning processes.

Digital technologies play a crucial role in aviation maintenance. Thanks to IoT platforms, airlines can not only prevent failures but also save millions of dollars on maintenance and reduce aircraft downtime [6]. These platforms not only provide in-depth analytics but also facilitate the transition to predictive maintenance, minimizing risks and optimizing aviation companies' expenses.

The use of IoT in aviation began with the need to enhance aircraft reliability and safety through more precise condition monitoring. Before IoT, aircraft maintenance systems operated on a scheduled preventive maintenance basis. At the end of the last century, aircraft manufacturers began equipping planes with onboard diagnostic systems (Health Monitoring Systems) capable of collecting data on engine performance and other components. One of the first real examples of predictive maintenance was Rolls-Royce's "TotalCare" project, which allowed airlines not just to maintain engines according to regulations but to analyze their condition in real-time and predict the need for repairs (Fig. 1).

The advancement of cloud technologies, big data, and machine learning has enabled the full-scale implementation of IoT in aircraft maintenance.

The use of IoT in aviation follows several key stages: real-time data collection, data transmission, processing and analysis, and the generation of recommendations. Sensors monitor the performance parameters of engines, hydraulic systems, avionics, fuel systems, and other critical components, transmitting gigabytes of information. Through onboard communication systems, this data is sent to ground-based processing centers, where it is analyzed in real time. Machine learning algorithms identify patterns, anomalies, and potential failures. The system then predicts possible malfunctions and suggests corrective actions, minimizing the likelihood of failures.

In aircraft maintenance using IoT, various software solutions are employed to collect, transmit, analyze data, and predict potential failures.

We will examine the key IoT platforms for data collection and analysis: GE Aviation Predix, Honeywell Forge for Airlines, Airbus Skywise, IBM Maximo for Aviation, Collins Aerospace Ascentia, Rolls-Royce Engine Health Management (EHM), Safran Cassiopée™, Boeing AnalytX, IFS Cloud for Aviation Maintenance, and Lufthansa Technik AVIATAR. These platforms enhance maintenance efficiency for commercial, cargo, business aviation, and military aircraft (Fig. 2).

These platforms help airlines reduce maintenance costs, improve aircraft operational availability, and prevent unexpected failures through accurate forecasting and data analysis.

Intelligent IoT platforms for aviation maintenance can be categorized into the following groups: industrial

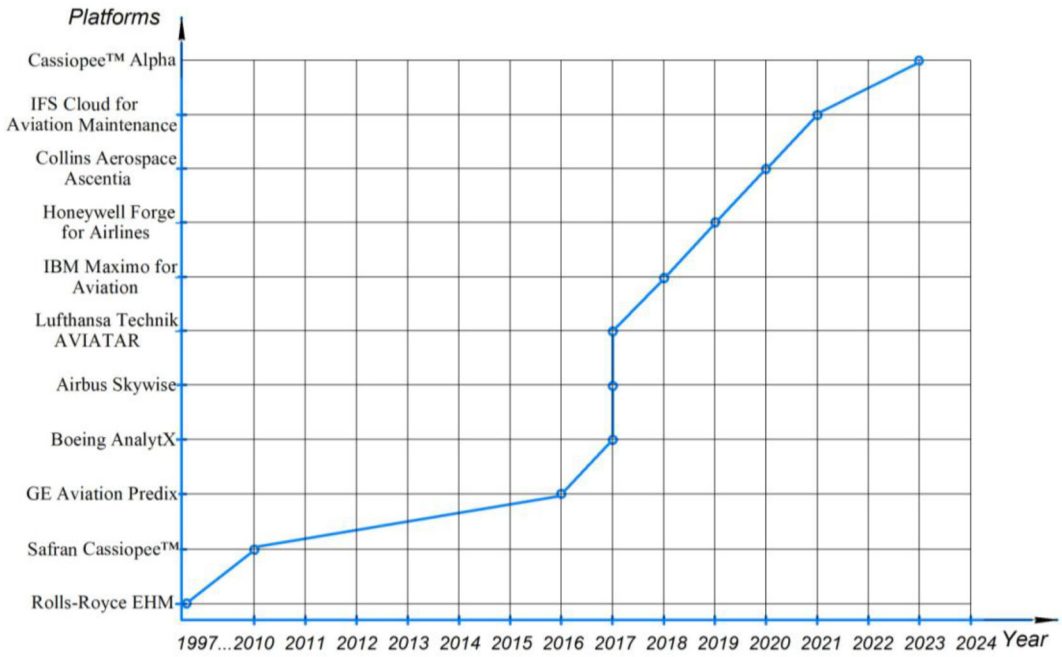


Fig. 1. The dynamics of implementing intelligent aviation IoT platforms

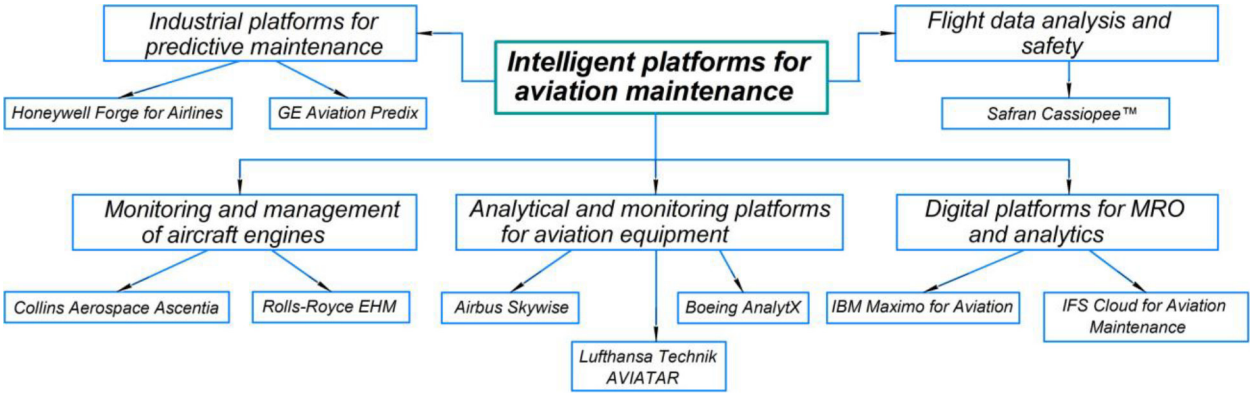


Fig. 2. Intelligent IoT Platforms for Aviation Maintenance

platforms for predictive maintenance, digital platforms for maintenance management and analytics, analytical and monitoring platforms for aircraft, monitoring and management platforms for aviation engines, and platforms for flight data analysis and safety (Fig. 3). We will examine each group in detail.

The key industrial IoT platforms for predictive maintenance include GE Aviation Predix (Platform 1) and Honeywell Forge for Airlines (Platform 2).

The GE Aviation Predix platform enables real-time data collection and analysis from aircraft engines, avionics, hydraulic, and fuel systems [8]. Initially developed as part of the Predix cloud platform for the Industrial Internet of Things (IIoT), it was later adopted for servicing GE and CFM International powerplants. By shifting from reactive to predictive maintenance, Predix forecasts potential equipment failures and recommends optimal maintenance schedules. It integrates with other aviation systems, such as Airbus Skywise, Honeywell Forge for Airlines, and IBM Maximo for Aviation, providing centralized data access and improving coordination among technical personnel. Predix also helps optimize operational costs by reducing maintenance expenses through early fault detection.

The Honeywell Forge for Airlines cloud platform facilitates predictive maintenance by analyzing onboard systems and sensor data to anticipate potential failures. Utilizing machine learning, it assists airlines in planning repairs and avoiding unplanned downtimes. The platform also optimizes fuel consumption by analyzing real-time usage, identifying inefficient routes, and detecting suboptimal engine operation modes, contributing to reduced CO_2 emissions. Its flight monitoring system assesses flight trajectories, weather conditions, and aircraft system performance, automatically detecting deviations from normal operating conditions. Additionally, integration with air traffic control services enhances flight routing efficiency. Furthermore, the platform automates reporting and business process management, consolidating maintenance, fuel cost tracking, and safety oversight into a unified digital environment, with automated reporting capabilities for MRO (Maintenance, Repair, and Overhaul) services.

The primary digital platforms for maintenance management and analytics include IBM Maximo for Aviation (Platform 3) and IFS Cloud for Aviation Maintenance (Platform 4).

The IBM Maximo for Aviation platform, adapted for the aviation industry, manages aircraft assets and maintenance (MRO). It enables real-time engine condition monitoring, automates scheduled and unscheduled repairs, and ensures compliance with regulatory maintenance requirements. Using AI and IoT, the system predicts failures, analyzes component wear, and optimizes repair cycles to minimize unexpected breakdowns. Inventory management tools provide spare parts availability control, demand forecasting, and automated ordering. Maximo complies with FAA, EASA, and ICAO standards, maintains electronic documentation, and automatically records completed tasks and inspections for regulatory authorities.

The IFS Cloud for Aviation Maintenance is a specialized solution for managing aircraft maintenance, ensuring standardized, efficient, and predictable maintenance operations – even for some electric eVTOL aircraft.

Key analytical and monitoring platforms include Airbus Skywise (Platform 5), Boeing AnalytX (Platform 6), and Lufthansa Technik AVIATAR (Platform 7).

Developed in collaboration with Palantir Technologies, Airbus Skywise collects and analyzes aviation data, integrating information from onboard systems, maintenance records, IoT sensors, and airline operational processes. By leveraging Big Data and machine learning, it predicts potential failures. Automated diagnostics of engines, avionics,

hydraulic, and fuel systems help prevent unscheduled repairs and extend component lifespans. The platform optimizes operational activities, improving flight scheduling and maintenance, minimizing delays, and reducing fuel costs. Skywise is flexible and scalable, supporting not only Airbus aircraft but also Boeing, Bombardier, and Embraer models, with cloud-based technology for real-time data access.

The Boeing AnalytX platform, powered by IoT, is designed for analytics and fuel optimization. It consolidates data from different Boeing divisions and applies advanced data science techniques combined with aerospace expertise to deliver intelligent solutions aimed at mission readiness, maintenance optimization, and adaptive learning.

The Lufthansa Technik AVIATAR predictive maintenance and process automation platform has enhanced its failure prediction capabilities after integration with Honeywell Connected Maintenance.

For monitoring and managing aircraft engines, the Rolls-Royce EHM (Platform 8) and Collins Aerospace Ascentia (Platform 9) platforms have been developed.

The Rolls-Royce Engine Health Management (EHM) system has evolved since the 1970s and is used for real-time monitoring and analysis of aircraft engine conditions. Its primary goal is to reduce maintenance costs and prevent engine failures by ensuring timely and accurate repairs and support. Through collaboration with Oxford University and the implementation of the QUICK system, EHM has expanded its data analysis capabilities, improving engine reliability.

The Collins Aerospace Ascentia cloud-based analytics platform is designed for managing the reliability and maintenance of aviation systems. It analyzes technical data, predicts failures, and reduces aircraft downtime, helping airlines optimize maintenance costs and enhance passenger comfort. The platform includes Repeaters and Aircraft Health Monitoring modules, which enhance its capabilities. It is used by airlines like Air Europa to monitor Boeing 787, while Rolls-Royce EHM handles engine monitoring for Rolls-Royce engines on Airbus and Boeing aircraft.

For flight data analysis and safety, the Cassiopée™ (Platform 10) is utilized. This platform helps airlines, MROs, Original Equipment Manufacturers (OEMs), and service providers improve operational efficiency and flight safety. The Cassiopée™ Alpha system ensures rapid data processing regardless of fleet size, offering customizable algorithms, an intuitive interface, and seamless integration into an operator's digital ecosystem. The updated Cassiopée™ Alpha version includes enhanced safety analysis and predictive capabilities.

Among the analyzed platforms, IBM Maximo for Aviation is the most flexible for use in general aviation, while GE Aviation Predix can also be applied in certain cases if the aircraft is equipped with the appropriate avionics. Other platforms have limited or no application in this segment due to their focus on large aircraft and extensive operational processes.

For light aircraft, specialized, more affordable and adaptable solutions exist, such as: Garmin Flight Stream + G1000 NXi, ForeFlight / Spidertracks, GE Aviation Digital Solutions.

The results of the study on the support of different aircraft types by modern IoT platforms are presented in Table 1, while usage characteristics are detailed in Table 2.

The detailed analysis allows us to identify the unique features of each platform. For example, Ascentia enhances aircraft engine performance, while EHM utilizes real-time data to assess engine conditions. The Cassiopée platform focuses on safety and reducing maintenance costs, whereas AnalytX has deep integration with Boeing aircraft. A key feature of IFS Maintenance is its flexibility in configuration and modular structure. AVIATAR can integrate with

Table 1

Support for Different Types of Aircraft by Modern IoT Platforms

Platform	Commercial	Cargo	Business	Regional	Light	eVTOL	Military
Platform 1	+	+	+	–	limited	–	+
Platform 2	+	+	+	–	–	–	–
Platform 3	+	+	+	+	+	–	+
Platform 4	+	+	–	–	–	+	–
Platform 5	+	+	+	–	–	–	+
Platform 6	+	+	–	–	–	–	–
Platform 7	+	–	–	–	–	–	–
Platform 8	+	+	+	–	–	–	–
Platform 9	+	–	–	–	–	–	–
Platform 10	+	–	–	–	limited	–	+

Table 2

Comparison of IoT Platforms for Aircraft Maintenance

Platforms	Advantages	Disadvantages
Platform 1	Supports engines and aircraft from various manufacturers Used in military aviation	Limited applicability for light aviation Complex implementation process
Platform 2	Efficient fleet management Large-scale data analysis Used by commercial and cargo operators	No support for light aviation High cost of integration with aviation systems
Platform 3	Used for commercial and military and light aviation Tools for inventory management	High requirements for customization Limited analytics compared
Platform 4	Flexible cloud-based platform Potential integration with eVTOL	Requires significant resources for setup and maintenance
Platform 5	Deep integration with Airbus aircraft Used by major airlines	Poor compatibility with aircraft from other manufacturers High implementation cost
Platform 6	Fuel cost optimization High efficiency for large airlines	Low adaptability for aircraft from other manufacturers
Platform 7	Extensive suite of analytical tools High integration with Airbus Skywise	Primarily focused on Airbus High usage cost
Platform 8	In-depth analysis of Rolls-Royce engine condition Used in commercial and military aviation	Focus only on Rolls-Royce engines Limited application for aircraft with other engine types
Platform 9	Real-time aircraft condition monitoring Used by major airlines	Limited support for aircraft from other manufacturers
Platform 10	Flight data analysis and failure prediction	Limited compatibility with platforms from other manufacturers High cost of deployment across fleets

various airlines. Predix leverages digital twins and integrates with other aviation systems, while Forge improves fuel efficiency and reduces unplanned repairs. Skywise stands out for its integration with Airbus aircraft and accessibility to airlines and suppliers. The Maximo platform is highly customizable and can manage the entire equipment lifecycle.

After a analysis of the functional capabilities of IoT platforms in aviation maintenance, several key characteristics have been identified, along with their impact on aircraft operational efficiency. For example, Ascentia enhances aircraft engine performance, while AVIATAR can integrate with various airlines.

EHM utilizes real-time data to assess engine conditions. The Cassiopée platform focuses on safety and reducing maintenance costs, whereas AnalytX has deep integration with Boeing aircraft. A key feature of IFS Maintenance is its flexibility in configuration and modular structure. Predix leverages digital twins and integrates with other aviation systems, while Forge improves fuel efficiency and reduces unplanned repairs. Skywise stands out for its integration with Airbus aircraft and accessibility to airlines and suppliers. The Maximo platform is highly customizable and can manage the entire equipment lifecycle.

The integration of various digital ecosystems is a crucial aspect of aviation platform development. Platforms such as AnalytX and IFS Maintenance focus on comprehensive maintenance management and spare parts logistics. As a result, aircraft downtime is significantly reduced, and the supply process for critical components is optimized.

Special attention has been given to reducing fuel costs and improving the energy efficiency of air transport. Forge uses fuel consumption analysis algorithms to determine the most economical routes, while Cassiopée provides airlines with analytical tools to optimize fleet operational performance.

Conclusions. The evolution of the implementation of intelligent aviation IoT platforms has been examined. A classification of intelligent platforms has been conducted, dividing them into industrial platforms for predictive maintenance, digital platforms for maintenance management and analytics, analytical and monitoring platforms for aviation equipment, monitoring and management platforms for aircraft engines, and platforms for flight data analysis and safety.

The support of IoT platforms for commercial, cargo, business aviation, military, and eVTOL aircraft has been analyzed to ensure effective maintenance operations. Special attention has been given to reducing fuel costs to enhance the energy efficiency of air transportation.

As a result of the study, the functional capabilities, advantages, and limitations of the analyzed platforms for aviation maintenance have been identified.

Bibliography:

1. Li S., Dan M., Yang L. An Airplane Health Management approach for civil aviation. *Prognostics and System Health Managment Confernece*, Shenzhen, China, 2011. pp. 1–4. doi: 10.1109/PHM.2011.5939473
2. Kabashkin I. Perekrestov, V. Ecosystem of Aviation Maintenance: Transition from Aircraft Health Monitoring to Health Management Based on IoT and AI Synergy. Appl. Sci. 2024, 14(11), 4394. Basel, Switzerland. doi.org/10.3390/app14114394
3. Fu S., Avdelidis N.P. Prognostic and Health Management of Critical Aircraft Systems and Components: An Overview. *Sensors*. Basel. 2023, 23(19):8124. doi: 10.3390/s23198124
4. Verhagen W.J.C., Santos B.F., Freeman F., Kessel P., Zarouchas D., Loutas T., Yeun R.C.K., Heiets I. Condition-Based Maintenance in Aviation: Challenges and Opportunities. *Aerospace*. 2023, 10(9), 762. doi.org/10.3390/aerospace10090762
5. Che C., Wang H., Ni X. Combining multiple deep learning algorithms for prognostic and health management of aircraft. *Aerosp. Sci. Technol*. Volume 94, 2019, 105423. doi.org/10.1016/j.ast.2019.105423
6. Delft, The Netherlands 1st International Conference for CBM in Aerospace 24–25 May 2022.
7. Berger J.M. MRO Industry Forecast & Trends, IATA Maintenance Cost Conference, Geneva, Switzerland. 2022.
8. GE Aerospace. URL: https://www.geaerospace.com/ (дата звернення: 20.01.2025).
9. BS EN 13306:2017 – TC. Maintenance. Maintenance terminology. British Standards Institution: London, UK, 2017

Єніна І.І., Чорногор Н.О. АНАЛІЗ ЦИФРОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ З IoT ДЛЯ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ АВІАЦІЙНОЇ ТЕХНІКИ

У статті автори досліджують цифрові платформи з IoT в галузі технічного обслуговування авіаційної техніки.

Цифрові платформи на основі Інтернету речей (IoT) у технічному обслуговуванні авіаційної техніки забезпечують підвищену ефективність, точність і безпеку операцій. Завдяки підключеним датчикам та аналітиці великих даних, IoT дозволяє здійснювати моніторинг стану повітряних суден у реальному часі, виявляти потенційні несправності ще до їх виникнення та оптимізувати планування ремонтних робіт. Все це сприяє зменшенню простоїв, зниженню витрат на обслуговування і підвищенню загальної надійності авіаційної техніки. Використання цифрових платформ з IoT відкриває нові можливості для прогнозної аналітики, автоматизації та інтеграції технічного обслуговування, що робить авіацію більш технологічною, економічно ефективною та безпечною.

В рамках роботи проведено дослідження сучасних складних IoT платформ, таких як: GE Aviation Predix, Honeywell Forge for Airlines, Airbus Skywise, IBM Maximo for Aviation, Collins Aerospace Ascentia, Rolls-Royce Engine Health Management (EHM), Safran Cassiopée™, Boeing AnalytX, IFS Cloud for Aviation Maintenance, Lufthansa Technik AVIATAR.

В статті відслідкована динаміка впровадження інтелектуальних авіаційних IoT-платформ та проведена класифікація. Авіаційні IoT платформи розподілялися по групах на: промислові для предиктивного ТО, цифрові для управління ТО та аналітики, аналітичні та моніторингові для АТ, моніторингові та управління авіаційними двигунами, аналізу польотних даних та безпеки інтелектуальних платформ. Проводилось дослідження можливості їх застосування в пасажирських, вантажних, бізнес-джетів, військових, легких та eVTOL повітряних суденах IoT-платформам для забезпечення ефективного технічного обслуговування. Велика увага при аналізі приділена предиктивному обслуговуванню. Досліджені функціональні можливості інтеграції з іншими авіаційними системами для забезпечення централізованого доступу до даних та полегшення координації між технічним персоналом, авіакомпаніями та виробниками обладнання. Після проведеного детально аналізу функціональних можливостей платформ виявлені суттєві особливості, які сприяють підвищенню ефективності експлуатації авіаційної техніки, оптимізації витрат на технічне обслуговування та покращенню безпеки польотів.

Ключові слова: *Інтернет речей, технічне обслуговування, цифрові платформи, авіаційна техніка, авіаційний двигун, моніторинг.*

УДК 656.6
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/35

Кириллова О. В.
Одеський національний морський університет

Ларіна І. М.
Одеський національний морський університет

ДУАЛЬНИЙ ПІДХІД ДО РОЗМЕЖУВАННЯ ПОГЛЯДІВ НА СУЧАСНИЙ ПОРТ І ПОРТОВИЙ ТЕРМІНАЛ З ПОЗИЦІЙ ТРАНСПОРТНОЇ НАУКИ І ЛОГІСТИКИ

У статті здійснено комплексний аналіз відмінностей між підходами транспортної науки та логістики до визначення ролі та функцій портів і портових терміналів. Метою дослідження є обґрунтування концептуального розмежування між транспортним і логістичним підходами до функціонування портів та портових терміналів з урахуванням нормативно-правових і організаційних аспектів їх діяльності. У рамках роботи поставлено низку завдань, зокрема аналіз трактування поняття «порт» у транспортній науці, дослідження логістичного підходу до інтеграції портової інфраструктури у виробничі та бізнес-процеси підприємств, а також визначення меж застосування логістичного підходу при управлінні портами і терміналами з урахуванням організаційних і правових аспектів. Дослідження базується на нормативно-правових визначеннях термінів «порт», «портовий термінал», а також на теоретичних аспектах управління вантажопотоками в рамках транспортних і логістичних систем. Стаття розглядає порт як ключовий елемент транспортної інфраструктури, що забезпечує перевантаження та зберігання вантажів, обслуговування суден і технічних засобів інших видів транспорту. Окреслено роль порту як самостійного елементу транспортної системи, орієнтованого на надання транспортних послуг широкому колу учасників ринку. У той же час, з точки зору логістики, порт розглядається як елемент логістичної системи, інтегрований у виробничі та бізнес-процеси підприємств. Практична частина статті містить аналіз діяльності українських підприємств, які на законних підставах володіють окремими портами й терміналами та експлуатують їх в інтересах власних виробничих бізнес-структур, що підтверджує реалізацію логістичного підходу. Зазначено, що чітке розмежування між транспортним і логістичним підходами є необхідним для формування ефективних стратегій управління портами та визначення їхніх функціональних ролей у сучасних транспортних мережах.

Ключові слова: *порт, транспортний вузол, портовий термінал, портова інфраструктура, транспортна інфраструктура, морські перевезення, контейнерні перевезення, логістика, логістичний підхід, взаємодія видів транспорту, вантаж, вантажопотік, транспортування вантажів, зберігання вантажів, перевалка вантажів, перевезення вантажів.*

Постановка проблеми. Сучасні порти та портові термінали є невід'ємною складовою глобальних транспортних систем, що забезпечують безперервний рух вантажопотоків між країнами та регіонами. Вони виконують ключові функції в процесах обробки, перевалки, зберігання та транспортування вантажів, виступаючи критичними вузлами світової економіки. Однак у процесі аналізу їхньої ролі та функціонального призначення спостерігається суттєва різниця у підходах до їх дослідження з позицій транспортної науки та логістики. Ці концептуальні відмінності впливають на розуміння функцій портів, їхньої організаційної структури, управлінських аспектів та стратегічної ролі в міжнародних транспортних системах.

З позицій транспортної науки порт є інфраструктурним об'єктом, що забезпечує перевалку вантажів між різними видами транспорту, оптимізацію транспортних процесів та управління вантажопотоками. Тут основний акцент робиться на взаємодії транспортних засобів, ефективності перевантажувального обладнання та забезпеченні безперебійної роботи транспортної інфраструктури. Водночас, у логістичних концепціях порт розглядається як інтегрований елемент ланцюгів постачання, що сприяє наскрізному управлінню матеріальними потоками на глобальному, регіональному та локальному рівнях. У цьому контексті логістичний підхід фокусується на наскрізному управлінні матеріальними потоками та на оптимізації складських, дистрибуційних та інфор-

маційних процесів, пов'язаних із рухом вантажів через портові об'єкти.

Ці концептуальні відмінності зумовлюють необхідність чіткого розмежування понять «порт» та «портовий термінал» у контексті їхнього функціонального призначення та місця в сучасних транспортних системах.

З одного боку, розвиток транспортної термінології має глибоке історичне підґрунтя, базується на усталених категоріях та відображає еволюцію транспортних технологій [1, 2, 3, 4].

З іншого боку, логістична наука, яка сформувалася значно пізніше, перебуває в процесі становлення, що призводить до постійного уточнення та перегляду її понятійного апарату. Як зазначено в роботі [5], на сьогодні навіть саме поняття «логістика» не має єдиного загальноприйнятого визначення.

Аналіз широкого кола літературних джерел свідчить про існування певної термінологічної невизначеності у логістичних концепціях, що часто призводить до підміни понять та змішування категорій. Це, у свою чергу, ускладнює наукові дослідження та прийняття управлінських рішень у сфері портової діяльності. Багато сучасних публікацій демонструють тенденцію до підпорядкування функціонування портів виключно логістичним концепціям, не беручи до уваги їхню інфраструктурну та транспортну природу. Такий підхід може спричинити помилкові управлінські рішення та неефективне використання транспортних ресурсів.

Таким чином, існує нагальна потреба у чіткому розмежуванні поглядів на порти та портові термінали з урахуванням специфіки транспортної науки та логістики. Визначення цих відмінностей дозволить більш обґрунтовано підходити до планування, управління та інтеграції портових об'єктів у глобальні транспортні мережі. Це дослідження спрямоване на аналіз ключових концептуальних розбіжностей між транспортною наукою та логістикою у підходах до розуміння ролі та функцій портів і портових терміналів, що сприятиме розробці ефективних стратегій їхнього розвитку в умовах глобалізації та технологічних змін.

Аналіз досліджень і публікацій. У статті [6] під назвою «Сучасний порт у логістичному ланцюгу доставки вантажів» автор обґрунтовано зазначає, що порти відіграють центральну роль у транспортному процесі. Водночас у цій роботі проблема оптимізації їхньої діяльності розглядається переважно з точки зору загальної ефективності портів як транспортних вузлів, а не як інтегрованих елементів логістичних ланцюгів. Теза про «головну задачу логістики» як пошук оптимальної конфігурації вхідних векторів видається надто узагальненою та позбавленою чіткої методологічної основи. Автор посилається на широкий спектр джерел, проте більшість із них стосуються загальних питань розвитку портової індустрії, що обмежує глибину аналізу логістичних аспектів.

Стаття [6], безумовно, містить корисний опис функцій сучасних портів, зокрема їхньої ролі у зберіганні, перевалці та трансформації вантажів. Водночас у висновках акцент робиться переважно на комерційній складовій портової діяльності, що лише частково розкриває логістичну функцію портів.

Таким чином, стаття [6] значною мірою базується на традиційних концепціях портового розвитку, ігноруючи логістичний підхід та роль сучасного порту у ланцюгу доставки вантажів. Вона має певну наукову цінність, оскільки узагальнює основні етапи розвитку портів і їхню комерційну функцію. Проте її зміст не повною мірою відповідає заявленій тематиці щодо ролі портів у логістичних ланцюгах.

У роботі [7] під назвою «Характеристика участі портових операторів у логістичних системах» автор стверджує, що можливі два статуси участі портових терміналів у мікро- та мезологістичних системах:

- портовий термінал перебуває у власності, розпорядженні та під контролем компанії, що управляє відповідною логістичною системою (такою компанією може бути виробниче підприємство, трейдер тощо);
- портовий термінал входить до логістичної системи як незалежний об'єкт (а портовий оператор – як незалежний суб'єкт), що має право самостійно визначати параметри своєї діяльності (обслуговування матеріального потоку), навіть якщо це не забезпечує оптимізацію трансформації матеріального потоку.

Автор виходить із припущення, що всі портові термінали є частиною тієї чи іншої логістичної системи, хоча й у різних статусах.

На нашу думку, портовий термінал може бути як частиною логістичної системи, так і самостійним інфраструктурним об'єктом транспортної системи, який, у свою чергу, забезпечує транспортне обслуговування логістичної системи виробничого підприємства або торгової компанії, але не обов'язково входить до її складу.

Ключовим критерієм розмежування ролі (статусу) портового термінала є не ступінь його інте-

грації в процеси доставки вантажів, а наявність чи відсутність у єдиного суб'єкта ринку (виробничого або торгового підприємства) можливості здійснювати наскрізне управління матеріальним потоком (у формі вантажів та вантажопотоків), що переміщується через порт. Важливу роль у цьому також відіграє здатність і фактична можливість керувати технологічними процесами та операціями, а також транспортними й іншими технічними засобами в порту, що визначається відповідними функціональними, організаційними та правовими аспектами.

Постановка завдання. Метою дослідження є обґрунтування концептуального розмежування між транспортним і логістичним підходами до функціонування портів та портових терміналів з урахуванням нормативно-правових і організаційних аспектів їх діяльності.

Виходячи з мети, в роботі поставлені наступні завдання:

1. Проаналізувати ключові аспекти трактування поняття «порт» у транспортній науці, визначивши його роль як елемента транспортної інфраструктури.
2. Дослідити логістичний підхід до інтеграції портової інфраструктури у виробничі та бізнес-підприємств.
3. Визначити межі застосування логістичного підходу та концепції наскрізного управління матеріальними потоками при визначенні ролі порту як логістичного або транспортного активу, з урахуванням організаційних, договірних і правових аспектів, а також здійснити аналіз застосування логістичного підходу на практиці, зокрема на прикладі окремих українських портів та терміналів.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до Закону України «Про морські порти» (ст. 1, п. 6 [8]) під морським портом розуміється «... визначені межами територія та акваторія, обладнані для обслуговування суден і пасажирів, проведення вантажних, транспортних та експедиторських робіт, а також інших пов'язаних з цим видів господарської діяльності» (ст. 1, п. 6 [8]). При цьому:

– територія морського порту – це частина сухопутної території України з визначеними межами, у тому числі штучно створені земельні ділянки (ст. 1, п. 16 [8]);

– акваторія морського порту (портова акваторія) – визначена межами частина водного об'єкта (об'єктів), крім суднового ходу, призначена для безпечного підходу, маневрування, стоянки і відходу суден (ст. 1, п. 2 [8]). У свою чергу, судновий хід – це водний простір, призначений для транзитного руху суден між портами, позначений на місцевості і на карті та визначений засобами навігаційного обладнання (ст. 1, п. 15 [8]).

Закон [8] також визначає поняття «морський термінал», як «розташований у межах морського порту єдиний майновий комплекс, що включає технологічно пов'язані об'єкти портової інфраструктури, у тому числі причали, підйомно-транспортне та інше устаткування, які забезпечують навантаження-розвантаження та зберігання вантажів, безпечну стоянку та обслуговування суден і пасажирів» (ст. 1, п. 7 [8]).

1. Транспортна наука: порт як складова транспортної інфраструктури.

Розглянуті вище визначення відображають юридичний статус портів. Однак з точки зору транспортної науки порт також розглядається як ключовий інфраструктурний елемент транспортної системи. Він виконує важливі функції, зокрема перевантаження, зберігання вантажів та обслуговування транспортних засобів. Основними його характеристиками є:

- інтегрованість у національну та/або міжнародну транспортну інфраструктуру;
- функціональна універсальність, тобто виконання вантажоперевалювальних, складських і сервісних операцій, а також обслуговування транспортних засобів різних видів транспорту;
- незалежність, тобто відсутність безпосереднього контролю з боку виробничих підприємств, що забезпечує автономність порту як елемента транспортної системи;
- орієнтація на обслуговування всіх учасників ринку транспортних послуг.

Таким чином, порт у такому контексті не є логістичним активом окремого виробничого або торгового підприємства, а функціонує як частина транспортної мережі, її інфраструктурний об'єкт та стратегічний транспортний вузол, що забезпечує ефективний розподіл і переміщення вантажопотоків між регіонами та країнами.

Виробничі або торгові підприємства можуть контролювати та відстежувати процеси транспортування, зокрема перевезення та перевантаження [9, 10], однак вони не здійснюють безпосереднє управління вантажопотоками, транспортними засобами чи портовими операціями.

Такий концептуальний підхід визначає порт як багатофункціональний інфраструктурний вузол, який забезпечує взаємодію між різними видами транспорту та сприяє ефективному перерозподілу вантажопотоків. При цьому портові процеси та операції не передбачають безпосереднього

управління вантажопотоками з боку виробничих підприємств, хоча останні можуть здійснювати контроль і координацію їхнього перевезення та переміщення через порт. З точки зору транспортної науки і практики, кожен окремий портовий термінал розглядається як інфраструктурний елемент порту, що об'єднує технологічно пов'язані об'єкти, зокрема причали, склади, підйомно-транспортне та інше устаткування.

2. Логістичний підхід: порт як елемент логістичної системи.

Логістику визначають як теорію й практику наскрізного управління матеріальними, а також пов'язаними з ними інформаційними та фінансовими потоками.

Це підкреслює важливість інтеграції всіх етапів управління матеріальним потоком – від закупки сировини та виробництва готової продукції до її доставки кінцевому споживачу.

Логістичні системи орієнтовані на оптимізацію внутрішніх процесів дистрибуції продукції на підприємствах, а також на координацію руху товарів, що сприяє ефективному функціонуванню виробничих і бізнес-процесів.

Таким чином, на відміну від транспортної науки, логістика розглядає порт як невід'ємну частину логістичної системи, через яку переміщуються матеріальні та супутні потоки, інтегровані у виробничі та бізнес-процеси підприємства і підконтрольні його наскрізному управлінню.

Однак з боку виробничого підприємства та його відповідальних підрозділів, наприклад, відділу логістики, наскрізне управління матеріальним потоком, можливе лише за певних організаційно-правових умов.

Якщо порт або портовий термінал належить виробничому підприємству чи експлуатується ним на законних підставах (наприклад, через приватну власність, концесію або оренду), то підприємство отримує можливість контролювати певні аспекти переміщення вантажу через порт. У такому разі порт стає частиною логістичної інфраструктури підприємства і може розглядатися як його логістичний актив. Відповідно, в межах такого підходу підприємство має можливість здійснювати контроль і управління певними аспектами переміщення вантажу через порт [11].

Такий підхід до управління портами вже активно використовуються у світовій практиці [12], де великі виробничі компанії володіють або керують власними терміналами для забезпечення безперебійного постачання сировини та продукції. В Україні також спостерігається розвиток таких моделей управління портами, зокрема через приватизацію портів, придбання та/або побудову приватних портових терміналів, що активно співпрацюють із великими виробничими підприємствами для оптимізації процесів транспортування. Наприклад:

- Агрохолдинг «Кернел» у грудні 2022 року придбав термінал з перевалки харчових олій у порту «Південний», а в лютому 2023 року – річковий термінал «Дунай Пром Агро» у порту Рені на Дунаї;
- ТОВ «Еліксир Україна» за результатами приватизаційного аукціону придбало порт «Усть-Дунайськ», що став першим в історії незалежної України приватизованим портом;
- ТОВ СП «Нібулон» – одна з найбільших аграрних компаній України, яка володіє кількома портовими терміналами, зокрема морським перевантажувальним терміналом у Миколаєві та річковим перевантажувальним терміналом у Запорізькій області, введеним в експлуатацію у 2019 році [13].

Таким чином, приватизований порт «Усть-Дунайськ», а також термінали, придбані агрохолдингом «Кернел» та побудовані ТОВ СП «Нібулон», можуть розглядатися як структурні елементи логістичних систем відповідних підприємств.

Великі промислові корпорації, зокрема агрохолдинги та металургійні компанії, можуть володіти портовими терміналами та навіть цілими портами, інтегруючи їх у свої логістичні ланцюги. Це дозволяє:

– повністю контролювати матеріальний та супутні потоки – від постачання сировини до відправки готової продукції;

– інтегрувати портові операції у логістичні процеси[1] підприємства [11], що сприяє оптимізації витрат і ресурсів;

створювати єдину ефективну логістичну систему з мінімізацією втрат і ризиків.

Така ситуація характерна для великих корпорацій, які мають власні порти та/або портові

[1] З позиції традиційної логістичної концепції, яка орієнтована на потреби виробничого (торгового) підприємства і досліджує процеси управління наскрізним матеріальним потоком від закупки сировини, до виробництва готової продукції та її доведення до кінцевого споживача, а також управління відповідними фінансовими та інформаційними потоками:
– «технологічні процеси / операції» з позиції виробничого підприємства – це певні цілеспрямовані дії, в результаті послідовної реалізації яких відбувається виробництво матеріальних благ (товарів), тобто якісне перетворення предметів праці (сировини) у готову продукцію;
– «логістичні процеси / операції» з позиції виробничого підприємства – це всі інші цілеспрямовані дії, послідовна реалізація яких забезпечує наявність потрібного продукту виробництва (товару) у необхідній кількості, у потрібному місці, у потрібний час (пакування, складування, навантаження, транспортування, розвантаження і т. п.) [11].

термінали для забезпечення власних виробничих процесів, наприклад у металургійній, нафтохімічній чи аграрній галузях. У цих випадках портова інфраструктура є не просто вузлом перевалки вантажів, а невід'ємним елементом логістичної системи підприємства.

3. Межі застосування логістичного підходу та концепції наскрізного управління матеріальними потоками при визначенні ролі порту як логістичного або транспортного активу.

У межах логістичної концепції порт розглядається як вузлова точка наскрізного управління матеріальними потоками. Це означає, що логістичний відділ виробничого або торгового підприємства, згідно з логістичним підходом, має на меті здійснювати управління на всіх етапах доставки вантажу – від відправника до кінцевого отримувача.

Однак, на практиці, під час проходження вантажопотоку через порт як інфраструктурний об'єкт транспортної системи країни та подальшого транспортування незалежними перевізниками, виникають кілька обмежень:

A) Втрата контролю над операційним управлінням. Передача вантажу незалежним операторам (перевізникам, портовим операторам) змінює відповідальність за його переміщення та обробку. Логістичний відділ виробничого підприємства може визначати загальні параметри транспортування (маршрут, умови зберігання, час доставки), але не має прямого впливу на виконання технологічних операцій, пов'язаних із транспортуванням і перевалкою вантажів. Відповідно, він фактично не має можливості здійснювати наскрізне управління матеріальними та супутніми потоками, що є основною вимогою логістичного підходу.

B) Роль контрактних зобов'язань. У міжнародному сполученні управління вантажем багато в чому залежить від умов торгових контрактів відповідно до Інкотермс. Наприклад, якщо угода передбачає умову EXW (Ex Works), відповідальність за організацію транспортування покладається на покупця, тоді як за умовою CIF (Cost, Insurance, Freight) – на продавця. Таким чином, компанії, що працюють у сфері експорту-імпорту, змушені дотримуватися встановлених контрактних рамок, які не завжди узгоджуються з принципами наскрізного управління матеріальними потоками.

C) Юридичний статус незалежних перевізників. Незалежні перевізники (морські лінії, автомобільні перевізники, залізничні оператори) є самостійними суб'єктами ринку транспортних послуг, що діють за власними комерційними та операційними правилами. Вони виконують перевезення відповідно до контрактів, правил перевезення та певних регулюючих міжнародних стандартів і конвенцій, а не в рамках концепції наскрізного управління матеріальним потоком, яке прагне здійснювати логістичний відділ виробничого або торгового підприємства орієнтуючись на логістичний підхід.

D) Юридичний статус портових операторів. Портові оператори є самостійними суб'єктами ринку портових послуг, які функціонують на підставі контрактних зобов'язань та діють у межах встановлених нормативно-правових норм і стандартів. Вони не завжди перебувають під контролем виробничого чи торгового підприємства, тому не підпорядковуються правилам наскрізного управління матеріальними потоками з боку таких компаній. Це також суперечить основним вимогам логістичного підходу.

З огляду на це, юридичний статус перевізників та портових операторів впливає на здатність виробничого або торгового підприємства здійснювати наскрізне управління матеріальним потоком та повністю контролювати весь ланцюг постачання. Наявність незалежних перевізників і портових операторів, які підпорядковуються власним, а також державним і міжнародним правилам і процедурам, призводить до розриву в комунікації та координації між учасниками ланцюга постачання. Це обмежує можливість наскрізного управління вантажами та вантажопотоками.

Таким чином, логіст або логістичний відділ виробничого чи торгового підприємства може теоретично заздалегідь планувати наскрізне управління матеріальним потоком. Однак коли вантаж потрапляє в зону відповідальності порту або незалежного перевізника, безперервність цього «наскрізного управління» з боку виробничого чи торгового підприємства порушується. Насправді контроль над матеріальним потоком у міжнародному сполученні здійснюється скоріше через координацію, контрактні механізми та цифрові платформи, ніж через безперервне логістичне управління, яке можливе лише в межах одного підприємства чи інтегрованої логістичної мережі.

Отже, концепція наскрізного управління матеріальними потоками в логістиці має свої межі, які на практиці визначаються передачею вантажу до зони відповідальності незалежних суб'єктів транспортного ринку, таких як порти, перевізники, митні органи тощо.

Фактично, логістичний відділ підприємства може лише відстежувати рух вантажу, проте не має

можливості безпосередньо здійснювати управлінський вплив на процеси, що відбуваються в портах або під час транспортування незалежними перевізниками, особливо в міжнародному сполученні. В таких умовах координація між учасниками ланцюга постачання здійснюється переважно через контрактні угоди та цифрові платформи. Вони забезпечують синхронізацію дій, але не надають виробничому або торговому підприємству інструментів для прямого управління транспортними й перевантажувальними процесами.

Це свідчить про те, що порт є передусім інфраструктурним елементом транспортної системи. З огляду на це, для забезпечення його надійної, безперебійної, сталої та безпечної роботи необхідно розглядати його функції, перш за все, через призму транспортної науки і практики.

Водночас, аналіз порту з точки зору логістичної концепції є здебільшого «зовнішнім» підходом, який акцентує увагу на порті та портовому терміналі як складових ланцюга постачання з позиції їхніх клієнтів – виробничих і торгових підприємств, що прагнуть доставити свої товари у визначене місце в установлений строк. Проте клієнти повинні орієнтуватися на користування якісними послугами, а не намагатися управляти технологічними процесами та операціями, що здійснюються в межах самостійних суб'єктів ринку транспортних послуг – транспортно-експедиторських компаній, портових операторів, перевізників, митних органів тощо. Кожен має займатися своєю справою. Оскільки забезпечення міжнародної доставки вантажу у необхідній кількості, заданій якості, у потрібне місце і в установлений час для конкретного отримувача з мінімальними витратами можливе лише завдяки злагодженій та узгодженій роботі вищезгаданих самостійних суб'єктів ринку транспортних послуг.

Виняток становлять портові термінали та перевізники, які є дочірніми підприємствами транснаціональних корпорацій і промислових груп. Однак світова практика підтверджує, що чим масштабнішою є діяльність материнських компаній, тим частіше їх структурні підрозділи – транспортні підприємства – підпорядковуються законам глобального транспортного ринку, зокрема ринку портових послуг і фрахтового ринку. Це зумовлено тим, що з часом ці підрозділи починають обслуговувати не лише вантажопотоки своїх материнських компаній, а й задовольняти потреби інших учасників ринку в перевезеннях та обробці вантажів

Порт залишається передусім інфраструктурним об'єктом транспортної системи, і тому надзвичайно важливо розглядати його функції в контексті транспортної науки. Це дає змогу забезпечити ефективне управління транспортними процесами, оптимізувати операції та гармонізувати взаємодію всіх учасників транспортної мережі, особливо в умовах стрімкого розвитку цифрових технологій, автоматизації портових операцій та впровадження інтелектуальних систем управління, що відображається в концепції «Smart Ports» [14].

Висновки.

1. Аналізуючи сучасний порт із позицій транспортної науки та логістики, можна констатувати суттєві розбіжності в підходах до його трактування.

2. Роль порту значною мірою залежить від наукової дисципліни та контексту дослідження, що визначають акценти на його функціональних, інфраструктурних або технологічних аспектах.

3. У транспортній науці порт розглядається як інфраструктурний об'єкт транспортної системи, що виконує функції перевантаження та зберігання вантажів, обслуговування суден і технічних засобів суміжних видів транспорту, а також інших видів господарської діяльності, пов'язаних з цими процесами, орієнтуючись на потреби ринку транспортних послуг та взаємодіючи з різними учасниками цього ринку.

4. З позиції логістичного підходу концепція наскрізного управління матеріальним потоком передбачає неперервний моніторинг його переміщення єдиним суб'єктом. Однак коли матеріальний потік потрапляє на територію порту або портового термінала, контроль переходить до портового оператора. Це означає, що виробниче підприємство втрачає можливість забезпечувати наскрізне управління потоком, оскільки відповідальність за його подальше переміщення переходить до іншого учасника ринку.

5. Портовий оператор як самостійний суб'єкт ринку портових послуг здійснюють управління матеріальним потоком (у формі вантажів і вантажопотоків) у межах своєї компетенції. Це включає виконання всіх функцій управління: планування, облік, контроль, аналіз і регулювання технологічних операцій, пов'язаних з обслуговуванням вантажів, обробкою суден та технічних засобів інших видів транспорту. Однак це управління не є тотожним наскрізному управлінню матеріальним потоком, яке передбачає контроль на всіх етапах його руху. Виробниче підприємство може реалізовувати наскрізне управління лише в тому випадку, якщо портовий термінал належить йому

або експлуатується на будь-яких законних підставах, тобто є його структурним підрозділом (дочірнім підприємством) і входить до складу його логістичної системи.

6. Таким чином, у логістичному контексті порт або портовий термінал може бути частиною логістичної системи підприємства, що забезпечує наскрізне управління матеріальними потоками, але лише за умови його інтеграції у виробничий процес такого підприємства. Навіть за наявності доступу до сучасних інформаційних платформ більшість виробничих підприємств не здатні здійснювати повне наскрізне управління матеріальними потоками, оскільки цей процес обмежується контрактними умовами, що не передбачають їхньої участі в управлінні перевезеннями та вантажопереробкою. Крім того, нормативно-правове регулювання визначає компетенцію кожної ланки ланцюга постачання, а також права, обов'язки та відповідальність усіх учасників системи доставки вантажів.

7. Отже, роль (статус) порту або портового термінала визначається його організаційною приналежністю:

– якщо порт або портовий термінал належить виробничому підприємству, він є частиною його логістичної системи;

– якщо ж порт або портовий термінал є незалежним об'єктом, він функціонує як елемент транспортної системи, що забезпечує перевалку вантажів, але не входить до складу логістичної системи виробника.

Це розмежування між ролями порту в транспортній та логістичній системах дозволяє формувати ефективні управлінські рішення для розвитку як транспортних, так і логістичних систем на глобальному рівні, з урахуванням їхніх специфічних функцій та вимог.

Список літератури:

1. Кириллова О. В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах: дис. … д-ра техн. наук: 05.22.01. Одеса, 2017. 470 с.

2. Король В. Ю. (Кириллова В. Ю.). Організація експедиторського обслуговування транспортних процесів і систем доставки вантажів у контейнерах: дисс. … канд. техн. наук: 05.22.01. Одеса, 2019. 286 с.

3. Король В. Ю. (Кириллова В. Ю.), Кириллова О. В. Експедирування і логістика: термінологічні протиріччя, підміна понять і їх розмежування. *Транспортні системи та технології перевезень*: зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. Дніпро : ДНУЗТ, 2018. № 15. С. 42–51. DOI: https://doi.org/10.15802/tstt2018/150197

4. Kirillova E. V., Korol V. Y. (Kyryllova V. Y.). Logistic-oriented transport terminology: fashion trend or violation of traditions. *Науковий погляд у майбутнє: міжнародне періодичне наукове видання*. – Вип. 9. Том 2. Одеса, 2018. 113 с. С. 4–16. DOI: 10.30888/2415-7538.2018-09-2-052

5. Горшкова Л. О. Розвиток логістики: теоретичний аспект. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія «Економічні науки»*. 2012. № 1 (59), Ч. 2. С. 87–90.

6. Баришнікова В. В. Сучасний порт у логістичному ланцюгу доставки вантажів. *Економіка та управління підприємствами машинобудівної галузі*. 2009. № 4. С. 15–26.

7. Андрієвська В. А. Характеристика участі портових операторів у логістичних системах. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті*. № 1(62). 2018. С. 95–105. DOI: 10.31375/2226-1915-2018-1-95-105

8. Про морські порти України. Закон України від 17.05.2012 № 4709-VI / Верховна Рада України. *Відомості Верховної Ради України* від 15.02.2013 – 2013 р., № 7, С. 407, ст. 65. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4709-17#Text

9. Korol V. Y. (Kyryllova V. Y.). Systems representation and functional unity of transport, vehicular and cargo handling processes. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien: International periodic scientific journal*. Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany, 2018. Issue № 5, Vol. 3. P. 72–79. DOI: 10.30890/2567-5273

10. Kyryllova O. V., Korol V. Y. (Kyryllova V. Y.). To the question of the functional unity of the vehicular and cargo handling processes, and also the modern role of the ports. *Modern engineering and innovative technologies. Heutiges Ingenieurwesen und innovative Technologien: International periodic scientific journal*. Sergeieva&Co Karlsruhe, Germany, 2019. Issue № 9, Part 1. P. 104–111. DOI: 10.30890/2567-5273

11. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. Огляд термінологічної проблеми розмежування понять «технологічні» і «логістичні» процеси/операції. *76 професорсько-викладацька науково-технічна конференція ОНМУ*: матеріали наук.-практ. конф. (Одеса, 29–30 травня 2023 р.). Одеса: ОНМУ, 2023. 460 с. С. 158–161. URL: https://onmu.org.ua/images/university/news/staff_conf_2023_art.pdf

12. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. Класичні системи управління портами та їх концептуальні моделі. *Нукові вісті Далівського університету*. 2023. № 24. DOI: https://doi.org/10.33216/2222-3428-2023-24

13. Нібулон» відкрив 12-й термінал на річках України. Агропрофі – газета для підприємців АПК (укр.). Архів оригіналу за 13 січня 2022. URL: https://surl.li/vxezdz

14. Кириллова О. В., Кириллова В. Ю. «Smart Ports» як інноваційний вектор технологічної трансформації та цифровізації портів: від ідеї до концепції та практичної реалізації. *Розвиток транспорту. Транспортні технології*. 2024. № 4(23). С. 77–95. DOI: https://doi.org/10.33082/td.2024.4-23.07

Kyryllova O. V., Larina I. M. DUAL APPROACH TO THE DISTINCTION OF VIEWS ON THE MODERN PORT AND PORT TERMINAL FROM THE STANDPOINT OF TRANSPORT SCIENCE AND LOGISTICS

The article provides a comprehensive analysis of the differences between the approaches of transport science and logistics in defining the roles and functions of ports and port terminals. The aim of the study is to justify the conceptual distinction between transport and logistics approaches to the operation of ports and port terminals, taking into account the regulatory and organizational aspects of their activities. The study sets forth a number of objectives, including an analysis of the concept of «port» in transport science, the exploration of the logistics approach to integrating port infrastructure into the production and business processes of enterprises, and determining the scope of application of the logistics approach in port and terminal management considering organizational and legal aspects.

The research is based on regulatory and legal definitions of the terms «port,» «port terminal,» as well as theoretical aspects of cargo flow management within transport and logistics systems. The article examines the port as a key element of transport infrastructure that ensures cargo handling and storage, servicing vessels, and technical means of other transport modes. The role of the port as an independent element of the transport system, focused on providing transport services to a broad range of market participants, is outlined. At the same time, from a logistics perspective, the port is considered as an element of the logistics system integrated into the production and business processes of enterprises.

The practical part of the article includes an analysis of the activities of Ukrainian enterprises that legally own separate ports and terminals and operate them in the interests of their own production business structures, confirming the implementation of the logistics approach. It is emphasized that a clear distinction between the transport and logistics approaches is necessary for forming effective port management strategies and determining their functional roles in modern transport networks.

Key words: *port, transport hub, port terminal, port infrastructure, transport infrastructure, sea transportation, container transportation, logistics, logistics approach, interaction of transport modes, cargo, cargo flow, cargo transportation, cargo storage, cargo transshipment, freight transport.*

УДК 621.869.888
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/36

Ловська А. О.
Український державний університет залізничного транспорту

Мурад'ян А. О.
Одеський національний морський університет

Рибін А. В.
Український державний університет залізничного транспорту

Демидюков О. В.
Одеський національний морський університет

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КОНТЕЙНЕРА ДЛЯ ЗЕРНОВИХ ПРИ ЗАЛІЗНИЧНИХ ПЕРЕВЕЗЕННЯХ

Для підвищення ефективності перевезень зернових залізничним транспортом запропоновано конструкцію спеціалізованого контейнера. Особливістю даної конструкції контейнера є те, що він створений на базі універсального контейнера типорозміру 1 СС шляхом її модернізації. Передбачається створення в торцевій стіні за висотою 1/3 від нижнього обв'язування розвантажувального люка, а на даху – встановлення трьох завантажувальних люків стандартного діаметру.

Для обґрунтування запропонованої модернізації здійснено розрахунок на міцність контейнера за умови розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. При цьому застосовано програмний комплекс SolidWorks Simulation, який реалізує метод скінчених елементів. Для визначення прискорень, які діють на контейнер в повздовжній площині проведено математичне моделювання його навантаженості. Враховано, що контейнер розміщений на вагоні-платформі моделі 13-401М. Зазор між фітингами та фітинговими упорами не враховувався. Визначена величина прискорення, як складова динамічного навантаження, врахована при розрахунку на міцність контейнера. Формування скінчено-елементної моделі здійснено ізопараметричними тетраедрами. При цьому сітку створено на твердому тілі на основі змішанної кривини. Враховано, що на контейнер діє вертикальне навантаження, а також тиск розпору насипного вантажу на бокові та торцеві стіни. До передніх за ходом руху вагона-платформи фітингів контейнера прикладалися сили інерції. Результати проведених розрахунків показали, що максимальні напруження мають місце в середній частині горизонтального бруса для кріплення розвантажувального люка, але вони не перевищують допустимі значення.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності перевезень зернових залізничним транспортом шляхом залучення контейнерів.

Ключові слова: *залізничний транспорт, контейнерні перевезення, контейнер для зернових, міцність контейнера, навантаженість контейнера.*

Постановка проблеми. Відомо, що Україна є провідним експортером зернових в європейські країни. Для їх перевезень залізницею частіш за все використовуються вагони-хопери (рис. 1). Розбіжність в ширині колії між Україною та європейськими країнами зумовила використання для цих цілей контейнерів (рис. 2), що пояснюється їх мобільністю та зручністю обслуговування. Разом з цим, наразі контейнерний парк сформований здебільшого універсальними контейнерами, які призначені для перевезень широкої номенклатури вантажів.

Створення нових типів контейнерів, призначених для перевезень зернових, вимагає значних капітальних вкладень. Тому доцільним є дослідження можливості створення контейнерів для перевезень зернових на базі існуючих конструкцій. Це дозволить підвищити ефективність перевезень зернових у міжнародному напрямку. У зв'язку з цим, актуальним постає питання модернізації універсальних контейнерів для їх адаптації до перевезень зернових.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Наразі в експлуатації використовується досить

а *б*

Рис. 1. Вагони-хопери для перевезень зернових: *а* – модель 19-7016; *б* – модель 19-765Э

а *б*

Рис. 2. Контейнери для зернових: *а* – з дахом; *б* – з тентом

велика різноманітність контейнерів, які різняться між собою не тільки конструкцією, а і способом технологічної обробки. Так, наприклад, в роботі [1] для зменшення бокових навантажень, які діють на контейнер в експлуатації, запропоновано впровадження у якості складових його конструкції сендвіч-панелей. Наведено результати визначення динамічної навантаженості та міцності контейнера, які підтвердили доцільність запропонованих рішень. Однак авторами не розглядалася можливість залучення даного контейнера під перевезення насипних, в тому числі, зернових вантажів.

Особливості розрахунку на міцність контейнера типорозміру 1АА проведено в роботі [2]. Автори закцентували свою увагу на визначенні міцності підлоги контейнера. При цьому розглянуто його рух через тунель певного радіусу. Проведені розрахунки дозволили сформувати рекомендації щодо безпечної експлуатації контейнера за даним маршрутом. Разом з цим, поза увагою авторів залишилися питання конструкційного удосконалення контейнера для покращення ефективності його експлуатації.

Вибір раціонального матеріалу виготовлення контейнера для плодоовочевої продукції з точки зору якісних характеристик перевозимого вантажу, проводиться в публікації [3]. Результати проведеного авторами аналізу виявили, що найбільш доцільним є використання пластикових контейнерів для перевезень плодоовочевої продукції. Разом з цим, автори обмежилися лише вибором раціонального матеріалу виконання контейнера та не досліджували особливостей його навантаженості в експлуатації.

В публікації [4] автори запропонували конструкцію контейнера з підлогою із сендвіч-панелей. Наведено комплексі теоретичні розрахунки на міцність конструкції контейнера, які підтвердили доцільність його удосконалення. Однак автори не розглядали можливість перевезень у такому контейнері зернових, оскільки ставили за мету створення універсальної конструкції контейнера.

Особливості розрахунку на міцність контейнера для перевезень плодоовочевої продукції висвітлено в роботі [5]. При цьому автори запропонували конструкційні рішення в контейнері, спрямовані на покращення його експлуатації.

Проведені розрахунки підтвердили доцільність запропонованого удосконалення. Разом із цим, авторами не досліджувалась можливість впровадження запропонованих рішень щодо конструкції контейнера для перевезень зернових.

В статті [6] авторами висвітлюються особливості конструкції складеного контейнера для перевезень масових вантажів. Доведено доцільність використання складеного контейнера з точки зору заощадження витрат на перевізний процес. Але в роботі не проведено аналізу навантаженості запропонованої конструкції контейнера, що не дозволяє оцінити його переваги у порівнянні із існуючими конструкціями з точки зору міцності.

Аналіз літературних джерел [1–6] дозволяє зробити висновок, що питання створення та удосконалення конструкцій контейнерів з метою можливості їх залучення до перевезень зернових, потребують подальших досліджень.

Постановка завдання. Метою статті є висвітлення результатів дослідження повздовжньої навантаженості контейнера для зернових при залізничних перевезеннях. Для досягнення зазначеної мети визначені такі завдання:

– запропонувати рішення щодо технічної адаптації універсального контейнера до перевезень зернових;

– визначити повздовжню навантаженість контейнера за умови його розміщення на вагоні-платформі під час маневрового співударяння.

Виклад основного матеріалу. Для модернізації універсального контейнера з метою його залучення до перевезень зернових у якості прототипу обрано контейнер типорозміру 1СС. Просторову модель контейнера наведено на рис. 3.

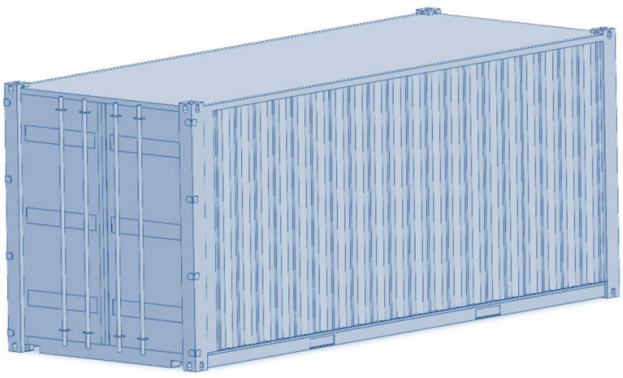


Рис. 3. Просторова модель контейнера типорозміру 1СС

Завантаження даного контейнера здійснюється через торцеві двері, які у зачиненому стані утворюють торцеву стіну. Для завантаження/розвантаження контейнера можуть застосовуватися механізована техніка.

З метою адаптації даного контейнера до перевезень зернових передбачається створення в торцевій стіні за висотою 1/3 від нижнього обв'язування розвантажувального люка, а також встановлення на даху трьох завантажувальних люків стандартного діаметру (рис. 4).

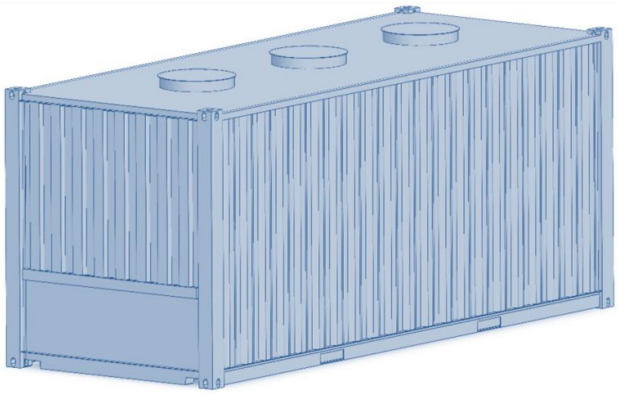


Рис. 4. Просторова модель контейнера

Для обґрунтування запропонованої модернізації проведено розрахунок на міцність контейнера при маневровому співударянні. Розрахунок здійснено за методом скінчених елементів у програмному комплексі SolidWorks Simulation. Розрахункову схему контейнера наведено на рис. 5. Враховано, що на контейнер діє вертикальне навантаження $P_в$, яке враховує його вантажопідйомність. Власну вагу контейнера враховано за допомогою опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation за умови виготовлення конструкції зі сталі марки 09Г2С. До бокових стін контейнера прикладався тиск розпору насипного вантажу $P_б$, а до торцевих – $P_т$. До передніх за ходом руху вагона-платформи фітингів контейнера прикладалися сили інерції $P_ф$ [7].

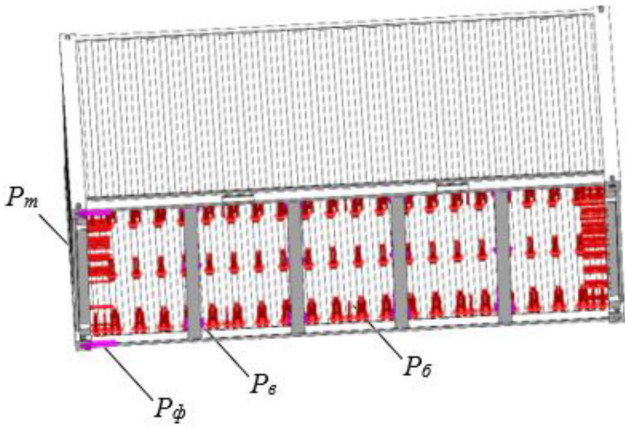


Рис. 5. Розрахункова схема контейнера

Для визначення сил інерції $P_ф$, які діють на фітинги, проведено математичне моделювання повздовжньої динаміки вагона-платформи, завантаженого двома контейнерами. Для цього використано математичну модель, наведену в роботі [8]. Враховано, що контейнери, розміщені на вагоні-платформі, не мають власного ступеня вільності у повздовжній площині. Розрахунок проведено на прикладі вагона-платформи моделі 13-401М.

Розв'язок математичної моделі здійснено у програмному комплексі MathCad. Рівняння, які утворюють математичну модель зводились до нормальної форми Коші. Після чого відбувалося їх інтегрування із застосуванням методу Рунге – Кутта.

Початкові умови покладені рівними нулю. Результати розрахунку встановили, що прискорення, яке діє на контейнери складає близько 34,8 м/с^2.

Дане прискорення враховано при розрахунках на міцність контейнера. Формування скінченоелементної моделі відбувалося із використанням тетраедрів [9–11]. Сітка утворювалась на основі змішаної кривини та налічує 1 027 293 елементів і 1 838 877 вузлів (рис. 6). Максимальний розмір елемента склав 60 мм, а мінімальний – 3 мм. Кількість точок Якобіана для сітки високої якості склала 16 одиниць. Зварювальні шви між окремими складовими контейнера не враховувалися, тобто його розглянуто як монолітну конструкцію.

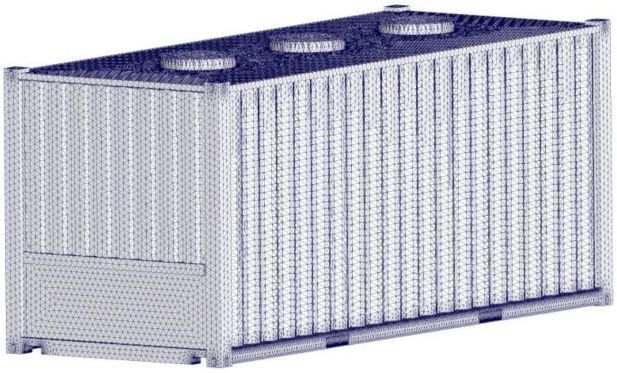


Рис. 6. Скінчено-елементна модель контейнера

Закріплення контейнера відбувалося на фітинги. Результати його розрахунку на міцність наведено на рис. 7, 8.

Максимальні напруження мають місце в середній частині горизонтального бруса для кріплення розвантажувального люка і складають 248,5 МПа (рис. 7). Дані напруження є нижчими за допустимі, які для зазначеного режиму прийняті рівними 310,5 МПа [12]. Отже міцність контейнера при завданому режимі навантаження його конструкції дотримується.

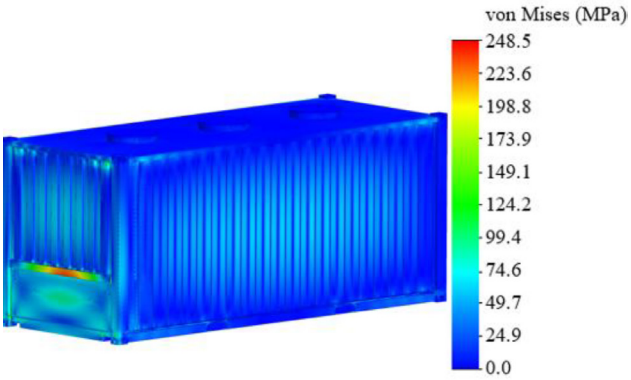


Рис. 7. Напружений стан контейнера

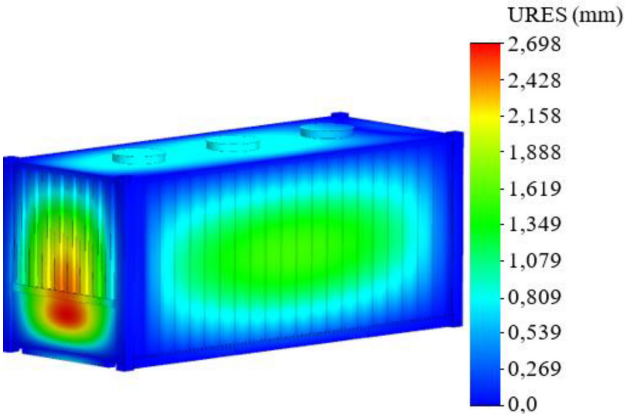


Рис. 8. Переміщення в вузлах контейнера

Максимальні переміщення зосереджено в розвантажувальному люку і склали близько 2,7 мм (рис. 8). Таке розподілення переміщень зумовлено конструкцією торцевої стіни та схемою прикладення навантаження до неї.

На послідуючому етапі планується дослідження міцності контейнера при інших експлуатаційних режимах навантаження, зокрема, при русі у складі поїзда, а також при перевезенні на залізничному поромі.

Висновки.

1. Для адаптації універсального контейнера до перевезень зернових запропоновано модернізацію його конструкції, яка полягає у створенні в торцевій стіні за висотою 1/3 від нижнього обв'язування розвантажувального люка, а також встановлення на даху трьох завантажувальних люків стандартного діаметру.

2. Для обґрунтування запропонованої конструкції контейнера проведено визначення його повздовжньої навантаженості при одній із найбільш неблагоприємних схем навантаження при залізничних перевезеннях – маневровому співударянні. Встановлено, що максимальні прискорення, які діють на контейнер, розміщений на вагоні-платформі за умови відсутності зазорів між фітингами

та фітинговими упорами складають 34,8 м/с^2. Отримані прискорення враховано при розрахунку на міцність контейнера. Результати розрахунку контейнера на міцність показали, що максимальні напруження в його конструкції складають 248,5 МПа і виникають в середній частині горизонтального бруса для кріплення розвантажувального люка. Зазначені напруження не перевищують допустимі значення. Максимальне переміщення зосереджено в розвантажувальному люку і склало близько 2,7 мм.

Проведені дослідження сприятимуть підвищенню ефективності перевезень зернових залізничним транспортом шляхом залучення контейнерів.

Подяка. *Дана публікація підготовлена у рамках виконання стипендіальної роботи Верховної Ради України для молодих учених – докторів наук «Ефективні конструктивні рішення залізничного рухомого складу для перевезень стратегічних вантажів» (№ДР 0124U003906).*

Список літератури:

1. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, Ye. S. Krasnokutskyi. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012140.

2. Arkadiusz Rzeczycki, Bogusz Wisnicki. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90.

3. D. K. Antala, R. M. Satasiya, P. M. Chauhan. Design, development and performance evaluation of transportation container for sapota fruit. *Journal of Food Sciences and Technology*. 2021. Vol. 58(10). P. 4024–4033. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04865-w

4. Alyona Lovska, Iraida Stanovska, Valeriia Kyryllova, Andrii Okorokov, Roman Vernigora. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. Vol. 6/7(132). P. 6–14. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.311324

5. Rahimov Rustam Vyacheslavovich, Khadjimukhametova Matluba Adilovna, akhmatov Zafar Xasanovich. Development of improved technical means fortransportation fruits and vegetables. *European science review*. 2016. Vol. 1–2. P. 175–177.

6. Poklemba R., Zajac J., Goldyniak D., Olexa I., Dilýová M. Construction proposal of shipping bulk container. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 776. 012046. https://doi.org/10.1088/1757-899X/776/1/012046

7. Vatulia G., Lovska A., Myamlin S., Stanovska I., Holofieieva M., Horobets V., Nerubatskyi V., Krasnokutskyi Y. Revealing the effect ofstructural componentsmade of sandwich panelson loading the containertransported by railroad. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. № 1/7(121). P. 48–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272316

8. Ловська А. О. Розвиток наукових основ розрахунків конструкцій вагонів шляхом урахування наднормованих режимів при експлуатації: автореф. дис. … канд. техн. наук: 05.22.07. Харків, 2021. 40 с.

9. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.

10. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.

11. Ловська А. О. Визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами. Збірник наукових праць УкрДУЗТ. 2019. Вип. 184. С. 6–19.

12. 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., Muradian A. O., Rybin A. V., Demydiakov O. V. RESEARCH OF LONGITUDINAL LOADING OF A GRAIN CONTAINER IN RAILWAY TRANSPORT

To increase the efficiency of grain transportation by rail, a specialized container design has been proposed. A feature of this container design is that it is based on a universal container of standard size 1 CC by its modernization. It is planned to create an unloading hatch in the end wall at a height of 1/3 from the lower strapping, and on the roof – to install three loading hatches of standard diameter.

To substantiate the proposed modernization, a calculation was made for the strength of the container when placed on a platform wagon during shunting collision. The SolidWorks Simulation software package was used, which implements the finite element method. To determine the accelerations acting on the container in the longitudinal plane, a mathematical modeling of its loading was carried out. It was taken into account that the container is placed on a flat wagon of model 13-401M. The gap between the fittings and fitting stops was not taken into account. The determined acceleration value, as a component of the dynamic load,

was taken into account when calculating the strength of the container. The finite element model was formed using isoparametric tetrahedra. In this case, the mesh was created on a solid body based on mixed curvature. It was taken into account that the container is subjected to a vertical load, as well as the pressure of the bulk cargo expansion on the side and end walls. Inertia forces were applied to the container fittings in front of the flat wagon in terms of movement. The results of the calculations showed that the maximum stresses occur in the middle part of the horizontal beam for fastening the unloading hatch, but they do not exceed the permissible values.

The conducted studies will contribute to increasing the efficiency of grain transportation by rail by involving containers.

Key words: *rail transport, container transportation, grain container, container strength, container loading.*

УДК 621.869.888
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/37

Ловська А. О.
Український державний університет залізничного транспорту

Павлюченков М. В.
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова

Равлюк В. Г.
Український державний університет залізничного транспорту

Скуріхін Д. І.
Український державний університет залізничного транспорту

Рибін А. В.
Український державний університет залізничного транспорту

Федоришин В. С.
Український державний університет залізничного транспорту

ДОСЛІДЖЕННЯ ПОВЗДОВЖНЬОЇ НАВАНТАЖЕНОСТІ КАРКАСА УНІВЕРСАЛЬНОГО КОНТЕЙНЕРА УДОСКОНАЛЕНОЇ КОНСТРУКЦІЇ

Стаття присвячена визначенню міцності каркаса універсального контейнера удосконаленої конструкції. Особливість удосконалення полягає у використанні в каркасі контейнера додаткових елементів, які будуть розвантажувати найбільш навантажені зони його конструкції.

Проведено визначення профілю виконання додаткових елементів каркаса із використанням опцій програмного комплексу «ЛІРА – САПР». Розрахунок здійснено на прикладі контейнера типорозміру 1СС за умови його повздовжньої навантаженості. При цьому розглянуто режим його навантаження при перевезенні у складі поїзда на вагоні-платформі. Визначено повздовжнє навантаження, яке сприймає контейнер при цьому та здійснено побудову епюри повздовжньої сили, яка діє в каркасі.

На підставі проведених розрахунків у якості профілю виконання каркаса обрано квадратну трубу 180 × 180 мм з площею поперечного перерізу $A = 4,5$ см^2 та масою 1 погонного метра $m = 24,39$ кг.

Створено просторову модель каркаса контейнера з урахуванням його удосконалення. На базі даної моделі проведено розрахунок на міцність каркаса контейнера з використанням методу скінчених елементів, який реалізовано в SolidWorks Simulation.

Встановлено, що максимальні напруження в каркасі виникають в зоні взаємодії повздовжніх балок із фітингами і складають 174,1 МПа. Отримані напруження є нижчими за допустимі майже на 20 %. Максимальні переміщення виникають у середній частині виделки і складають 3,2 мм.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Також результати досліджень можливо використовувати при модернізаціях існуючого парку контейнерів.

Ключові слова: *залізничний транспорт, контейнерні перевезення, конструкція контейнера, міцність контейнера, навантаженість контейнера.*

Постановка завдання. Контейнерні перевезення є найбільш затребуваним видом перевезень вантажів різними галузями транспорту. Разом із цим, процес транспортування контейнерів супроводжується дією на їх конструкцію різних за природою виникнення навантажень. Це обумовлює пошкодження їх конструкцій в експлуатації.

У зв'язку з цим було досліджено основні режими навантажень контейнерів в експлуатації і встановлено, що найбільш неблагоприємні навантаження мають місце при залізничних перевезен-

нях [1, 2]. При цьому контейнер випробовує значні динамічні навантаження, які зумовлюють його пошкодження. Здебільшого ці пошкодження припадають на повздовжні балки рами, а саме, зони їх взаємодії із фітингами. Така ситуація загрожує пошкодженню контейнера, розвалюванню вантажу на шляху прямування, а також безпеці руху поїзда. Тому виникає необхідність удосконалення конструкції контейнера для забезпечення його міцності при експлуатаційних режимах.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Для виявлення наявного доробку з питань удосконалень контейнерів проведено аналіз наукових публікацій за тематикою дослідження. Так, наприклад, в статті [3] авторами запропоновано конструкцію універсального контейнера у якого обшивку стін утворюють сендвіч-панелі. Зазначено, що таке впровадження сприяє покращенню схоронності перевозимих вантажів, адже дозволяє зменшити величини динамічних навантажень, які діють на контейнер в експлуатації. Результати проведеного моделювання навантаженості контейнера підтвердили, що таке рішення є обґрунтованим. Однак впровадження контейнерів запропонованої конструкції стримується фінансово, оскільки вимагає значних капітальних вкладень. Аналогічний недолік має і публікація [4], де авторами запропоновано впровадження сендвіч-складових у якості настилу підлоги контейнера та торцевих стін.

Дослідження впливу податливості контейнера на міцність його конструкції при залізничних перевезеннях висвітлено в роботі [5]. На підставі проведених розрахунків сформульовано вимоги щодо безпечної експлуатації контейнера. В роботі [6] досліджено особливості навантаженості контейнера при його водному перевезенні. Проведені дослідження також дозволили сформувати вимоги щодо безпеки перевезень контейнера за досліджуваним маршрутом. Однак при цьому в роботах [5, 6] не запропоновано конструкційних рішень щодо удосконалення контейнера.

Автори публікації [7] запропонували конструкцію контейнера для плодоовочевих вантажів. В роботі наведено обґрунтування такої конструкції відповідними розрахунками на міцність. Однак при цьому в роботі не розглянуто повздовжньої навантаженості контейнера, а також не зазначено конструкційних рішень щодо можливості її зменшення.

Проведений літературний огляд публікацій [3–7] показує, що питанням удосконалення каркаса контейнера для покращення його міцності в експлуатації не приділялося належної уваги. Тому необхідним є проведення досліджень за даним науковим напрямком.

Постановка завдання. Метою статті є наукове обґрунтування конструкційного виконання каркасу універсального контейнера з посилюючими елементами в рамі. Це сприятиме зменшенню пошкоджень контейнерів в експлуатації, а відповідно і зменшенню витрат на їх утримання. Для досягнення сформульованої мети визначено такі завдання:

– провести визначення силових факторів в каркасі контейнера із урахуванням його удосконалення;

– провести розрахунок на міцність каркаса контейнера при експлуатаційних навантаженнях.

Виклад основного матеріалу. Для забезпечення міцності контейнера в експлуатації пропонується удосконалення його конструкції. Передбачається постановку до нижньої частини каркасу контейнера додаткових елементів, які будуть розвантажувати найбільш навантажені зони його конструкції (рис. 1).

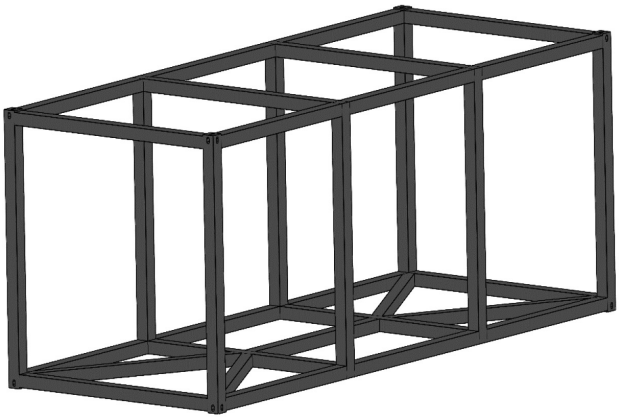


Рис. 1. Каркас контейнера

Посилюючі елементи каркасу представлені у вигляді виделки, кінцеві частини (розкоси) якої сприймають частину навантаження від фітингів та передають його на її середню частину. Для обґрунтування запропонованого рішення проведено розрахунок каркаса як стрижневої системи у програмному комплексі «ЛІРА – САПР». Розрахунок проведено на прикладі контейнера типорозміру 1СС.

До уваги прийнято повздовжню навантаженість контейнера при його перевезенні у складі поїзда. Розрахункову схему каркаса наведено на рис. 2. Враховано, що повздовжні навантаження сприймаються повздовжніми балками нижньої частини каркаса. Для визначення значення повздовжнього

навантаження проведено математичне моделювання динамічної навантаженості контейнера за умови його перевезення на вагоні-платформі. При цьому використано математичну модель, сформовану у попередній роботі авторів [8].

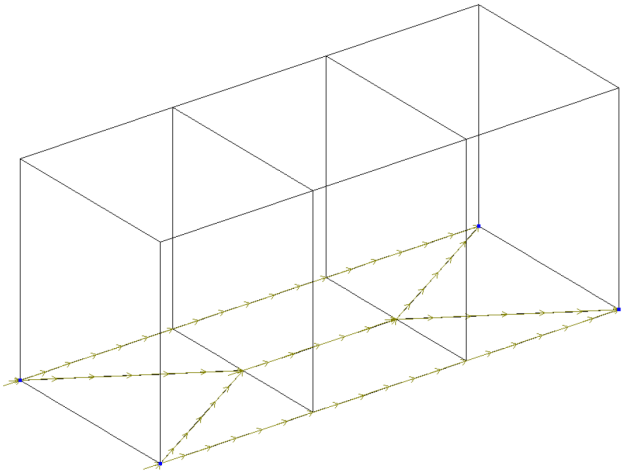


Рис. 2. Розрахункова схема каркаса

Враховано, що величина повздовжньої сили, яка діє на упори автозчепного пристрою вагона-платформи складає 2,5 МН [9]. На підставі розв'язку математичної моделі прискорення, яке діє на контейнер, склало близько 20 м/с^2. Це прискорення враховано при визначенні величини повздовжнього навантаження, яке діє на контейнер. Дане навантаження склало 480 кН.

З урахуванням прикладення повздовжнього навантаження до балок каркасу контейнера у ньому виникають повздовжні сили (рис. 3). Максимальне значення повздовжньої сили спостерігається в повздовжніх балках і дорівнює 156 кН. Дані сили на 35 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції каркаса контейнера. Це можна пояснити тим, що розкоси знімають частину повздовжнього навантаження, що діє на повздовжні балки.

На підставі проведених розрахунків у якості профілю виконання каркаса обрано квадратну трубу 180 × 180 мм з площею поперечного перерізу A = 4,5 см^2 та масою 1 погонного метра m = 24,39 кг.

З урахуванням обраного профілю виконання каркаса контейнера побудовано його просторову модель в SolidWorks. На базі даної моделі проведено розрахунок на міцність каркаса контейнера з використанням методу скінчених елементів в SolidWorks Simulation [10, 11].

При створенні скінчено-елементної моделі використано тетраедри [12]. Чисельність елементів моделі склала 50 723 та визначена графоаналітично. Чисельність вузлів дорівнює 16 557. Розрахункову схему контейнера наведено на рис. 4. Вона включає вертикальне навантаження $P_в$, а також повздовжнє $P_п$, прикладене до передніх за ходом руху поїзда фітингів контейнера. Вертикальне навантаження, яке діє на контейнер включає навантаження, яке обумовлене власною вагою контейнера, а також вагою вантажу, що перевозиться в ньому. При цьому власна вага каркаса контейнера завдавалася із урахуванням опцій програмного комплексу SolidWorks Simulation. Матеріалом каркаса обрано сталь марки 09Г2С, яка для завданого режиму експлуатації має допустимі напруження 210 МПа [9]. Закріплення моделі здійснено за фітинги [13, 14].

Результати розрахунку наведено на рис. 5, 6. При цьому максимальні напруження в каркасі зафіксовано в зоні взаємодії повздовжніх балок із фітингами (рис. 5). Ці напруження склали 174,1 МПа і є нижчими за допустимі майже на 20 %.

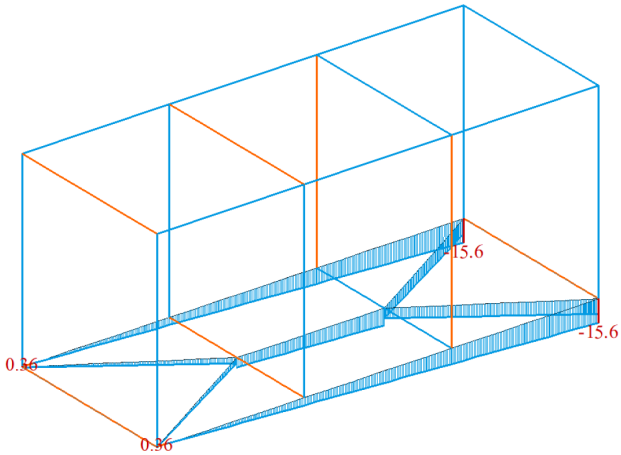


Рис. 3. Епюра повздовжніх сил, що діють на каркас контейнера

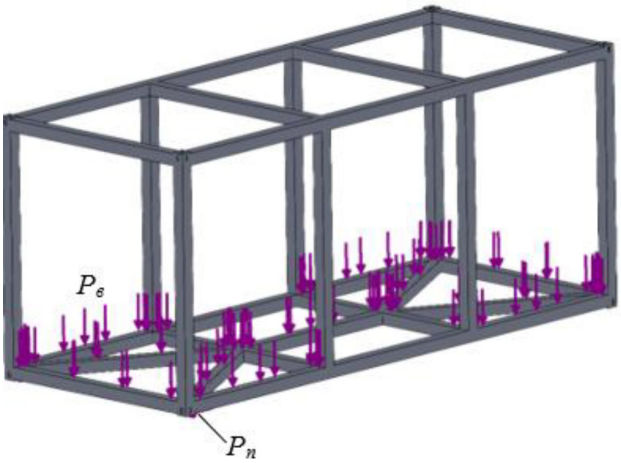


Рис. 4. Розрахункова схема каркаса контейнера

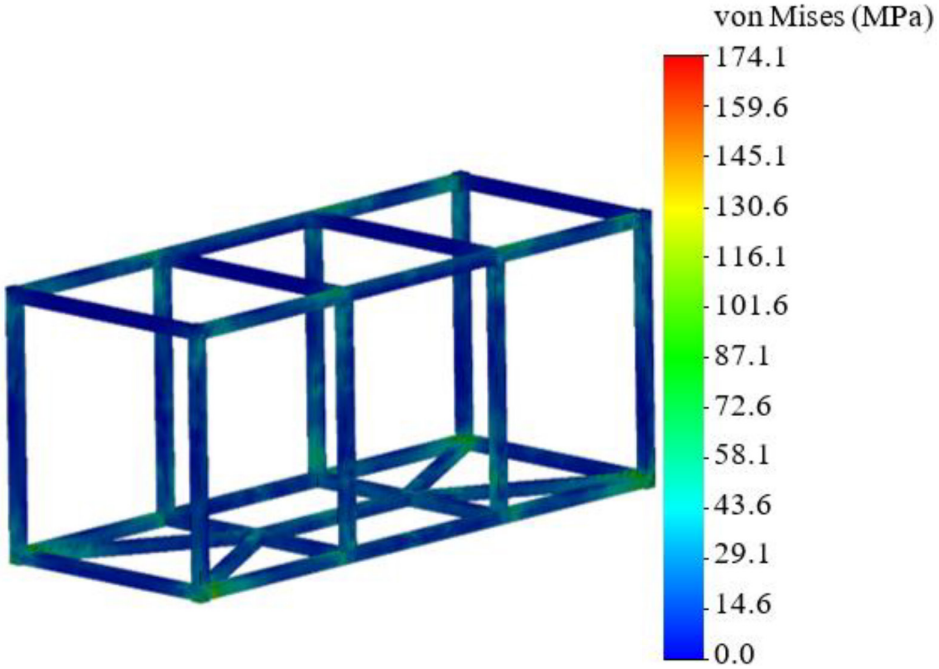


Рис. 5. Напружений стан каркаса контейнера

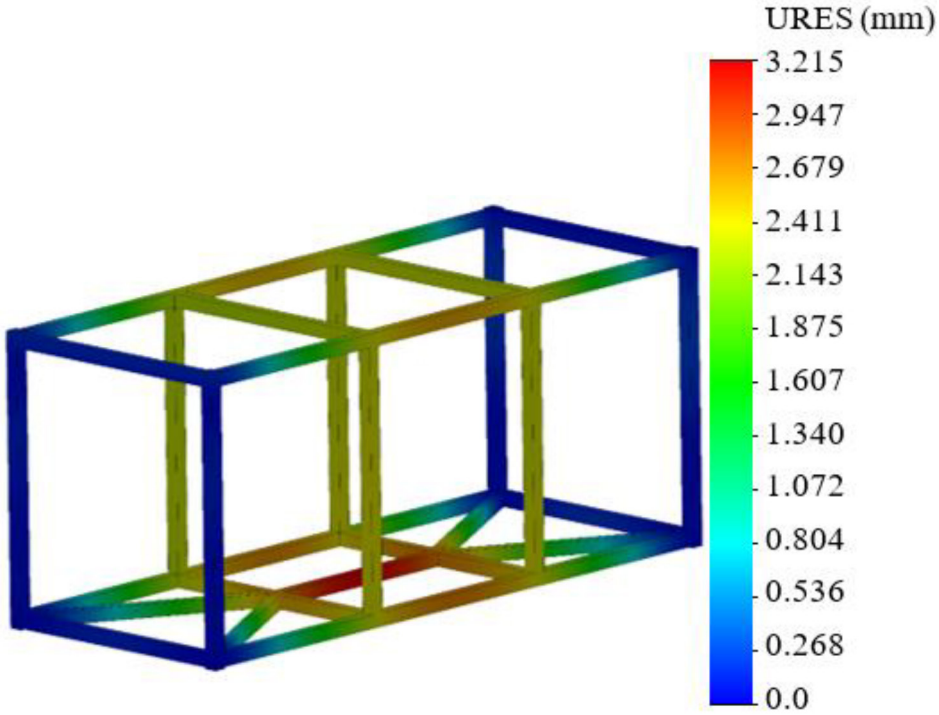


Рис. 6. Переміщення в вузлах конструкції каркаса контейнера

Максимальні переміщення виникають у середній частині виделки і складають 3,2 мм (рис. 6). Така дислокація переміщень пояснюється схемою прикладення навантажень до каркаса контейнера та його закріпленням.

Подальшим розвитком даного дослідження буде оптимізація обшивки контейнера, а також дослідження його навантаженості при інших розрахункових режимах.

Висновки.

1. Проведено визначення силових факторів в каркасі контейнера удосконаленої конструкції. Встановлено, що при сприйнятті каркасом контейнера повздовжніх навантажень в ньому вини-

кають повздовжні сили, максимальне значення яких складає 156 кН та зафіксовано в зонах взаємодії фітингів з розкосами. Дані сили на 35 % нижчі за ті, що мають місце в типовій конструкції каркаса контейнера.

Обрано профіль виконання каркаса контейнера: квадратна труба 180 × 180 мм з площею поперечного перерізу A = 4,5 см^2 та масою 1 погонного метра m = 24,39 кг.

2. Проведено розрахунок на міцність каркаса контейнера при експлуатаційних навантаженнях. Встановлено, що максимальні напруження в каркасі виникають в зоні взаємодії повздовжніх балок із фітингами і складають 174,1 МПа. Ці напруження є нижчими за допустимі майже на 20 %. Максимальні переміщення виникають у середній частині виделки і складають 3,2 мм.

Проведені дослідження сприятимуть створенню рекомендацій щодо проєктування контейнерів із покращеними техніко-економічними та експлуатаційними характеристиками. Також результати досліджень можливо використовувати при модернізаціях існуючого парку контейнерів.

Список літератури:

1. G. L. Vatulia, A. O. Lovska, Ye. S. Krasnokutskyi. Research into the transverse loading of the container with sandwich-panel walls when transported by rail. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2023. Vol. 1254. 012140.

2. Antala D. K., Satasiya R. M., Chauhan P. M. Design, development and performance evaluation of transportation container for sapota fruit. *Journal of Food Sciences and Technology*. 2021. Vol. 58(10). P. 4024–4033. https://doi.org/10.1007/s13197-020-04865-w

3. Lovska A., Stanovska I., Kyryllova V., Okorokov A., Vernigora R. Determining the vertical load on a container with a floor made of sandwich panels transported by a flat wagon. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. № 6/7(132). P. 36–44. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2024.315059

4. Glib Vatulia, Alyona Lovska, Serhii Myamlin, Iraida Stanovska, Maryna Holofieieva, Volodymyr Horobets, Volodymyr Nerubatskyi, Yevhen Krasnokutskyi Revealing the effect ofstructural components made of sandwich panelson loading the container transported by railroad. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2023. Vol. 1/7 (121). P. 48–56. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2023.272316

5. Andrew Nikitchenko, Viktor Artiukh, Denis Shevchenko, Raghu Prakash. Evaluation of Interaction Between Flat Wagons and Container at Dynamic Coupling of Flat Wagonss. *MATEC Web of Conferences*. 2016. Vol. 7, 04008. https://doi.org/10.1051/matecconf/2016 TPACEE-2016

6. Arkadiusz Rzeczycki, Bogusz Wisnicki. Strength analysis of shipping container floor with gooseneck tunnel under heavy cargo load. *Solid State Phenomena*. 2016. Vol. 252. P. 81–90.

7. Matluba A. Khadjimukhametova, Avaz M. Merganov. Development of the Design and Conditions of Operation of Containers for Transportation of Fruit and Vegetable Products International. *Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*. 2020. Vol. 8, Issue 5. P. 2277–3878.

8. Ловська А. О. Дослідження міцності несучої конструкції контейнера-цистерни, розміщеного на вагоні-платформі при маневровому співударянні. *Транспортні системи і технології*. 2016. Вип. 28. С. 90–98.

9. ДСТУ 7598:2014. Вагони вантажні. Загальні вимоги до розрахунків та проектування нових і модернізованих вагонів колії 1520 мм (несамохідних). Київ, 2015. 250 с.

10. Козяр М. М., Фещук Ю. В., Парфенюк О. В. Комп'ютерна графіка: SolidWorks: навчальний посібник. Херсон : Олді-плюс, 2018. 252 с.

11. Пустюльга С. І., Самостян В. Р., Клак Ю. В. Інженерна графіка в SolidWorks: навчальний посібник. Луцьк : Вежа, 2018. 172 с.

12. Gerlici J., Lovska A., Kozáková K. Research into the Longitudinal Loading of an Improved Load-Bearing Structure of a Flat Car for Container Transportation. *Designs*. 2025. Vol. 9(1), 12. https://doi.org/10.3390/designs9010012

13. Aurelio Liguori, Andrea Formato, Arcangelo Pellegrino, Francesco Villecco. Study of Tank Containers for Foodstuffs. *Machines*. 2021. Vol. 9, 44. https://doi.org/10.3390/machines9020044

14. Ловська А. О. Визначення навантаженості контейнера, розміщеного на вагоні-платформі при пружно-в'язкій взаємодії фітингів з фітинговими упорами. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2019. Вип. 184. С. 6–19.

Lovska A. O., Pavliuchenkov M. V., Ravlyuk V. G., Skurikhin D. I., Rybin A. V., Fedorishin V. S.

RESEARCH OF THE LONGITUDINAL LOADING OF THE FRAME OF AN UNIVERSAL CONTAINER OF AN IMPROVED DESIGN

The article is devoted to determining the strength of the frame of a universal container of improved design. The peculiarity of the improvement is the use of additional elements in the container frame that will unload the most loaded areas of its structure.

The profile of the additional frame elements was determined using the options of the "LIRA – CAD" software package. The calculation was carried out on the example of a container of standard size 1 CC, provided that it is longitudinally loaded. At the same time, its loading mode was considered when transported as part of a train on a flat wagon. The longitudinal load that the container perceives in this case was determined and a diagram of the longitudinal force acting in the frame was constructed.

Based on the calculations, a square tube 180 × 180 mm with a cross-sectional area A = 4.5 cm^2 and a mass of 1 linear meter m = 24.39 kg was selected as the frame profile.

A spatial model of the container frame was created taking into account its improvement. Based on this model, the strength of the container frame was calculated using the finite element method, which is implemented in SolidWorks Simulation.

It was found that the maximum stresses in the frame occur in the zone of interaction of the longitudinal beams with the fittings and are 174.1 MPa. The resulting stresses are lower than the permissible ones by almost 20 %. The maximum displacements occur in the middle part of the fork and are 3.2 mm.

The conducted research will contribute to the creation of recommendations for the design of containers with improved technical, economic and operational characteristics. The results of the research can also be used in the modernization of the existing container fleet.

Key words: *railway transport, container transportation, container design, container strength, container loading.*

УДК 336.2/656.1
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/38

Окороков А. М.
Український державний університет науки і технологій

Бех П. В.
Український державний університет науки і технологій

Лашков О. В.
Український державний університет науки і технологій

ЦИФРОВІЗАЦІЯ МИТНИХ ПРОЦЕДУР В ТРАНСПОРТНИХ ПРОЦЕСАХ

У статті обговорюються ключові моменти впровадження в діяльності митних органів інформаційних технологій, оскільки специфіка діяльності учасників європейської економіки вимагає швидкого прийняття важливих рішень для забезпечення якості та своєчасного переміщення товарів. Автоматизація митних процедур та швидкий автоматичний результат, що застосовується відносно значного масиву учасників зовнішньо-економічної діяльності, надає додатковий стимул для економічних відносин, розвитку бізнесу, зменшенню транспортної складової при переміщенні товарів.

У зв'язку з цим було проаналізовано аналіз стратегії розвитку митної служби України, її участь в транспортних процесах з використанням інформаційних технологій.

Механізм, який сприятиме умовам ведення міждержавної торгівлі, спростить митні формальності. У Європейській економічній комісії представлений механізм «об'єднаного вікна», що надає можливість одноразового представлення даних за допомогою одного каналу з можливістю виконання митних формальностей експорту-імпорту у взаємодії з державними органами. Розвиток єдиного віконного механізму на території Європейського союзу є однією з нинішніх та пріоритетних областей співпраці, так що насправді, використання «єдиного вікна» є ефективним інструментом для спрощення процесу міжнародної торгівлі, налагодженню стійких транспортних потоків, що дозволить транспортним організаціям та промисловцям мінімізувати витрати при здійсненні експортних, імпортних та транзитних операцій.

Створення цифрових митниць сприяє скороченню часу по завершенню митних процедур, отримання дозволів, оформлення відповідних документів, а також обробці та зберіганню великих масивів інформації.

Протягом останніх десятиліть цифровізація стала невід'ємною частиною торгівельної діяльності. Вона змінила структуру торгівлі та сприяла розширенню та диверсифікації торгових можливостей на внутрішньому, регіональному та міжнародному рівнях, створює умови для швидшого постачання та впровадження товарів та послуг і спрощенню торгівлі, полегшуючі вихід на ринки та зменшенням пов'язаних витрат. Цифрові інструменти також можуть відігравати важливу роль у прискоренні прогресу у досягненні цілей сталого розвитку (ЦСР).

Так інформаційно-комунікаційні технології (ІКТ), електронні сертифікати та електронне відстеження товарів можуть сприяти більш стабільним та надійним виробничим процесам.

Ключові слова: *митні процедури, інформаційні ресурси, цифрові технології, транспортні процеси, інформаційно-комунікаційні технології.*

Постановка проблеми. В останні роки митні процедури на транспорті стали більш швидкими та ефективнішими, завдяки впровадженню цифрових технологій. У 2025 році Україна продовжує вводити інноваційні рішення у сферу митного оформлення вантажів, що допомагає покращити роботу як митниць, так і транспортних організацій. Модернізація системи дозволяє скоротити час, що витрачається на оформлення документів, зменшити бюрократичне навантаження та підвищити прозорість усіх операцій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. В [2] досліджується організація митних операцій, але приведені дослідження стосувались в основному вантажів, що притаманні залізничним перевезенням.

Сучасні технологічні аспекти різних варіантів переміщення вантажів представлені в роботах [3, 4], але без врахування митної складової.

Постановка завдання. Метою статті є дослідження і висвітлення основних завдань та проблем у впровадженні використання цифрових технологій при проведенні митних процедур у транспортних процесах.

Виклад основного матеріалу. У світовій торгівлі міжнародного рівня Світова організація торгівлі (СОТ) відіграє ключову роль форуму для обговорення та перемовин щодо правил цифрової торгівлі. Хоча багатостороннього документа по цифровій та електронній торгівлі не існує, правила багатосторонньої торгівлі в СОТ пов'язане з деякими досягненнями в нових технологічних галузях. Крім того, у багатьох випадках у правилах СОТ розглядаються питання технологічно нейтрально з використанням цифрового інструмента, наприклад, цифровізація митних процедур за угодою СОТ щодо спрощення процедур торгівлі.

Українські митниці активно вводять автоматизовані системи, які допомагають прискорити процес обробки програм та обробки товарів. Раніше процес митного дозволу включав багато кроків, включаючи подання паперових документів, фізичні перевірки товарів та виконані обов'язки вручну. Однак в останні роки інноваційні технології були замінені традиційними методами, такими як електронні декларації, системи автоматичного аналізу даних та алгоритми машинного навчання.

Національний стратегічний план цифрового розвитку, цифрової трансформації та цифровізації Держмитслужби передбачає:

– запровадження принципів кіберзахисту;
– впровадження безпаперових процедур;
– побудову надійних та сучасних ІТ-систем митниці.

Успішна реалізація визначених трансформацій забезпечить ІТ-систему української митниці необхідними інструментами для боротьби з корупцією та шахрайством.

Документ розроблено у контексті підготовки України до вступу до Європейського Союзу та виконання Угоди про Асоціацію в частині гармонізації митних процесів з європейськими стандартами. Особливу увагу приділено виконанню всіх вимог щодо майбутніх інтеграцій до систем ЄС.

Національний план цифровізації української митниці базується на Багаторічному стратегічному плані електронної митниці ЄС (Multi-annual strategic plan for electronic customs, MASP-C).

Основою ІТ-стратегії Держмитслужби, зокрема, визначено:

– сервісно-орієнтовну архітектуру;
– централізоване впровадження ЄАІС;
– гармонізований інтерфейс із ЄС і Єдине вікно для міжнародної торгівлі.

Окрему увагу в документі приділено запровадженню принципів кіберзахисту. Передусім йдеться про забезпечення:

– запису та відстеження історії запитів на внесення змін до даних;
– захисту від несанкціонованого доступу до інформації;
– неможливості зміни або втрати журналів роботи з даними;
– неможливості зміни інформації та документів, наданих користувачами з використанням кваліфікованого електронного підпису.

Серед пріоритетів ЄС нині є впровадження безпаперових процедур. У митній справі для цього реалізується Ініціатива електронної митниці (Electronic customs initiative). Для впровадження Е-Митниці розроблено Multi-annual strategic plan for electronic customs (MASP-C) – плановий документ, що охоплює всі митні проєкти, пов'язані з ІТ.

Держмитслужба передбачила поетапний підхід до впровадження електронної митниці:

– бізнес-аналіз, політика та правове оформлення;
– створення технічної специфікації системи;
– створення специфікацій для інтеграції із зовнішніми системами;
– розробка та впровадження системи.

У процесі ІТ-трансформації Держмитслужба використовуватиме управління бізнес-процесами та BPM-моделювання, що дозволить забезпечити цілісне уявлення про митні процеси та практичні наслідки їх впровадження відповідно до митного законодавства України та ЄС.

Почалося поетапне введення в експлуатацію системи CDS.UA, яка буде обробляти рішення митних органів. CDS.UA є аналогічною європейській системі прийняття митних рішень Customs Decision System, створеною Європейською комісією для реалізації спільних митних процесів на території країн-членів згідно з Митним кодексом Європейського союзу. Вона буде повторювати моделі даних та формати обміну даними, що використовуються в ЄС. Впровадження CDS.UA підвищить ефективність і швидкість митного контролю, зменшить пов'язані з цим адміністративні

та фінансові витрати суб'єктів господарювання у процесі зовнішньоекономічної діяльності.

CDS.UA буде інтегрована з наявними системами митниці, що забезпечить суб'єктам господарювання зручні інструменти для отримання рішень митних органів. Функціонал системи забезпечить оформлення у формі електронних документів наступних 10 типів рішень:

1) авторизації АЕО;
2) авторизації на застосування спрощень (зокрема транзитних спрощень);
3) реєстрації гаранта;
4) авторизації застосування процедури кінцевого використання товарів, а також дозволів на здійснення наступних видів діяльності;
5) митна брокерська діяльність;
6) відкриття і експлуатація магазину безмитної торгівлі;
7) відкриття і експлуатація митного складу та відкриття і експлуатація вільної митної зони комерційного або сервісного типу;
8) відкриття і експлуатація складу тимчасового зберігання;
9) відкриття і експлуатація вантажного митного комплексу.

Інформаційні та комунікаційні технології, інформаційні системи та інформаційні ресурси, що використовуються в діяльності митних органів, сприяють розвитку зовнішньо-економічної діяльності та подальшому підвищенню якості митного управління.

Їх комплексне застосування забезпечує автоматизацію процесів доходу до державного бюджету, застосування набору заходів для дотримання заборон та обмежень, здійснення контролю валюти, захисту прав на інтелектуальну власність, а також мінімізує витрати для учасників іноземної економічної активності, пов'язаних з митними операціями.

Вдосконалення інформації та технічної підтримки митних органів та інформаційної безпеки сприяє створенню екосистеми цифрової економіки України, в якій дані в цифровій формі є ключовим фактором у всіх сферах соціально-економічної діяльності, забезпечення їх ефективної взаємодії, включаючи бізнес, державу та пересічних громадян.

Основні зусилля щодо розробки та вдосконалення телекомунікаційної інфраструктури митних органів спрямовані на забезпечення надійності та безперервності обміну інформацією в митних органах як частини митних операцій та процедур.

Практична реалізація набору заходів була забезпечена для створення стійкої до несправностей інформаційно-телекомунікаційної та обчислювальної інфраструктури в рамках стійких до несправностей вузлів телекомунікацій для забезпечення безперебійного функціонування регіональних сегментів відомчої інтегрованої телекомунікаційної системи митної служби України та централізація комунікаційних послуг (KAN Close Dayments).

Найважливіший ефект спрощення митних операцій одержується від застогсування «єдиного вікна».

«Єдине вікно» визначається в рекомендації № 33 ООН як механізм, який дозволяє торговим операторам та транспортним компаніям надавати інформацію та документи щодо відповідності вимогам експорту або порту його один раз та одного агента.

«Єдине вікно» покращує інтеграцію між існуючими державними установами та зміцнює взаємозв'язок між ними. Одним із завдань запровадження механізму є зменшення строків випуску товарів та кількості поданих документів. Тому застосування механізму «єдиного вікна» дозволяє митниці контролювати послуги та проблеми за допомогою процедур митної декларації, встановлених митним кодом, який не включає запити на дозвіл від зовнішньо-економічної активності та супровідних документів, що підтверджують інформацію від самого учасника.

Україна стоїть перед серйозним викликом – для визнання її готовності до вступу до ЄС у митній складовій потрібна як правова та організаційна «синхронізація» з країнами Митного союзу, так і впровадження (і, звісно ж, розробка) цілої низки ІТ-систем, що відповідають вимогам Євросоюзу. Польща розв'язувала це глобальне завдання дещо раніше, тож її досвід може допомогти Україні уникнути критичних помилок.

Головні небезпеки, які можуть чекати на країну, яка створює і впроваджує нові митні ІТ-системи, з огляду на польський досвід:

1. Якщо покласти лідерську роль у створенні Е-Митниці на ІТ-підрозділ, наслідком може бути створення систем без належної участі власників процесів та необхідної координації між різними процесами/системами. Це може призвести до погано визначених вимог або навіть до відсутності функціональних вимог, визначених до початку процедури закупівлі, що призводить до затримок у впровадженні системи, відсутності інтеграції між окремими системами та, як наслі-

док, – ручної передачі даних, окремих точок авторизація та фрагментованого доступу. Тому лідерами розробки та впровадження ІТ-систем мають бути профільні департаменти, які відповідають за вимоги до систем за своїми напрямками, за управління процесами та за результат.

2. «Все робити власними силами». Поодинокі випадки власного розвитку ІТ на митниці були. Але це стосувалося лише менших систем, і то в минулому. Були проблеми з інтеграцією таких систем до решти ІТ-середовища та відсутність належної документації. Рішення базувалися на знаннях однієї або кількох осіб з адміністрації. Коли така людина йде з організації, виникає велика проблема з подальшим розвитком і підтриманням системи. Такі люди часто неохоче діляться знаннями, або ж не бажають це робити взагалі.

Серед загроз також – імовірне недотримання термінів створення та імплементації, можлива непрозорість при створенні систем та невідповідність їх необхідним стандартам. Тому найкраще правило: розробка, впровадження та підтримка системи зовнішнім підрядником. ІТ-відділ має іншу важливу роль – управління якістю, методологія, технічні стандарти, технічна підтримка.

3. Відсутність централізованого управління та нагляду за розробками ІТ. У результаті «ініціатив» може бути створено багато ІТ-рішень, розроблених власними силами для різних процесів, зокрема допоміжних (наприклад: HR, закупівлі, управління ресурсами тощо). Вони можуть за своїм призначенням дублювати розробки, заплановані на центральному рівні (наприклад, у межах проєктів технічної допомоги), можуть не відповідати всім необхідним вимогам або ж не інтегруватися з іншими системами. Такий шлях можна схарактеризувати словами «дорого і неефективно». Слід зауважити, що створення таких систем не є «безкоштовним», – держава оплачує робочий час фахівців, які це роблять.

Краще зосередитись на інтеграції та сумісності ІТ-систем, повторному використанні даних, стандартизації, єдиному джерелі основних даних, уніфікованій моделі даних (сховище даних), єдиній точці доступу та уніфікованій авторизації.

У Польщі було проведено цілеспрямовану інтеграцію, зокрема: створено 1 реєстр трейдерів (замість 4-х, які існували раніше), 1 довідкову службу та 1 кадрово-розрахункову систему (замість 16-ти), 1 центральну систему авторизації (замість кількох локальних рішень). Також було створено 1 систему аналізу ризиків (замість кількох модулів аналізу ризиків в окремих системах), 1 точку доступу та єдиний комунікаційний портал та 1 сховище даних.

4. Вважати, що ІТ-системи – справа профільних та ІТ-підрозділів, а не керівництва. Ефективне управління має вирішальне значення. Програма Е-Митниця – це не лише ІТ-системи, а також організаційна та правова трансформація Митниці.

Одне із завдань Е-Митниці – мінімізувати людський фактор, який є серед головних причин корупції. У цьому сенсі митні ІТ-системи – ключовий чинник для запобігання корупції на митниці. Але лише в тому випадку, якщо вони самі не є джерелом корупції.

За загальний результат роботи Митниці та її трансформації несе відповідальність її перша особа, тож саме голова Митної служби має очолювати Програму зі створення Е-Митниці. Важливо побудувати ефективну систему управління цією Програмою, на чолі якої стоятиме керівник Митної служби.

Необхідно визначити чіткі ролі для ефективного управління. Формула програми передбачає належне управління та нагляд за такою складною справою, як розробка та впровадження середовища Е-Митниці. Керівником програми має бути Голова Митної служби; він має очолювати Наглядову раду/Керівний комітет, до складу якого входять представники Міністерства фінансів, Митної служби та Ради з програм електронної митниці (створеної наказом Міністра фінансів). Також визначається Координатор програми; координаційна команда; менеджери проєктів; проєктні групи (базуються переважно в структурах центрів компетенції).

Для окремих центральних проектів (як, наприклад, NCTS), піраміда виглядає так (і це, до речі, було реалізовано в Україні при запуску NCTS, що дало позитивний результат): Наглядова рада (за участі керівництва Мінфіну та Держмитслужби), керівник проєкту від Митниці та Команда Проєкту – посадовці та експерти, які брали безпосередню участь у реалізації проєкту.

Висновки. Для ефективного управління Е-Митницею потрібно створити Наглядову раду з реалізації цієї Програми під головуванням Голови Митного органу. На нього слід покласти вирішальну роль в управлінні, а заступники Голови мають відповідати за певні частини Програми відповідно до своїх завдань у Митній службі.

Чітко визначити власників процесів: відповідні профільні підрозділи (департаменти) Держмитслужби. Вони відповідають за визначення

та контроль бізнес-вимог (на основі моделювання бізнес-процесів), визначення функціональних вимог до ІТ-систем і за результат – забезпечення відповідності розроблених електронних послуг очікуванням.

ІТ-структура відповідає за технічні стандарти, ІТ-архітектуру та інфраструктуру. Вона відіграє сервісну роль для профільних департаментів – власників процесів.

Аутсорсинг має бути основною моделлю розвитку ІТ, яка дозволяє залучати ресурси з досвідом у розробці відповідних ІТ-систем, гарантує кінцеву поставку, прозорість при закупівлях, відповідність систем стандартам.

Дотримання цілісності і взаємодії систем і даних визначеної ІТ-архітектури та управління даними, включно з уніфікованою моделлю даних з єдиним джерелом даних.

Список літератури:

1. Наказ Міністерства фінансів України від 09 лютого 2024 року № 63 «Про реалізацію рішення Комітету з управління інформаційними технологіями у системі управління державними фінансами».

2. Митне регулювання при перевезенні масових вантажів: навчальний посібник / А. М. Окороков, Г. І. Нестеренко, М. І. Музикін, П. В. Бех, Н. В. Гревенцова, О. В. Лашков, О. І. Павленко. – / Український державний університет науки і технологій. – Дніпро : Видавець Лізунов Є. В., 2023. – 254 с.: іл., табл., граф.

3. Bekh, P. Building models to optimize vehicle downtime in multimodal transportation / Razghonov, S., Lesnokova, I., Khalipova, N., Kuzmenko, A., Kuznetsov, V., Chernikov, D., Zvonarova, O., Prokhorchenko, H., Horulia, M., Bekh, P. / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2023, 3(3(123)), с. 68–76. doi: https:/ doi.org/10.15587/1729-4061.2023.283172.

4. Про зовнішньоекономічну діяльність: Закон України 16.04.1991 № 959-XII / Верховна Рада України. URL: https: zakon.rada.gov.ua/laws/show/959-12#Text (дата звернення: 26.03.2025).

5. Типовий закон ЮНСІТРАЛ про електронну торгівлю (1996 рік) з додатковою статтею 5 BIS, прийнятою у 1998 році. URL: https: uncitral.un.org/ru/texts/ecommerce/modellaw/electronic_commerce.

Okorokov A. M., Bekh P. V., Lashkov A. V. DIGITALIZATION OF CUSTOMS PROCEDURES IN TRANSPORT PROCESSES

The article discusses the key points in the implementation of information technology in the activity of customs authorities, since the specificity of the activities of participants in the European economy requires rapid making important decisions to ensure the quality and timely movement of goods. Automation of customs procedures and a rapid automatic result, which is used by a relatively large array of participants in foreign economic activity, provides an additional incentive for economic relations, business development, reducing the transport component when moving goods.

In this regard, the analysis of the strategy of development of the Customs Service of Ukraine, its participation in transport processes using information technologies was analyzed.

The mechanism that will contribute to the conditions of interstate trade will simplify customs formalities. The European Economic Commission presents a «single window» mechanism, which provides a single presentation of data using one channel with the possibility of performing customs formalities of export-import in cooperation with state bodies. The development of a single window mechanism in the territory of the European Union is one of the current and priority areas of cooperation, so that in fact, the use of a "single window" is an effective tool for simplifying the process of international trade, establishing stable transport flows, which will allow transport organizations and industrialists to minimize exports. Creating digital customs helps to reduce the time after completing customs procedures, obtaining permits, registration of relevant documents, as well as processing and storage of large arrays of information.

Over the last decades, digitalization has become an integral part of trade. It changed the structure of trade and contributed to the expansion and diversification of trade opportunities at internal, regional and international levels, creates conditions for faster supply and implementation of goods and services and facilitation of trade, facilitating market access and reducing related costs. Digital tools can also play an important role in accelerating progress in achieving sustainable development goals.

Thus, information and communication technologies, electronic certificates and electronic tracking of goods can contribute to more stable and reliable production processes.

Key words: *customs procedures, information resources, digital technologies, transport processes, information and communication technologies.*

УДК 656.6:616-036
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/39

Онищенко С. П.
Одеський національний морський університет

Берестенко В. В.
Асоціація міжнародних експедиторів України

ОПТИМІЗАЦІЯ СХЕМИ ТА СКЛАДУ ПЕРЕВІЗНИКІВ МУЛЬТИМОДАЛЬНОГО ПЕРЕВЕЗЕННЯ

Статтю призначено вирішенню завдання оптимізації схеми мультимодального перевезення та складу перевізників. Охарактеризовано, що мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора – організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення». Запропоновано прийняти за базу модель транспортної задачі у мережевій постановці з певною трансформацією обмежень та цільової функції з урахуванням особливостей мультимодального перевезення. Розроблено модель формування оптимальної схеми та складу перевізників мультимодального перевезення для локального його розгляду, тобто без врахуванням інших мультимодальних перевезень. Модель враховує альтернативність схем – проміжних портів перевалювання, видів транспорту та перевізників на кожній ділянці схеми (маршруту). Цільова функція моделі відповідає загальним витратам мультимодального оператора з урахуванням ризиків (штрафів та додаткових витрат). Обмеження враховують збереженість вантажу під часу перевезення; час перевезення з урахуванням більш ймовірного збільшення часу виконання перевезення за окремими ланками всього мультимодального перевезення. Надана модель є розвитком існуючих результатів шляхом врахування ризиків мультимодального оператора, збереженості вантажу, можливого збільшення часу та розгляду множини перевізників для автомобільного та водного транспорту, що у більш повному обсязі враховує сутність мультимодального перевезення та відповідальність мультимодального оператора. Виконано експериментальні дослідження, які обґрунтували можливість використання моделі для конкретних практичних ситуацій та достовірність отриманих результатів завдяки адекватному реагуванні результатів оптимізації на зміни вихідних даних.

Ключові слова: *контейнерні перевезення, мультимодальні перевезення, ефективність, оптимізація, перевізники, маршрут, схема перевезення, ризики, мультимодальний оператор, лінійні перевізники, моделювання транспортного процесу, система доставки, час доставки, вартість доставки.*

Постановка проблеми. Мультимодальні перевезення – це перевезення різними видами транспорту з використанням єдиного перевізного документу та єдиного організатора – мультимодального оператора. Закон України у 2021 р. надав мультимодальним перевезенням в Україні офіційного статусу. Мультимодальні перевезення мають численні переваги: вони дозволяють оптимізувати маршрути, знижувати витрати, підвищувати надійність та гнучкість логістичних операцій, сприяють ефективному використанню екологічно чистих видів транспорту та енергозберігаючих технологій, що призводить до зменшення впливу на довкілля. В якості недоліків мультимодальних перевезень можуть бути визначені: складність планування та координації, в окремих випадках високі початкові витрати, можливі юридичні та регуляторні проблеми, ризики пошкодження вантажів та високі операційні витрати [1, 2]. Мультимодальні перевезення є окремим сегментом контейнерних перевезень, маючи певну специфіку з точки зору організації та відповідальності мультимодального оператора – організатора та постачальника послуги «мультимодальне перевезення». Це, з одного боку, визначає додаткові ризики комерційного характеру, які пов'язані із залученням множини учасників процесу транспортування, з іншого боку, надає оператору широкі можливості інтегральної організації множини мультимодальних перевезень у межах єдиної системи, забезпечуючи синергетичний ефект [3].

Основна специфіка мультимодального перевезення, що впливає на її оптимізацію, полягає в тому, що всі ризики, що виникають у процесі її реалізації, належать мультимодальну оператору. Тому, з одного боку, мають бути виконані всі вимоги, з урахуванням області компромісу [4], вантажовласника. З іншого боку, відповідна сис-

тема транспортування має враховувати можливі ризики оператора [5].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Доставка вантажів є об'єктом багатьох досліджень, пов'язаними, як правило, або з оптимізацією фізичного переміщення вантажу (наприклад, [6]), або з оптимізацією складу постачальників, тобто тих компаній, які реалізовують конкретний варіант фізичного переміщення вантажу ([7–9]). Структурі і характеристикам різного виду доставок присвячені ряд сучасних публікацій, і тільки деякі з них слідують шляху інтегрального розгляду всіх аспектів доставки.

Дослідження [10–13] розглядають конкретні приклади мультимодальної доставки з точки зору фізичного переміщення вантажу і демонструють їх багатоваріантність, яка природним чином відбивається на основних характеристиках.

Цифровізація транспортної сфери призвела до зближення процесів організації транспортування та роботи з вантажовласниками з організацією роботи в інших сферах. Нова ідеологія транспортної сфери передбачає впровадження та використання як нових технологій фізичного переміщення вантажів, так й нових технологій організації транспортного обслуговування. Зокрема, у роботах [7, 8] були розглянуто питання щодо agile трансформації транспортно-експедиторських компаній, у тому числі, agile підхід до багатокритеріального вибору варіанта доставки партії вантажу та розроблена модель формування складу постачальників у роботі. В [3] надана схема циклів на базі agile, яка може сформувати ідеологічну основу для вирішення задачі організації системи доставок мультимодального оператора на базі agile.

Центральною задачею мультимодального оператора в процесах організації мультимодальних перевезень є формування схем (маршруту). Оптимізація схем і маршрутів перевезень є класичними завданнями для транспортної науки, розв'язання яких пов'язані з так званими моделями «транспортних задач» (одно- та багатоетапними), а також з моделями транспортних задач у мережній постановці. Зазначимо, що результатом оптимізації є схеми/маршрути перевезення та обсяги перевезень між пунктами.

За багаторічну історію використання даних моделей їх розвиток полягав насамперед у деталізації параметрів управління (змінних), врахуванні додаткових умов як обмежень, а також у використанні нових критеріїв оптимізації. Так, класичним критерієм для транспортних завдань є «сумарні витрати», проте, у деяких ситуаціях кращим критерієм є «час» [9]. Розвиток принципів логістики зумовив введення в подібні моделі в якості критеріїв або обмежень такі показники як «якість», «надійність», «ризик» [1–3]. Остання характеристика пов'язана з імовірнісною природою транспортних процесів [2, 14, 15], що проявляється, перш за все, у можливих відхиленнях часу доставки.

Слід зазначити існуючи результати досліджень [14, 15], які призначені для формування схем мультимодальних перевезень для залізничного транспорту. Центральним результатом даних робіт є економіко-математична модель багатоетапної та багатокритеріальної задачі, яка враховує у цільовій функції ймовірнісну природу перевезень. Даний підхід повністю відповідає специфіці мультимодальних залізничних перевезень. Проте слід зазначити відсутність аналогічних результатів для мультимодальних перевезень, які враховують специфіку наявності морської складової водночас із врахуванням організаційної специфіки для мультимодального оператора. Тому дане дослідження присвячено саме цієї проблемі.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення ефективності процесу організації мультимодального перевезення шляхом розробки моделі з оптимізації схеми та складу перевізників мультимодального перевезення. Основні завдання дослідження: 1) розробка моделі з оптимізації схеми та складу перевізників мультимодального перевезення; 2) експериментальна перевірка розробленої моделі.

Виклад основного матеріалу. Модель задачі визначення оптимальних схеми та складу перевізників мультимодального перевезення. При розгляді окремого мультимодального перевезення пропонується використовувати модель транспортної задачі у мережевій постановці, трансформуючи обмеження та цільову функцію з урахуванням «мультимодальної» специфіки. Отже, нехай розглядається транспортна мережа, що складається з n вузлів $A_i, i=\overline{1,n}$ та відповідних транспортних «комунікацій» $A_{ij}^k, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}$, k = 1, 2, 3, які відображають наявність певних транспортних зв'язків між вузлами мережі A_i, A_j, k – відповідає виду транспорту: k = 1 – автомобільний транспорт, $k = 2$ – залізничний транспорт, k = 3 – водний транспорт (морський, річковий). Зазначимо, що в рамках даної задачі не розглядається авіаційний транспорт, з урахуванням того, що мова йде про мультимодальні перевезення з морською складовою та про перевезення вантажів у морських контейнерах, тому авіаційний вид

транспорту не використовується як альтернатива в даному випадку.

Дана транспортна мережа характеризується відповідною матрицею A^k, k = 1, 2, 3 для кожного виду транспорту, елементи даної матриці $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3$ або 0 або 1 з урахуванням наявності чи відсутності транспортного зв'язку. Кожна транспортна комунікація певного виду транспорту також характеризується альтернативністю чи її відсутністю. Якщо для k = 2 (залізничного перевезення) немає альтернативності з точки зору перевізника, з урахуванням наявності тільки одного вітчизняного перевізника – Укрзалізниці, то для інших видів транспорту альтернативність існує. Наприклад, морське перевезення між певною парою портів може здійснюватися різними лінійними перевізниками з різними відповідними характеристиками – транзитним часом, вартістю, надійністю розкладу, кількістю відправлень, інтервалом часу між відправленнями. Що стосується автомобільного транспорту – альтернативність ще вище, крім того, багато мультимодальних операторів мають власний автопарк. Тому $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = 1, 2, 3 слід доповнити з урахуванням альтернативності перевізників:

$$A_{ij}^{kl_k} = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3, l^k \in \Omega_{ij}^k, \quad (1)$$

де Ω_{ij}^k – множина перевізників виду транспорту k на комунікації A_{ij}^k, l^k – порядковий номер перевізника для певного виду транспорту на даній комунікації. Отже, якщо $A_{ij}^k = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, $k = 1$, 2, 3 – це транспортні комунікації з точки зору виду транспорту, то $A_{ij}^{kl^k} = \{0;1\}, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = 1, 2, 3, $l^k \in \Omega_{ij}^k$ – це транспортні комунікації з точки зору перевізників певного виду транспорту (рис. 1).

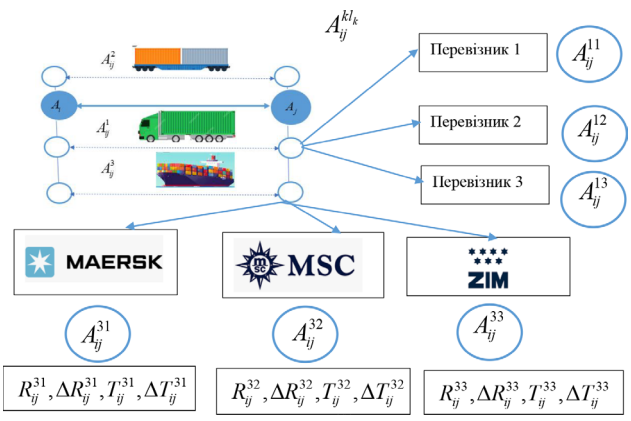


Рис. 1. Альтернативність варіантів перевезення

Кожний перевізник $l^k \in \Omega_{ij}^k, i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}$, k = = 1, 2, 3 характеризується наступним набором параметрів:

$$\left\langle R_{ij}^{kl^k}, \Delta R_{ij}^{kl^k}, T_{ij}^{kl^k}, \Delta T_{ij}^{kl^k} \right\rangle l^k \in \Omega_{ij}^k, \quad i = \overline{1,n}, j = \overline{1,n}, k = 1,2,3, \quad (2)$$

де $R_{ij}^{kl^k}, \Delta R_{ij}^{kl^k}, T_{ij}^{kl^k}, \Delta T_{ij}^{kl^k}$, відповідно, вартість, можливий ризик збільшення вартості (витрат), у тому числі, штрафні санкції за порушення умов мультимодального перевезення (часу, збереження, тощо); час перевезення, можливе збільшення часу перевезення.

Введемо позначення:

$x_{ij}^{kl^k} = \{0;1\}$ – параметр управління, сутність якого – вибір певного перевізника l^k певного виду транспорту k для здійснення перевезення по комунікації ij, вибору певного перевізника відповідає значення $x_{ij}^{kl^k} = 1$. Слід зазначити, що вибір перевізників для морської складової здійснюється не з множини усіх перевізників, які діють на даному напрямку перевезень (комунікації), а з множини $\Omega'^k_{ij} \subset \Omega_{ij}^k$ тих, чий розклад відповідає вимогам щодо часу відправлення.

Цільова функція відповідає критерію оптимальності – загальні витрати мультимодального оператора з урахуванням можливих ризиків:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} (R_{ij}^{kl^k} + \Delta R_{ij}^{kl^k}) \cdot x_{ij}^{kl^k} \to \min. \quad (3)$$

Даний вираз враховує весь шлях проходження вантажу з урахуванням усіх видів транспорту та перевізників. З урахуванням необхідності дотримання термінів перевезення, наступне обмеження враховує загальний час мультимодального перевезення:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} (T_{ij}^{kl^k} + \Delta T_{ij}^{kl^k}) \cdot x_{ij}^{kl^k} \le T^*, \quad (4)$$

де T^* – максимальний термін мультимодального перевезення, який визначено вантажовідправником. Далі розглядаються дві групи обмежень, які забезпечують формування схеми, в якій, як це необхідно, ділянки йдуть послідовно. Перша група обмежень моделі враховує необхідність «виходу» вантажу з кожного проміжного пункту – вузлів транспортної мережі:

$$\sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} x_{ij}^{kl^k} = \sum_{j=1}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k \in \Omega'^k_{ij}} x_{ji}^{kl^k}, i = \overline{2,n-1}. \quad (5)$$

Слід зазначити, що дана модель орієнтована на мережу будь-якого вигляду з точки зору транспортних зв'язків, тому вирази обмежень враховують будь-який «обхід» транспортних вузлів з першого по останній.

Друга група обмежень відображає специфіку першого та останнього пунктів, тобто вантаж обов'язково має вийти з першого пункту та війти у останній:

$$\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}} x_{1j}^{kl^k}=1, \qquad (6)$$

$$\sum_{j=1}^{n-1}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}} x_{jn}^{kl}=1. \qquad (7)$$

Модель може бути доповнена також врахуванням збереження вантажу I, як ще одного показника надійності:

$$\min\{I_{ij}^{kl^k}\cdot x_{ij}^{kl^k}>0\,|\,i=\overline{1,n-1},\ j=\overline{2,n},\ k=1,2,3,l^k\in\Omega'^k_{ij}\}\geq I^*, \qquad (8)$$

де $0\leq I_{ij}^{kl^k}\leq 1, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}, k=1,2,3, l^k\in\Omega'^k_{ij}$ – ймовірність збереженні вантажу при перевезенні певною компанією певного виду транспорту на конкретній комунікації.

Множина можливих значень змінних (параметрів управління)

$$x_{ij}^{kl^k}=\{0;1\}, i=\overline{1,n-1}, j=\overline{2,n}, k=1,2,3, l^k\in\Omega'^k_{ij} \qquad (9)$$

завершує формування моделі.

Слід зазначити, що пропонована модель є розвитком існуючої моделі [6], розвиток якої формується шляхом врахування ризиків мультимодального оператора, збереженості вантажу, можливого збільшення часу та розгляду множини перевізників для автомобільного та водного транспорту, що у більш повному обсязі враховує сутність мультимодального перевезення, наближаючи теоретичний результат до практичної корисності.

Експериментальна перевірка моделі. Експериментальні розрахунки проведено для наступного прикладу (рис. 2). Розглядається мережа комунікацій від першого пункту (відправлення вантажу) до п'ятого пункту (призначення). Отже, і відповідності до пропонованої моделі у загальному вигляді, для даного прикладу маємо наступний вигляд моделі (перевезення здійснюється з пункту 1 до пункту 5).

Вихідні дані (умовні) щодо характеристик перевезення альтернативних перевізників за різними видами транспорту наведено у табл. 1. В якості базового варіанту обмеження за часом було прийнято 28 діб. Для базового варіанту обмеження за часом $T^*=28$ діб оптимальна схема та перевізники на рис. 3, 4, для варіанту $T^*=25$ діб на рис. 5.

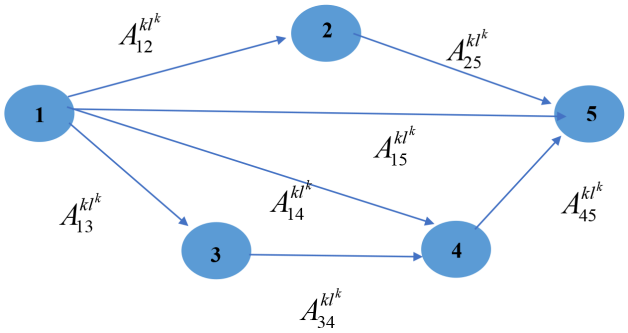


Рис. 2. Схема транспортних комунікацій для розрахункового прикладу

Зміна критерію оптимальності. Слід зазначити, що дану модель можна використовувати із зміною критерію оптимальності, а саме, як критерій розглядати «час перевезення» з урахуванням можливого збільшення, якщо цей критерій є більш переважним (наприклад, мова йде про термінове перевезення).У такому випадку критерій оптимальності (цільова функція моделі):

$$\sum_{i=1}^{4}\sum_{j=2}^{5}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l\in\Omega'^k_{ij}}(T_{ij}^{kl}+\Delta T_{ij}^{kl})\cdot x_{ij}^{kl}\to\min, \qquad (10)$$

витрати на мультимодальне перевезення слід обмежувати R^*, якщо це необхідно:

$$\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=2}^{n}\sum_{k=1}^{3}\sum_{l^k\in\Omega'^k_{ij}}(R_{ij}^{kl^k}+\Delta R_{ij}^{kl^k})\cdot x_{ij}^{kl^k}\geq R^*. \qquad (11)$$

Для прикладу, що розглядається, введемо обмеження для вартості перевезення $R^*=5000$ г.о./TEU та використовуємо в якості критерію оптимальності час транспортування (рис. 6).

Таким чином, в результаті експериментальних досліджень пропонованої моделі встановлено, що зміна вихідних даних логічно та адекватно впливає на результат оптимізації, що обґрунтовує достовірність пропонованої моделі. Крім того, можливість зміни критерію оптимальності надає більш широкі можливості для пошуку кращих з точки зору вимог вантажовідправника варіантів.

Висновки. Запропоновано модель формування оптимальної схеми та складу перевізників мультимодального перевезення для локального його розгляду, тобто без врахуванням інших мультимодальних перевезень. Модель враховує альтернативність схем (проміжних портів перевалювання), видів транспорту та перевізників на кожній ділянці схеми (маршруту). Цільова функція моделі відповідає загальним витратам мультимодального опе-

Таблиця 1

Характеристики перевезення для альтернативних перевізників за різними видами транспорту

Комунікація	Вид транспорту	Компанії-перевізники	$R_{ij}^{kl^k}$, г.о.	$\Delta R_{ij}^{kl^k}$, г.о.	$T_{ij}^{kl^k}$, діб	$\Delta T_{ij}^{kl^k}$, діб
A_{12}	$k=1$	$l^1=1$	1000	100	5	1
		$l^1=2$	1200	100	5	1
	$k=2$	$l^2=1$	950	80	8	1
A_{13}	$k=1$	$l^1=1$	1400	100	5	1
		$l^1=2$	1500	150	5	1
	$k=2$	$l^2=1$	1200	100	8	1
A_{14}	$k=3$	$l^3=1$	5400	200	20	1
		$l^3=2$	5200	120	22	1
		$l^3=3$	5600	100	24	1
		$l^3=4$	6100	80	20	1
A_{15}	$k=3$	$l^3=1$	3500	30	18	1
		$l^3=2$	3400	50	17	1
		$l^3=3$	4000	30	16	1
		$l^3=4$	3700	50	17	1
A_{25}	$k=3$	$l^3=1$	2300	30	18	1
		$l^3=2$	2500	40	16	1
		$l^3=3$	2400	30	16	1
A_{45}	$k=3$	$l^3=1$	2400	50	17	1
		$l^3=2$	2500	180	20	1
A_{34}	$k=3$	$l^3=1$	1800	100	10	1
		$l^3=2$	2000	80	11	1
		$l^3=3$	1900	40	8	1
		$l^3=4$	1750	100	9	1

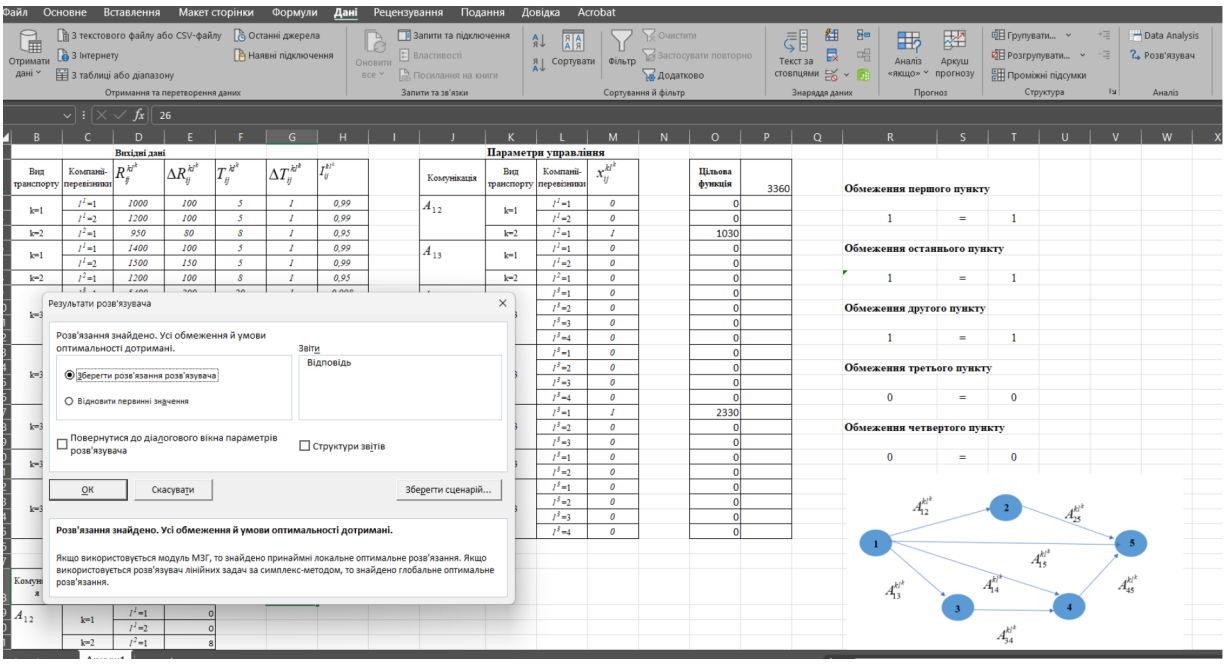
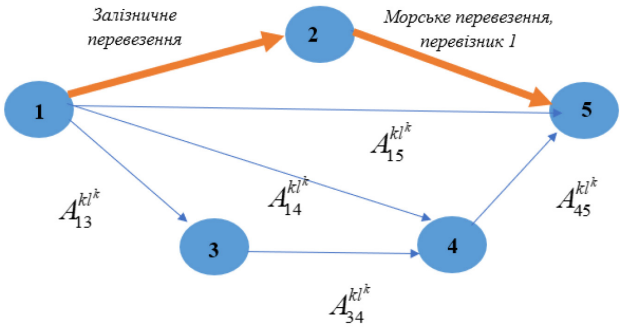


Рис. 3. Результати оптимізації для базового варіанту обмеження за часом

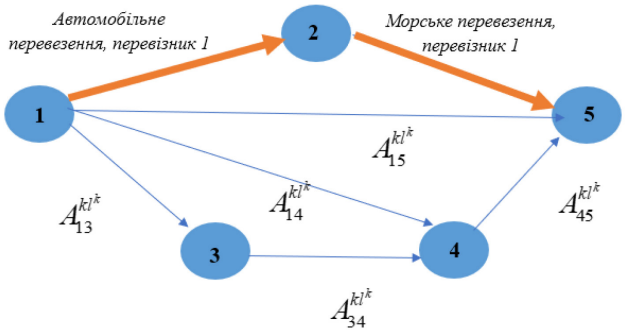
ратора з урахуванням ризиків (штрафів та додаткових витрат), обмеження враховують збереженість, час перевезення з урахуванням більш ймовірного можливого збільшення часу виконання перевезення за окремими ланками всього мультимодального перевезення. Експериментальні дослідження обґрунтували можливість використання моделі для конкретних практичних ситуацій та достовірність отриманих результатів завдяки адекватної «відповіді» результатів оптимізації зміні вихідних даних.



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 3360 г.о./TEU

Час перевезення – 26 діб

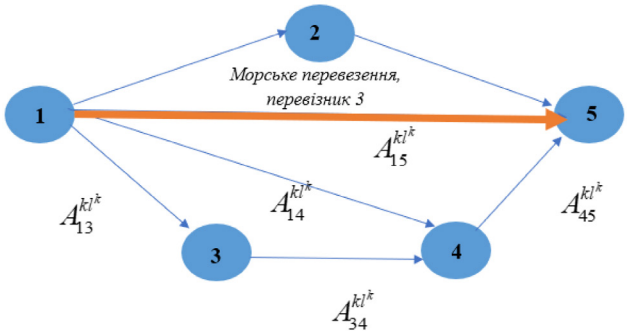
Рис. 4. Оптимальна схема та склад перевізників для базового варіанту обмеження за часом $T^* = 28$ діб



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 3430 г.о. /TEU

Час перевезення – 23 діб

Рис. 5. Оптимальна схема та склад перевізників для базового варіанту обмеження за часом $T^* = 25$ діб



Загальні витрати з урахуванням можливих ризиків – 4030 г.о. /TEU

Час перевезення – 16 діб

Рис. 6. Оптимальна схема та склад перевізників для варіанту обмеження за часом $T^* = 17$ діб при зміні критерію на час перевезення

Список літератури:

1. Берестенко В., Онищенко С. Структура та характеристики мультимодальної доставки з позиції цифровізації. *Розвиток транспорту*. 2021. 4(11). С. 82–93. DOI: 10.33082/td.2021.4-11.08

2. Бондаренко Ю. А., Онищенко С. П. Структура та невизначеність контейнеропотоків у системі морських перевезень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського, Серія: Технічні науки*. 2024. Том 35(74). № 1. С. 139–146. DOI: 10.32782/2663-5941/2024.1.2/23

3. Берестенко В., Онищенко С. Ймовірнісні характеристики мультимодальної доставки. *Розвиток транспорту*. 2021. Vol. 1(12). P. 118–128 DOI: 10.33082/td.2022.1-12.10

4. Berestenko V., Onyshchenko S. Defining compromise area in the processes of multimodal delivery organization within the agile approach. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2024. 1(3(127). С. 78–86. DOI: 10.15587/1729-4061.2024.298846

5. Машканцева С. О. Методичні аспекти оптимізації витрат в системі мультимодальних перевезень. *Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства. Економічні науки*. 2019. Вип. 206. С. 305–318.

6. Rusanova S., Onyshchenko S. Development of transport and technological process options' concept for goods delivery with participation of maritime transport. *Technology audit and production reserves*. 2020. Т. 1. (2(51)). P.24–29. DOI: 10.15587/2312-8372.2020.198373

7. Pavlova N., Onyshchenko, S. Development and Research of a Model for Optimizing the Composition of a Project–Oriented Forwarding Company'Suppliers. *Technology audit and production reserves*. 2021. 1(2). С. 57–64. DOI: 10.15587/2706–5448.2021.225521

8. Pavlova N., Onyshchenko S., Obronova A., Chebanova T., Andriievska V. Creating the Agile Model to Manage the Activities of Project Oriented Transport Companies. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 1(3(109). P. 51–59. 109. DOI: 10.15587/1729-4061.2021.225529

9. Онищенко С. П., Коскіна Ю. О. Сутність, специфіка і формування систем доставки вантажів. *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. 2019. (3), С. 86–95. DOI: 10.31649/1997-9266-2019-144-3-86-95

10. Chen Dandan, Yong Zhang, Liangpeng Gao, Russell G. Thompson Optimizing Multimodal Transportation Routes Considering Container Use. *Sustainability. 2019*. 11, 19: 5320. DOI: 10.3390/su11195320

11. Rong Cheng, Yu Jiang, Otto, Anker Nielsen. Integrated people-and-goods transportation systems: from a literature review to a general framework for future research. *Transport Reviews*. 2023. 43:5. P. 997–1020. DOI: 10.1080/01441647.2023.2189322

12. Ruina Yang, Mingzhu Yu, Chung-Yee Lee, Yuquan D. Contracting in ocean transportation with empty container repositioning under asymmetric information. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2021. Volume 145. Article 102173. DOI: 10.1016/j.tre.2020.102173

13. Farahani A., Genga L., Dijkman. Online Multimodal Transportation Planning using Deep Reinforcement Learning. *2021 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC)*, Melbourne, Australia, 2021. P. 1691–1698. DOI: 10.1109/SMC52423.2021.9658943

14. Ломотько Д. В., Примаченко Г. О. Формалізація технології роботи мультимодальних транспортних систем. *Міжнародна транспортна інфраструктура, індустріальні центри та корпоративна логістика.* 2023. С. 456–458. URL: http://lib.kart.edu.ua/bitstream/123456789/17955/1/Ломотько.pdf (дата звернення 25.03.2025)

15. Ломотько Д. В., Примаченко, Г. О. Формалізація вантажних мультимодальних залізничних перевезень як багатоетапної та багатоцільової транспортної задачі. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2023. (203). С. 105–116. DOI: 10.18664/1994-7852.203.2023.277920

Onyshchenko S. P., Berestenko V. V. OPTIMIZATION OF MULTIMODAL TRANSPORTATION SCHEME AND CARRIERS COMPOSITION

The article is intended to solve the problem of optimizing the multimodal transportation scheme and the composition of carriers. It is characterized that multimodal transportation is a separate segment of container transportation, having certain specifics from the point of view of organization and responsibility of the multimodal operator – the organizer and provider of the «multimodal transportation» service. It is proposed to take as a basis a model of the transport problem in a network formulation with a certain transformation of the constraints and the objective function taking into account the features of multimodal transportation. A model of forming the optimal scheme and composition of carriers of multimodal transportation for its local consideration, that is, without taking into account other multimodal transportation, has been developed. The model takes into account the alternativity of schemes – intermediate ports of transfer, modes of transport and carriers on each section of the scheme (route). The objective function of the model corresponds to the total costs of the multimodal operator taking into account risks (fines and additional costs). The constraints take into account the safety of the cargo during transportation; transportation time taking into account the more likely increase in transportation time for individual links of the entire multimodal transportation. The provided model is a development of existing results by taking into account the risks of the multimodal operator, cargo safety, possible increase in time and consideration of a plurality of carriers for road and water transport, which more fully takes into account the essence of multimodal transportation and the responsibility of the multimodal operator. Experimental studies have been carried out, which substantiated the possibility of using the model for specific practical situations and the reliability of the results obtained due to the adequate response of the optimization results to changes in the initial data.

Key words: *container transportation, multimodal transportation, efficiency, optimization, carriers, route, transportation scheme, risks, multimodal operator, line carriers, transportation process modeling, delivery system, delivery time, delivery cost.*

УДК 656:62:502
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/40

Павлова І. О.
Луцький національний технічний університет

Куць Н. Г.
Луцький національний технічний університет

Дубицький О. С.
Луцький національний технічний університет

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ІНЖЕНЕРНИХ ІННОВАЦІЙ НА СТАЛИЙ РОЗВИТОК ТРАНСПОРТНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ

У статті досліджено вплив інженерних інновацій на розвиток міської транспортної інфраструктури, визначено їхню роль у підвищенні ефективності, безпеки та оптимізації транспортних мереж. Виявлено, що впровадження сучасних технологічних рішень, зокрема цифрових платформ управління трафіком, інтелектуальних транспортних систем та автоматизованих диспетчерських центрів, сприяє зменшенню заторів, покращенню мобільності та підвищенню якості транспортного обслуговування. Метою статті є аналіз впливу інженерних інновацій на ефективність міської транспортної інфраструктури, визначення основних технологічних тенденцій, що сприяють оптимізації маршрутної мережі, автоматизації управління перевезеннями та інтеграції цифрових інструментів у транспортну логістику. Для досягнення цієї мети застосовано методи системного аналізу, порівняльного підходу, моделювання та структурного аналізу. Встановлено, що основними проблемами впровадження інновацій є технологічні обмеження, зокрема недостатній рівень цифровізації транспортних мереж та інтеграції розумних транспортних систем, а також нормативні труднощі, пов'язані з відсутністю єдиних стандартів управління міськими перевезеннями. Розроблено концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій, що враховує технологічні та інфраструктурні аспекти, забезпечуючи комплексний підхід до модернізації міського транспорту. Доведено, що використання інтелектуальних транспортних систем, адаптивного регулювання світлофорного руху, автоматизованих систем паркування та прогнозних алгоритмів для управління громадським транспортом сприяє зменшенню заторів, оптимізації перевезень та підвищенню ефективності міських маршрутів. Обґрунтовано необхідність удосконалення нормативної бази, що регулює інтеграцію цифрових транспортних платформ та автоматизованого управління міською логістикою. Перспективними напрямами подальших досліджень є розробка удосконалених методів оцінювання ефективності інженерних інновацій у міській транспортній інфраструктурі та створення стандартів для уніфікованого впровадження цифрових транспортних систем.

Ключові слова: *цифровізація транспорту, інтелектуальні технології, адаптивні системи, екологічні рішення, дорожня безпека, енергоефективність, автоматизація управління.*

Постановка проблеми. Розвиток транспортної інфраструктури є важливим фактором економічного зростання, забезпечення мобільності населення та підвищення конкурентоспроможності регіонів. В умовах урбанізації, інтенсивного розвитку вантажних і пасажирських перевезень та посилюваних вимог до екологічної безпеки сучасні транспортні системи потребують упровадження інноваційних інженерних рішень, спрямованих на підвищення їхньої ефективності, екологічної стійкості та технологічної адаптивності. Важливість цього процесу зумовлена необхідністю підвищення ефективності управління транспортними потоками, оптимізації витрат на будівництво та експлуатацію об'єктів інфраструктури, а також забезпечення тривалого використання й безпеки транспортних мереж.

Сучасні наукові дослідження спрямовані на розробку новітніх матеріалів, удосконалення методів прогнозування навантажень та зношення дорожнього покриття, упровадження цифрових технологій для управління транспортними системами, використання штучного інтелекту для оптимізації логістичних процесів та моніторингу стану інфраструктури. Застосування автоматизованих систем аналізу трафіку, адаптивного освітлення, «розумних» мостів та інших інженерних рішень сприяє зниженню експлуатаційних витрат,

підвищенню рівня безпеки та екологічної стійкості міських і міжміських перевезень.

Практичні завдання у цій сфері передбачають розроблення комплексних стратегій модернізації інфраструктури з урахуванням технологічних змін, аналіз економічної доцільності використання інноваційних рішень, а також упровадження механізмів державного та приватного фінансування проєктів транспортної інженерії. Підвищення ефективності транспортної мережі та її адаптація до сучасних викликів вимагають системного підходу, що об'єднує інженерні, економічні та екологічні аспекти сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових досліджень, присвячених впливу інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, стосується переважно чотирьох основних напрямів, кожен з яких висвітлює основні результати та перспективи подальших досліджень.

Перший блок наукових праць стосується впровадження інноваційних рішень у транспортну інфраструктуру. В. Ху (W. Hu) та співавтори [1] встановили, що використання сучасних будівельних матеріалів сприяє зниженню екологічного навантаження та збільшує термін експлуатації дорожнього покриття. Ефективність впровадження інтелектуальних транспортних систем у міське середовище, що дозволяє суттєво знизити рівень заторів та оптимізувати транспортні потоки, підтвердив С. Нараянасвамі (S. Narayanaswami) [2]. Учені Е. Броневич та К. Огроднік (E. Broniewicz та K. Ogrodnik) [3] довели доцільність застосування багатокритеріального аналізу для оцінювання ефективності транспортних проєктів, що забезпечує збалансований розвиток інфраструктури. Перспективним є розширення аналізу адаптивності інноваційних рішень у транспортній інфраструктурі, а також розроблення інтегрованих моделей міської інфраструктури, що враховують екологічні та соціальні чинники, сприяючи підвищенню мобільності, безпеки та стійкості транспортних систем.

Другий блок досліджень охоплює питання цифровізації та модернізації транспортних мереж. Х. Ду (H. Du) та співавтори [4] здійснили комплексний бібліометричний аналіз розвитку міської інфраструктури за 25 років і спрогнозували подальшу інтеграцію технологій штучного інтелекту та автоматизованого управління. К. Й. Шах (K. J. Shah) та співавтори [5] ідентифікували основні перешкоди для впровадження екологічного транспорту та запропонували технологічні стратегії для їх подолання. Ф. Лосурдо (F. Losurdo) та співавтори [6] довели, що цифрові системи моніторингу підвищують рівень безпеки дорожнього руху та сприяють зменшенню аварійності. У подальших дослідженнях у цьому напрямі важливо приділити увагу оцінці ефективності цифрових інновацій у транспортному секторі, аналізу їхнього впливу на мобільність і безпеку, а також дослідженню процесу інтеграції «розумного» транспорту в національні транспортні стратегії.

Третій блок присвячений упровадженню інтелектуальних систем у транспортну інфраструктуру. Науковці А. Л. С. Баззан і Ф. Клюґл (A. L. C. Bazzan, F. Klügl) [7] з'ясували, що використання штучного інтелекту в управлінні дорожнім рухом дозволяє скоротити середній час поїздки на 15–20 %. Автори Т. Собрал, Т. Галвão та Дж. Боржес (T. Sobral, T. Galvão, J. Borges) [8] підтвердили ефективність візуалізаційних методів аналізу мобільності, що сприяє точнішому прогнозуванню та оптимізації маршрутів. К. К. Тох (C. K. Toh) та співавтори [9] довели, що розумні дорожні системи на основі великих даних та IoT сприяють зниженню рівня забруднення повітря та підвищенню пропускної здатності транспортних мереж. Подальший аналіз може бути спрямований на оцінювання довгострокового впливу інтелектуальних транспортних систем на соціально-економічні показники та розробку механізмів регулювання персональних даних у транспортних мережах.

Четвертий блок наукових розвідок фокусується на життєвому циклі інфраструктури та екологічній політиці. Ф. Ванг (F. Wang) та співавтори [10] встановили, що застосування енергоощадних матеріалів у дорожньому будівництві дозволяє знизити витрати енергії на 30 % порівняно зі стандартними технологіями. М. А. Ахад (M. A. Ahad) та колеги [11] довели, що використання концепції «розумного міста» сприяє скороченню енергоспоживання на 25 % та ефективнішому використанню міської інфраструктури. С. Такер (S. Thacker) та колектив науковців [12] наголосили на важливості синергії державного й приватного фінансування для забезпечення сталого розвитку транспортної інфраструктури. Доповнює цей блок дослідження О. О. Коростіна [13], який стверджує, що застосування технологій штучного інтелекту для автоматизації перевезень дозволяє знизити адміністративні витрати, покращити точність обробки документації та підвищити рівень безпеки логістичних операцій. У подальших дослідженнях необхідно зосередитися на економічній доціль-

ності впровадження енергоощадних та цифрових інновацій у транспортну інфраструктуру на локальному та національному рівнях, а також розробленні міжнародних стандартів цифрової взаємодії у сфері транспортних перевезень.

Загалом, аналіз досліджень підтверджує, що інженерні інновації сприяють підвищенню ефективності транспортної інфраструктури, зменшенню експлуатаційних витрат, зниженню рівня забруднення та підвищенню безпеки дорожнього руху. Попри активне впровадження інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, їхній вплив на сталий розвиток досліджено фрагментарно, без комплексного оцінювання довгострокової ефективності та екологічної стійкості. Сучасні технологічні рішення розглядаються переважно ізольовано, без аналізу їхньої взаємодії в єдиній системі. Відсутність цілісної моделі інтеграції інженерних інновацій ускладнює їхню практичну реалізацію, а технологічні, економічні та нормативні обмеження залишаються недостатньо вивченими.

Запропоноване дослідження сприяє формуванню цілісного підходу до інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, враховуючи їхній вплив на ефективність, безпеку та екологічну стійкість. Розроблена концептуальна модель інтеграції технологічних рішень дозволяє оцінити їхню взаємодію в єдиній транспортній системі та сприяти підвищенню її адаптивності до майбутніх викликів.

Постановка завдання. Метою статті є аналіз впливу інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, визначення основних технологічних тенденцій, що сприяють підвищенню ефективності, безпеки та екологічності транспортних мереж, а також обґрунтування перспективних напрямів їх подальшого впровадження.

Завдання статті:

1. Дослідити вплив інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури, визначивши їхню роль у підвищенні ефективності, безпеки та екологічної стійкості транспортних мереж, а також проаналізувати сучасні технологічні рішення, зокрема цифрові системи управління, інтелектуальні транспортні технології та інноваційні будівельні матеріали.

2. Розробити концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру, враховуючи технологічні та екологічні аспекти, а також визначити нормативні та технічні бар'єри, що впливають на їхнє впровадження.

3. Сформулювати рекомендації щодо вдосконалення транспортної інфраструктури, визначивши оптимальні підходи до реалізації сучасних інженерних рішень, подолання бар'єрів їхнього застосування та створення сприятливих умов для їхньої інтеграції.

Виклад основного матеріалу. Міська транспортна інфраструктура є комплексною системою, що забезпечує мобільність населення, ефективність перевезень та стале функціонування міських транспортних мереж. До її основних складових належать транспортні вузли, дорожня мережа, громадський транспорт, паркувальні зони, навігаційні та інформаційні системи, а також автоматизовані диспетчерські центри, що регулюють рух транспорту. Ефективність інфраструктури залежить від рівня інтеграції цифрових технологій, здатності адаптуватися до збільшуваного транспортного навантаження та можливості забезпечення безперебійного функціонування міських перевезень.

Сталий розвиток транспортної інфраструктури ґрунтується на принципах ефективності, інтелектуального управління міським трафіком та соціальної доступності, що уможливлюється завдяки впровадженню інженерних інновацій. Зростання рівня урбанізації, підвищення навантаження на транспортні вузли та необхідність модернізації маршрутної мережі потребують оптимізації логістики міського транспорту, розширення мережі паркувальних зон та впровадження адаптивних транспортних рішень. Інноваційні інженерні рішення сприяють підвищенню оперативності реагування на транспортні потоки, зниженню аварійності, розширенню автоматизованих систем регулювання руху.

Розвиток розумних технологій керування транспортними мережами дозволяє адаптувати інфраструктуру до реальних умов експлуатації та оптимізувати логістичні потоки, що є важливим фактором її стабільного функціонування (табл. 1).

У сучасних умовах вплив інженерних інновацій на сталий розвиток міської транспортної інфраструктури проявляється в комплексному підході до модернізації транспортних вузлів, розширення адаптивних маршрутів громадського транспорту та цифровізації систем управління перевезеннями. Оптимізація маршрутної мережі та інтеграція інтелектуальних диспетчерських центрів дозволяє скоротити середній час у дорозі на 20–30 %, що, відповідно, знижує навантаження на транспортні вузли та сприяє ефективному перерозподілу трафіку [7, с. 92].

Таблиця 1

Вплив інженерних інновацій на сталий розвиток транспортної інфраструктури

Аспект впливу інженерних інновацій	Характер впливу	Основні зміни в сучасних умовах
Економічна ефективність	Скорочення витрат на обслуговування, оптимізація ресурсів, зниження експлуатаційних витрат громадського транспорту	Розширення системи автоматизованих диспетчерських центрів, використання прогнозних алгоритмів для регулювання міських перевезень
Інтелектуальне управління трафіком	Оптимізація трафіку, зменшення кількості заторів, покращення мобільності населення	Адаптивне керування світлофорами, системи прогнозування завантаженості маршрутів, автоматизовані платформи координації громадського транспорту
Транспортна доступність	Підвищення якості маршрутної мережі, зменшення часу очікування громадського транспорту	Інтелектуальні транспортні системи, інтеграція транспортних вузлів, цифрова оптимізація перевезень
Довговічність інфраструктури	Скорочення витрат на модернізацію, оптимізація управління міським трафіком	Використання сенсорних технологій для моніторингу транспортних потоків, інтеграція автоматизованих диспетчерських систем

Джерело: сформовано авторами на основі [1, с. 372; 2, с. 160; 4, с. 729; 9; 11]

Важливим напрямом є інтеграція безконтактних систем оплати проїзду, цифрових навігаційних платформ та автоматизованих зупинок громадського транспорту, що дозволяє підвищити комфорт пасажирів та скоротити час очікування на маршрутах.

Сучасна транспортна інфраструктура розвивається через упровадження інноваційних технологій, що підвищують її ефективність, безпеку та екологічну стійкість. Інтелектуальні транспортні системи, цифрові методи управління трафіком і використання вдосконалених будівельних матеріалів сприяють оптимізації дорожнього руху, зниженню аварійності та збільшенню терміну експлуатації покриття. Взаємодія транспортних засобів із інфраструктурою, автоматизовані системи моніторингу та регулювання забезпечують адаптивне управління трафіком і зменшення заторів. Основні технологічні рішення та їхній очікуваний ефект наведено в таблиці 2.

У сучасних умовах технологічні рішення активно впроваджуються в транспортну інфраструктуру, змінюючи підхід до управління дорожнім рухом, будівництва та експлуатації транспортних мереж. Цифрові системи управління використовуються у великих містах для оптимізації світлофорного регулювання, прогнозування заторів та автоматичного розподілу трафіку. Наприклад, у м. Київ упроваджено систему адаптивного керування світлофорами, яка реагує на реальний потік транспорту, скорочуючи час очікування на перехрестях та зменшуючи перевантаження центральних магістралей [12, с. 330].

Інтелектуальні транспортні системи активно використовуються для моніторингу стану доріг та аналізу безпеки руху. У м. Львів працюють

Таблиця 2

Сучасні технологічні рішення для підвищення безпеки та екологічності транспортних мереж

Технологічне рішення	Сутність рішення	Очікуваний ефект
Цифрові системи управління дорожнім рухом	Використання штучного інтелекту, великих даних та прогнозних алгоритмів для адаптивного регулювання світлофорів, розподілу транспортних потоків	Зменшення кількості заторів, оптимізація руху, скорочення часу в дорозі та викидів CO_2
Інтелектуальні транспортні системи (ITS)	Автоматизовані системи моніторингу та управління рухом, інтегровані з інфраструктурою	Підвищення безпеки, зменшення аварійності, покращення транспортної доступності
Інноваційні будівельні матеріали	Самовідновлювані асфальти, бетон з нанодобавками, екологічні композитні матеріали	Збільшення тривалості терміну експлуатації покриття, зменшення витрат на ремонт, покращення екологічних характеристик
Автоматизовані транспортні засоби	Інфраструктура, що підтримує безпілотний транспорт, зокрема датчики та системи зв’язку	Зниження аварійності, оптимізація руху, підвищення ефективності використання доріг

Джерело: сформовано авторами на основі [2, с. 168; 4, с. 725; 6, с. 160]

камери відеоспостереження з функцією розпізнавання номерних знаків і визначення швидкості, що дозволяє в реальному часі фіксувати порушення [14]. Подібні системи інтегруються з навігаційними додатками, що дозволяє водіям отримувати актуальну інформацію про стан доріг і можливі маршрути об'їзду.

Інноваційні будівельні матеріали починають застосовуватися для продовження терміну служби дорожнього покриття та зменшення витрат на його обслуговування. Наприклад, у Польщі на експериментальних ділянках трас використовують самовідновлюваний асфальт, що під дією сонячного тепла може самостійно відновлювати мікротріщини, подовжуючи строк експлуатації дороги без необхідності частого ремонту [15]. В Україні активно використовують модифіковані бітуми для покращення зносостійкості асфальтобетону, що особливо важливо для магістралей із високим навантаженням.

Автоматизовані транспортні засоби тестуються в багатьох країнах, і хоча в Україні безпілотні автомобілі ще не стали частиною міської інфраструктури, деякі компанії починають використовувати автономні дрони для доставлення малих вантажів. Варто зазначити, що в США та Європі вже створюються спеціальні смуги для безпілотного транспорту, що дозволяє уникати конфліктів з іншими учасниками руху [16, с. 114]. Подібні рішення в перспективі можуть бути адаптовані для громадського транспорту й логістики в Україні, що підвищить безпеку та ефективність перевезень.

Сучасні технологічні рішення демонструють високу ефективність у покращенні безпеки, комфорту та економічності транспортних систем, однак їх масове впровадження залежить від фінансування, адаптації нормативної бази та готовності інфраструктури до інтеграції з новими технологіями.

Розробка концептуальної моделі інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру є важливим етапом у формуванні ефективної, адаптивної та екологічно безпечної транспортної системи. Запропонована модель відрізняється від традиційних підходів тим, що поєднує технологічні, економічні та екологічні аспекти впровадження інновацій, дозволяючи оцінювати не лише їхню ефективність, а й взаємозв'язок із соціальними та фінансовими чинниками. Базуючись на принципах сталого розвитку, модель передбачає інтеграцію цифрових технологій, автоматизованих систем управління та використання екологічно чистих матеріалів, забезпечуючи гармонійне функціонування транспортної інфраструктури (рис. 1).

Запропонована концептуальна модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру базується на взаємодії чотирьох основних елементів: цифрової інтеграції, інноваційних матеріалів, екологічних технологій та автоматизованого управління. Цифрова інтеграція забезпечує обробку даних у реальному часі для оптимізації трафіку, зменшення кількості заторів і підвищення ефективності використання дорожньої мережі. Інноваційні матеріали сприяють збільшенню терміну експлуатації дорожнього покриття та зниженню витрат на ремонт через використання самовідновлюваних та екологічно чистих матеріалів.

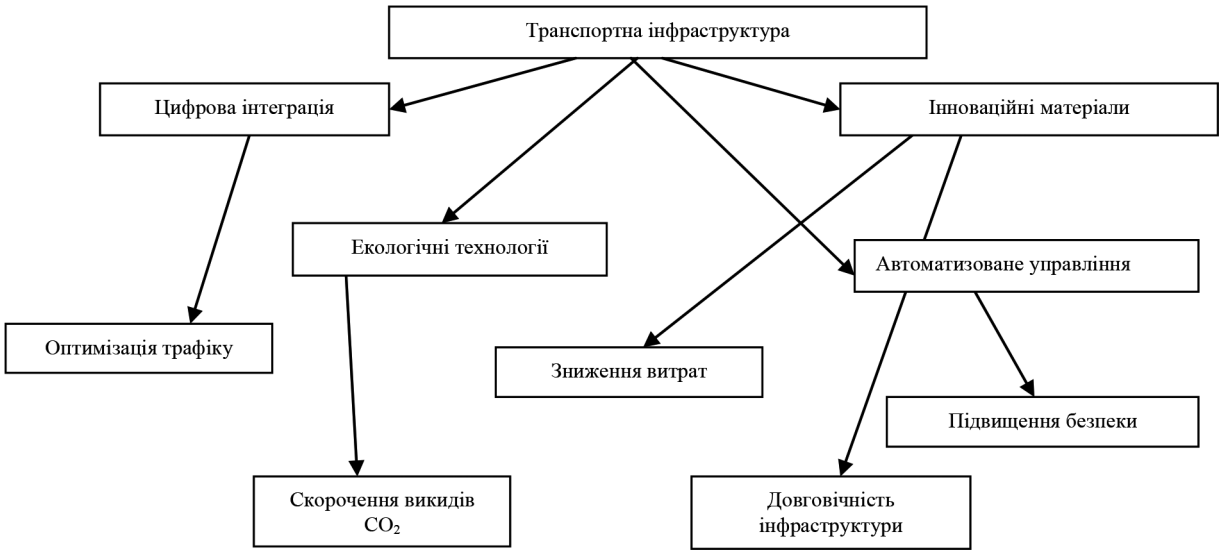


Рис. 1. Концептуальна модель інтеграції інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру
Джерело: власна розробка авторів

Екологічні технології дозволяють скоротити викиди CO_2, забезпечуючи інтеграцію електротранспорту, зарядної інфраструктури та відновлюваних джерел енергії. Автоматизоване управління сприяє підвищенню безпеки транспортної мережі завдяки адаптивним світлофорним системам, безпілотному транспорту та інтелектуальному контролю трафіку. Синергія цих компонентів спрямована на створення адаптивної транспортної системи, здатної реагувати на змінні умови експлуатації, забезпечуючи високу ефективність, екологічну стійкість і мінімізацію витрат.

Функціонування моделі в сучасних умовах передбачає широке застосування великих даних для аналітики та прогнозування транспортних потоків, поступову інтеграцію інноваційних будівельних матеріалів у дорожнє покриття, а також адаптацію міської інфраструктури до автоматизованого управління рухом. Упровадження цієї моделі дозволяє не лише підвищити надійність транспортних мереж, а й забезпечити їхню стійкість до майбутніх викликів, зокрема урбанізаційного зростання та змін клімату.

Упровадження інженерних інновацій у транспортну інфраструктуру супроводжується низкою технологічних, економічних і нормативних обмежень, які впливають на швидкість та ефективність інтеграції сучасних рішень. Технологічні обмеження включають недостатню розвиненість цифрових систем управління транспортними потоками, обмежену інтеграцію інтелектуальних транспортних технологій із наявною інфраструктурою, а також труднощі в адаптації міських та міжміських транспортних вузлів до автоматизованого управління й аналізу великих даних [8]. Використання штучного інтелекту та IoT у транспортному секторі потребує потужних обчислювальних ресурсів, стабільних каналів зв'язку та комплексної системи моніторингу, що залишається проблемним у багатьох регіонах через застарілі комунікаційні мережі.

Економічні обмеження пов'язані з високою вартістю цифровізації транспортної інфраструктури, необхідністю значних капіталовкладень у створення автоматизованих диспетчерських центрів, сенсорних мереж та бездротових технологій зв'язку. Впровадження інтелектуальних транспортних систем та автоматизованого моніторингу трафіку потребує розроблення ефективних механізмів фінансування, зокрема державно-приватного партнерства, що є критичним фактором для сталого розвитку транспортної галузі.

Нормативні обмеження пов'язані з відсутністю адаптованого законодавства для регулювання впровадження автономного транспорту, інтелектуального керування міським рухом та інтеграції екологічних технологій у транспортні мережі. Недостатня уніфікація стандартів цифрової взаємодії між різними операторами транспортних систем ускладнює створення єдиної інформаційної платформи управління трафіком та підвищення ефективності транспортної логістики [6, с. 161].

Удосконалення транспортної інфраструктури потребує комплексного підходу, що включає цифровізацію управління міськими транспортними мережами, інтеграцію інтелектуальних транспортних систем (ITS) і впровадження автоматизованого моніторингу трафіку. Використання штучного інтелекту та аналітичних платформ дозволяє оптимізувати маршрути, зменшити затримки на дорогах, підвищити ефективність громадського транспорту та знизити навантаження на транспортні вузли.

Особливу увагу необхідно приділити розвитку міської транспортної логістики, що охоплює вдосконалення систем паркування, впровадження автоматизованих зупинок громадського транспорту, розширення мережі зарядних станцій для електротранспорту та створення єдиної інтегрованої платформи управління перевезеннями. Важливим напрямом є модернізація дорожньої інфраструктури з акцентом на розширення розумних світлофорних систем, динамічних інформаційних табло та технологій адаптивного керування трафіком, що забезпечують підвищення безпеки та ефективності руху.

Автоматизація транспортних процесів вимагає інтеграції даних про завантаженість маршрутів, стан міських транспортних вузлів, роботу громадського транспорту та управління дорожньою навігацією. Впровадження таких рішень дозволяє забезпечити оперативне реагування на зміни трафіку, скоротити час у дорозі для пасажирів та підвищити ефективність використання міської інфраструктури.

Для ефективної інтеграції інноваційних рішень необхідно адаптувати нормативно-правову базу, що регулює застосування цифрових систем управління міським транспортом, розвиток автономного громадського транспорту та модернізацію маршрутної мережі. Запровадження комплексного підходу до розвитку міської транспортної інфраструктури сприятиме покращенню мобільності населення, оптимізації логістичних

процесів та підвищенню рівня безпеки пасажирських і вантажних перевезень.

Висновки. У дослідженні встановлено, що впровадження інженерних інновацій є важливим фактором розвитку міської транспортної інфраструктури, сприяючи підвищенню ефективності, безпеки та адаптивності транспортних мереж. Аналіз сучасних технологічних рішень показав, що інтеграція інтелектуальних транспортних систем, автоматизованих платформ управління трафіком, розумних світлофорів та цифрових диспетчерських центрів дозволяє оптимізувати транспортні потоки, скоротити час у дорозі та підвищити рівень безпеки на міських маршрутах.

Розроблено концептуальну модель інтеграції інженерних інновацій, що враховує технологічні та нормативні аспекти, забезпечуючи комплексний підхід до модернізації транспортної системи. Визначено, що така модель сприяє покращенню координації між інфраструктурними об'єктами, спрощує впровадження цифрових рішень та дозволяє ефективно управляти міськими транспортними вузлами.

Основними бар'єрами для впровадження інновацій у міську транспортну систему є технологічні обмеження, зокрема недостатня цифровізація мереж та слабка інтеграція розумного транспорту в наявну інфраструктуру. Нормативні труднощі пов'язані з відсутністю адаптованої законодавчої бази для автоматизованого управління трафіком, регулювання автономного громадського транспорту та інтеграції цифрових платформ між різними операторами.

Запропоновані рекомендації стосуються вдосконалення міської транспортної інфраструктури шляхом впровадження розумних систем керування рухом, оптимізації міських маршрутів та автоматизації транспортних процесів. Важливим напрямом є створення єдиної цифрової платформи управління перевезеннями, що забезпечить інтеграцію різних видів транспорту, оптимізацію транспортних вузлів та підвищення ефективності міських перевезень.

Перспективи подальших досліджень охоплюють удосконалення методів оцінювання ефективності інженерних інновацій у транспортній інфраструктурі, аналіз інтеграції автоматизованих транспортних рішень у міське середовище та розробку стандартів для гармонізації цифрових транспортних систем.

Список літератури:

1. Hu W., Shu X., Huang B. Sustainability innovations in transportation infrastructure: An overview of the special volume on sustainable road paving. *Journal of Cleaner Production*. 2019. Vol. 235. P. 369–377. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.258

2. Narayanaswami S. Urban transportation: innovations in infrastructure planning and development. *The International Journal of Logistics Management*. 2017. Vol. 28. № 1. P. 150–171. DOI: https://doi.org/10.1108/IJLM-08-2015-0135

3. Broniewicz E., Ogrodnik K. Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 2020. Vol. 83. Article 102351. DOI: https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102351

4. Du H., Liu D., Lu Z., Crittenden J., Mao G., Wang S., Zou H. Research development on sustainable urban infrastructure from 1991 to 2017: A bibliometric analysis to inform future innovations. *Earth's Future*. 2019. Vol. 7. № 7. P. 718–733. DOI: https://doi.org/10.1029/2018EF001117

5. Shah K. J., Pan S.-Y., Lee I., Kim H., You Z., Zheng J.-M., Chiang P.-C. Green transportation for sustainability: Review of current barriers, strategies, and innovative technologies. *Journal of Cleaner Production*. 2021. Vol. 326. Article 129392. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.129392

6. Losurdo F., Dileo I., Siergiejczyk M., Krzykowska K., Krzykowski M. Innovation in the ICT infrastructure as a key factor in enhancing road safety: A multi-sectoral approach. *2017 25th International Conference on Systems Engineering (ICSEng)* (Las Vegas, 22–24 August 2017). Las Vegas, NV, USA, 2017. P. 157–162. DOI: 10.1109/ICSEng.2017.69

7. Bazzan A. L. C., Klügl F. Introduction to intelligent systems in traffic and transportation. Springer Nature, 2022. URL: https://books.google.com.ua/books?hl=uk&lr=&id=p4RyEAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PR1 (date of access: 31.01.2025).

8. Sobral T., Galvão T., Borges J. Visualization of urban mobility data from intelligent transportation systems. *Sensors*. 2019. Vol. 19. № 2. Article 332. DOI: https://doi.org/10.3390/s19020332

9. Toh C. K., Sanguesa J. A., Cano J. C., Martinez F. J. Advances in smart roads for future smart cities. *Proceedings of the Royal Society A*. 2020. Vol. 476. № 2233. Article 20190439. DOI: https://doi.org/10.1098/rspa.2019.0439

10. Wang F., Xie J., Wu S., Li J., Barbieri D.M., Zhang L. Life cycle energy consumption by roads and associated interpretative analysis of sustainable policies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 141. Article 110823. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110823

11. Ahad M.A., Paiva S., Tripathi G., Feroz N. Enabling technologies and sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society*. 2020. Vol. 61. Article 102301. DOI: https://doi.org/10.1016/j.scs.2020.102301

12. Thacker S., Adshead D., Fay M., Hallegatte S., Harvey M., Meller H., O'Regan N., Rozenberg J., Watkins G., Hall J. W. Infrastructure for sustainable development. *Nature Sustainability*. 2019. Vol. 2. № 4. P. 324–331. DOI: https://doi.org/10.1038/s41893-019-0256-8

13. Коростін О.О. Ефективність розпізнавання тексту в автоматизації міжнародних морських перевезень за допомогою штучного інтелекту. *Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки*. 2024. № 3. С. 29–38. DOI: https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2024.3.4

14. В Україні запускають єдину систему відеомоніторингу стану публічної безпеки, зокрема розпізнавання облич. *Судово-юридична газета*. 2024. URL: https://sud.ua/uk/news/publication/290740-v-ukraine-zapuskayut-edinuyu-sistemu-videomonitoringa-sostoyaniya-publichnoy-bezopasnosti-v-tom-chisle-raspoznavanie-litsa (дата звернення: 25.01.2025).

15. Malinowski S., Wróbel M., Bandura L., Woszuk A., Franus W. Use of new green bitumen modifier for asphalt mixtures recycling. *Materials*. 2022. Vol. 15. № 17. Article 6070. DOI: https://doi.org/10.3390/ma15176070

16. Boban M., Kousaridas A., Manolakis K., Eichinger J., Xu W. Connected Roads of the Future: Use Cases, Requirements, and Design Considerations for Vehicle-to-Everything Communications. *IEEE Vehicular Technology Magazine*. 2018. Vol. 13. № 3. P. 110–123. DOI: https://doi.org/10.1109/MVT.2017.2777259

Pavlova I.O., Kuts N.H., Dubytskyi O.S. ANALYSIS OF THE IMPACT OF ENGINEERING INNOVATIONS ON THE SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF TRANSPORT INFRASTRUCTURE

The article examines the impact of engineering innovations on the development of urban transport infrastructure, highlighting their role in enhancing efficiency, safety, and optimizing transport networks. It has been identified that the implementation of modern technological solutions, including digital traffic management platforms, intelligent transport systems, and automated dispatch centers, contributes to reducing congestion, improving mobility, and enhancing the quality of transport services. The aim of the article is to analyze the impact of engineering innovations on the efficiency of urban transport infrastructure, identify key technological trends that facilitate route network optimization, automation of transport operations, and integration of digital tools into transport logistics. To achieve this goal, methods of system analysis, comparative approach, modeling, and structural analysis were applied. It has been established that the main challenges in implementing innovations include technological constraints, particularly the insufficient level of digitalization of transport networks and the integration of smart transport systems, as well as regulatory difficulties due to the lack of unified standards for managing urban transportation. A conceptual model for integrating engineering innovations has been developed, considering technological and infrastructural aspects, ensuring a comprehensive approach to modernizing urban transport. It has been proven that the use of intelligent transport systems, adaptive traffic light control, automated parking systems, and predictive algorithms for managing public transport contributes to reducing congestion, optimizing transportation, and increasing the efficiency of urban routes. The necessity of improving the regulatory framework governing the integration of digital transport platforms and automated urban logistics management has been substantiated. Promising areas for future research include the development of advanced methods for assessing the efficiency of engineering innovations in urban transport infrastructure and the creation of standards for the unified implementation of digital transport systems.

Key words: *smart mobility, predictive analytics, infrastructure modernization, sustainable transport, traffic optimization, autonomous solutions, renewable energy integration.*

УДК 656.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/41

Постранський Т. М.
Національний університет «Львівська політехніка»

Тюрдьо Н. О.
Національний університет «Львівська політехніка»

ШВИДКІСТЬ РУХУ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ЯК ЧИННИК ВПЛИВУ НА ФУНКЦІОНАЛЬНИЙ СТАН ВОДІЯ

У науковій роботі розкрито актуальність питання безпеки дорожнього руху та впливу чинника людини на неї. Зокрема проведено літературний аналіз, який свідчить про динаміку зростання рівня автомобілізації та, відповідно, збільшення кількості рухомого складу на вулично-дорожніх мережах. У свою чергу, це явище призводить як до погіршення умов переміщення, так й зростання рівня аварійності і, як наслідок, збільшення ймовірності скоєння дорожньо-транспортної події (ДТП). При цьому, у більшості випадках основним чинником зниження рівня безпеки руху є «людський фактор» у транспортному процесі. Окрім цього, іншим вагомим чинником впливу та тісно пов'язаним із попереднім, виступає швидкість руху ТЗ. Від її величини часто залежить як ймовірність виникнення аварійної ситуації, так й величина наслідків у разі скоєння ДТП. Відповідно до цього, наукова робота присвячена виявленню впливу швидкісних режимів руху транспортних засобів (ТЗ) на показники функціонального стану водіїв. Об'єктом дослідження у цій роботі виступає процес управління водієм ТЗ у різних дорожніх умовах. У свою чергу, в якості предмету дослідження обрано динаміку зміни функціонального стану водія під дією впливу швидкості руху.

За результатами проведених натурних досліджень встановлено динаміку зміни варіабельності серцевого ритму водіїв. Ці заміри здійснювалися із використанням приладу Polar H10. В подальшому їх опрацьовано із використанням відповідного програмного забезпечення, яке дозволило виявити динаміку зміни індексу напруження (ІН) організму водіїв. Одночасно із записом показників функціонального стану водіїв, здійснювалася реєстрація миттєвої швидкості руху ТЗ. Провівши статистичний аналіз зібраних даних, встановлено закономірність зміни ІН водіїв під дією швидкостей руху легкових автомобілів. Отримані значення можуть слугувати підставою для встановлення обмежень швидкостей руху на аварійних ділянках вулиць та доріг, а також використані для подальшого вивчення чинника людини у транспортному процесі.

Ключові слова: *безпека дорожнього руху, водій, транспортний засіб, функціональний стан, надійність роботи, швидкість руху, індекс напруження.*

Постановка проблеми. Безпека руху є важливим завданням під час організації транспортних процесів та організації дорожнього руху загалом. Враховуючи, що з кожним роком ріст рівня автомобілізації стає все стрімкішим, це питання набуває ще більшої актуальності [1, с. 47]. Це зумовлено тим, що збільшення кількості ТЗ на вулично-дорожній мережі може призводити як до погіршення умов руху, так і зростання рівня аварійності. При цьому, розвиток автомобільної галузі спричиняє не лише збільшення кількості рухомого складу на вулицях та дорогах, але й підвищення динамічних характеристик ТЗ. Проте, у міру розвитку швидкісних параметрів автомобілів, виникають все нові виклики для водіїв та вимоги до концентрації їх уваги, стану організму тощо. У свою чергу, тривала психічна напруженість може призводити до погіршення функціонального стану водія та, як наслідок, до його помилкових дій у складних дорожніх ситуаціях, де від нього потребується швидка та коректна реакція [2, с. 171].

Також слід зазначити, що дорожній рух є багатогранним процесом який поєднує в собі взаємодію ланок системи «водій – автомобіль – дорога – середовище». При цьому, саме ланка «водій» у значній мірі впливає на безпеку дорожнього руху та, в цей же час, є найменш вивченою та прогнозованою. Таким чином, підсумовуючи вищезазначене, можна стверджувати, що вивчення питання впливу швидкісних режимів переміщення на функціональний стан водія і надійність його роботи, є актуальним.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Підвищення рівня безпеки дорожнього руху, зокрема й шляхом визначення вузьких місць в організа-

ції дорожнього руху та у графіках праці і відпочинку водіїв, є важливим завданням. Як свідчить статистика, у порівнянні з країнами ЄС в Україні значно гірші показники щодо рівня безпеки руху. У свою чергу, це часто призводить до людських та економічних втрат. При цьому, науковці часто виділяють такі основні чинники, які впливають на рівень аварійності на вулицях та дорогах [3, с. 71; 4, с. 24]:

– надійність ТЗ та дотримання належного рівня їх активної і пасивної безпеки;

– своєчасне обслуговування ТЗ;

– психофізіологічні властивості водіїв та рівень їх професійної підготовки;

– дотримання правил дорожнього руху.

Окрім цього, М. В. Кушнірук та І. В. Лукашук у своїй роботі [5, с. 156] зазначили, що загалом серед усіх чинників які впливають на безпеку дорожнього руху, необхідно виділяти такі основні: людський чинник, чинники режимів руху та навколишнього середовища і технічний чинник (чинник ТЗ). Окрім цього, автори зазначають, що дія цих чинників може бути як постійна, так і тимчасова. Зокрема до постійних чинників вони відносять психофізіологічні особливості та показники водія і стан дорожнього покриття й ТЗ.

В роботі авторів М. В. Бабій та І. М. Кучвара [6, с. 14] наведено такі три основні причини високого рівня аварійності: недотримання правил дорожнього руху, неналежний стан автомобільної інфраструктури та незадовільний стан ТЗ. Як і у попередніх випадках, можна зробити висновок, що врахування чинника людини у транспортному процесі є важливим завданням для створення безпечних умов переміщення. Зокрема необхідно здійснювати належний медичний огляд та професійний відбір водіїв автотранспортних засобів [6, с. 15].

Окрім вищезазначеного, не менш вагомим чинником впливу на безпеку дорожнього руху є швидкість переміщення ТЗ. Це зумовлено тим, що із зростанням швидкісних режимів зростає й навантаження на організм водія та може погіршуватися процес сприйняття ним дорожньої обстановки. Наслідком таких обставин може бути втрата контролю над ТЗ та скоєння ДТП [7, с. 40].

Згідно статистичних даних наведених на сайті Департаменту патрульної поліції, до основних причин аварійності слід віднести перевищення допустимої швидкості руху. Зокрема з цієї причини протягом 2023 р. в Україні скоєно 9215 ДТП в яких загинуло 1570 осіб. Необхідно зазначити, що це значення становить 38,98 % від загальної кількості скоєних ДТП протягом цього року. Також, для порівняння у 2024 р. зафіксовано 10 163 пригоди (39,42 % від загальної кількості ДТП протягом року) з причини перевищення безпечної швидкості руху в яких загинуло 1770 осіб [8].

Необхідно зазначити також, що швидкість з якою рухається ТЗ здійснює вплив на функціональний стан водія. Зокрема М. В. Бойків та Р. А. Марій шляхом проведених наукових досліджень встановили залежність зміни показника активності регуляторних систем водія від швидкості руху та дистанції безпеки у потоці [9, с. 119].

В якості ще одного підтвердження впливу швидкості переміщення ТЗ на функціональний стан водія, є проведенні наукові дослідження О. О. Лобашова та О. В. Прасоленка. Зокрема вони встановили, що зростання технічної швидкості руху від 5 до 15 км/год призводить до зсуву частоти серцевих скорочень приблизно на 0,1 од. Проте, із подальшим зростанням технічної швидкості руху значення цього зсуву починає знижуватися. Таким чином, це явище описано у вигляді параболічної залежності [7, с. 44]. Також у цій роботі автори аналогічно відобразили залежність між технічною швидкістю та кількістю небезпечних гальмувань.

На сьогодні значна кількість науковців займається питанням визначення безпечної швидкості руху залежно від умов переміщення та різного роду чинників впливу. Для прикладу, В. В. Ковалишин запропонував здійснювати розрахунок швидкості руху автомобіля у гірських умовах із застосуванням формули (1), яка враховує чинник людини, зокрема психофізіологічні особливості водія [10, с. 102].

$$V_{без} = 3{,}6\frac{\sqrt{t_p^2 + \frac{2K_e(S+l_o)}{g(\varphi \pm i)}} - t_p}{\frac{K_e}{g(\varphi \pm i)}}, \qquad (1)$$

де t_p – тривалість реакції водія, с.; K_e – коефіцієнт ефективності гальмування; S – відстань видимості; l_o – відстань між автомобілями, які зупинилися, м.; g – прискорення сили тяжіння; φ – коефіцієнт поздовжнього зчеплення шини з дорогою; i – поздовжній ухил ділянки дороги.

Таким чином, можна зробити висновок, що швидкість переміщення ТЗ здійснює вплив на безпеку дорожнього руху та функціонування транспортної системи «водій – автомобіль – дорога – середовище». У свою чергу, саме водій є керуючою

ланкою, а від надійності його роботи залежить ймовірність виникнення аварійних ситуацій та рівень травматизму на транспорті. При цьому, процес управління ТЗ викликає у водіїв появу втоми, емоційного напруження, млявості, зниження концентрації уваги тощо [11, с. 23]. Тому, на сьогодні для вирішення поставлених проблем у галузі транспорту не достатньо використовувати лише класичні підходи щодо організації дорожнього руху. Зокрема, все гостріше постає питання детального планування та організації руху з урахуванням психофізіологічних особливостей водія.

Постановка завдання. Метою цього дослідження є визначення характеру впливу величини швидкості руху на функціональний стан водія автотранспортного засобу.

Для досягнення мети дослідження необхідно вирішити такі основні завдання:

– здійснити аналіз умов переміщення та маршрутів руху на якому будуть проводитися натурні дослідження;

– сформувати групу водіїв, які братимуть участь в замірах;

– провести натурні дослідження показників, які необхідні для визначення функціонального стану водіїв;

– встановити залежності зміни ІН водіїв від швидкості руху ТЗ.

Виклад основного матеріалу. Дослідження проводилися на маршрутах руху із малими значеннями рівня завантаження. Для дотримання таких умов заміри здійснювали у міжпікові періоди доби будніх днів. Було сформовано два маршрути руху у межах Львівської області, зокрема: Львів – Самбір та Львів – Меденичі. Кожен з цих маршрутів руху характеризувався значними ділянками між населеними пунктами та незначними інтенсивностями руху транспортних потоків. Якість дорожнього покриття та інформаційного забезпечення учасників дорожнього руху на цих маршрутах знаходився на належному рівні та відповідав діючим нормам.

Що стосується групи водіїв, які брали участь в замірах, до її було сформовано з дотриманням таких пропорцій їх темпераменту:

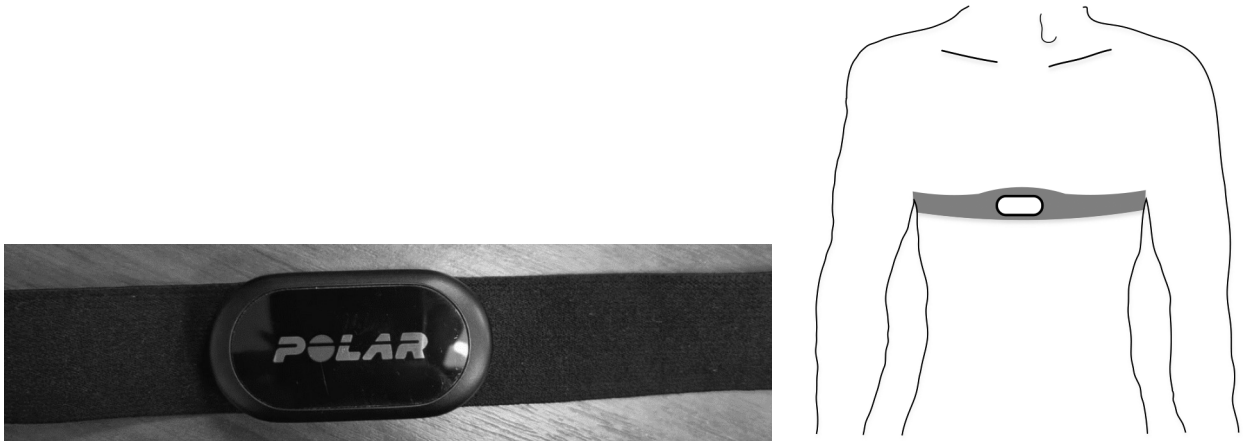
– холериків – 30 %;
– сангвініків – 30 %;
– флегматиків – 20 %;
– меланхоліків – 20 %.

Такий склад зумовлений тим, щоб наблизити його до реального розподіл у транспортному потоці. Слід зазначити, що для досліджень обрано легкові автомобілі з схожими технічними показниками.

Що стосується безпосередньо замірів показників функціонального стану водіїв, то для цього обрано прилад Polar H10 (рис. 1). Він здійснював фіксацію показника варіабельності серцевого ритму. На основі отриманих даних у програмному забезпеченні «Kubios HRV Scientific Lite» (рис. 2) визначалося значення ІН.

Для функціонування приладу Polar H10 та зчитування даних щодо варіабельності серцевого ритму, використано мобільний пристрій. Через спеціалізоване програмне забезпечення та технологію бездротового зв'язку, збиралися статистичні дані щодо інтервалів між серцевими ударами.

Що стосується процесу фіксації миттєвої швидкості руху ТЗ, то вона відбувалася із використанням відеореєстратора Garmin Dash Cam. Принцип його роботи передбачав безперервну реєстрацію геоположення ТЗ через вмонтований GPS передавач. На основі цих даних в автоматичному режимі



а *б*

Рис. 1. Фото (*а*) приладу Polar H10 для заміру показників варіабельності серцевого ритму, та принцип (*б*) його розміщення на тілі досліджуваної особи

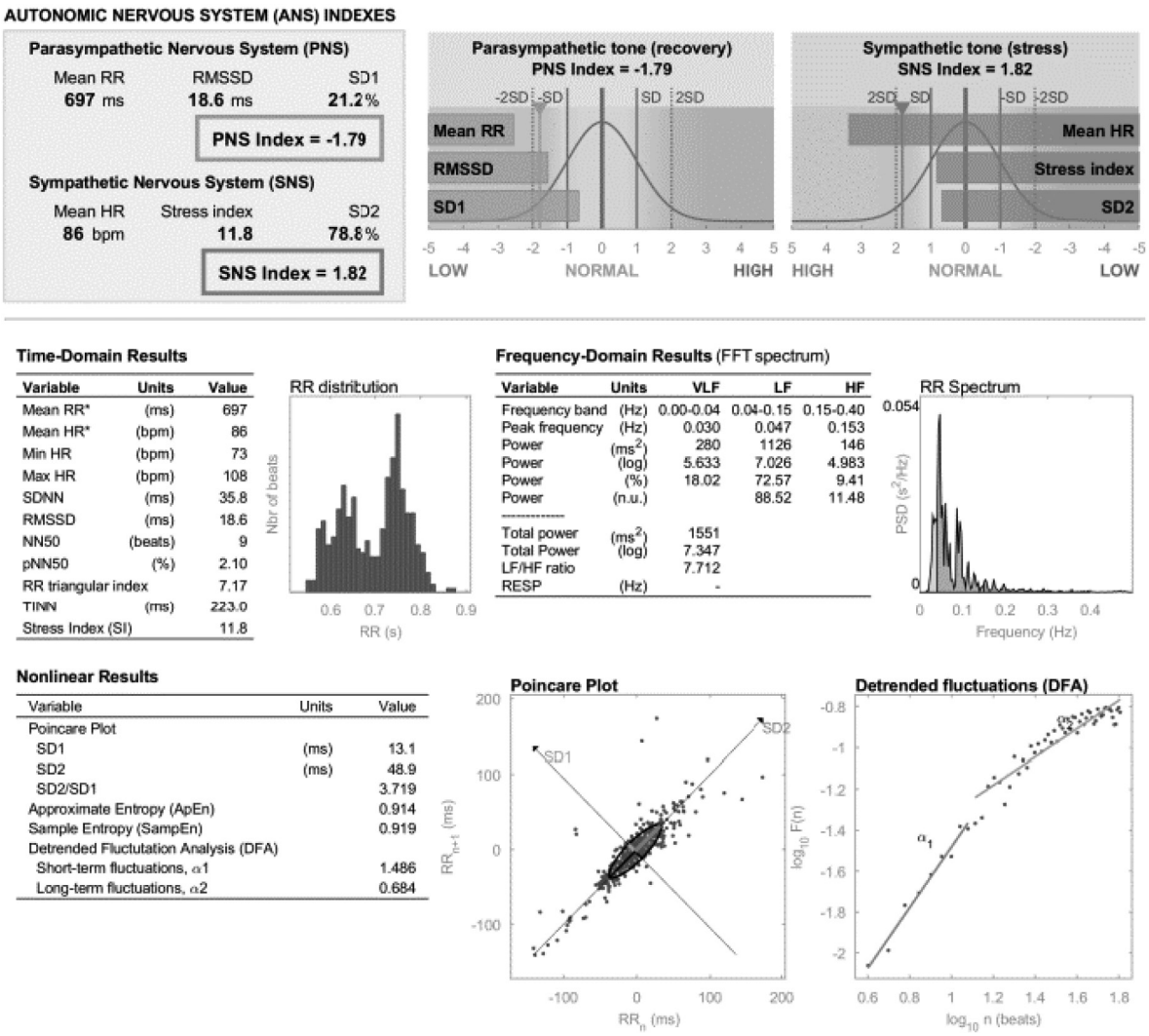


Рис. 2. Вигляд звіту опрацьованого фрагменту запису показників функціонального стану водія у програмному забезпеченні «Kubios HRV Scientific Lite»

визначалося значення швидкості руху автомобіля. Усі ці дані реєструвалися на цифровий накопичувач, до дозволило опрацьовувати отримані результати у лабораторних умовах.

За результатами досліджень сформовано базу даних про зміну ІН водіїв які керували ТЗ за різних миттєвих швидкостей. Провівши математичний аналіз та статистичне опрацювання отри-

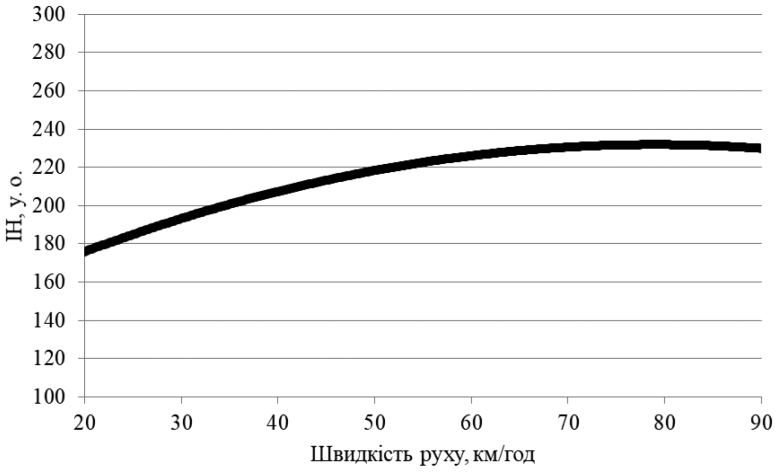


Рис. 3. Динаміка зміна ІН водіїв легкових автомобілів залежно від миттєвих швидкостей руху

маних значень, отримано графічну залежність зміни ІН від швидкісних режимів переміщення (рис. 3).

З даних наведених на рис. 3 виявлено беззаперечний вплив швидкості руху ТЗ на функціональний стан водія. При цьому, спостерігається певне зростання ІН на початкових етапах зі стабілізацією на високих швидкостях. При цьому, необхідно зазначити, що значення ІН у спокійному стані та без наявності вагомих навантажень коливається в межах 80–150 у.о. Проте він досить чутливий до будь якого роду навантажень, в тому числі й емоційного, що миттєво може його збільшувати у 1,5–2 рази [11, с. 27].

Таким чином, результати досліджень свідчать про те, що зростання швидкості підвищує когнітивне та сенсорне навантаження на водія через необхідність обробки ним більшої кількості інформації та швидкого прийняття рішень. Водночас, під час руху ТЗ на швидкостях, що наближаються до 80–90 км/год, ІН стабілізується або навіть дещо знижується. Це можна пояснювати ефектом адаптації та зменшенням кількості зовнішніх подразників, характерних для руху на прямолінійних ділянках з відмінною видимістю та за межами населених пунктів.

Висновки. За результатами натурних досліджень встановлено, що швидкість руху ТЗ беззаперечно здійснює вплив на показники функціонального стану водія. Аналіз отриманих даних показав, що при збільшенні швидкості від 20 до 60 км/год ІН зростав приблизно на 20 %, тоді як при подальшому підвищенні швидкості до 90 км/год – його значення стабілізувалося на рівні 200–240 у.о. Також слід зазначити, що підвищений рівень ІН (більше 200–220 у.о.) корелює зі збільшенням психофізіологічного навантаження на водія, що за тривалих умов може знижувати його реакцію та концентрацію уваги. Результати можуть бути використані для розробки рекомендацій щодо встановлення обмежень швидкості на аварійно небезпечних ділянках доріг та адаптації режимів праці та відпочинку водіїв. У подальших замірах також необхідно зосередитися на вивченні впливу швидкості на інші психофізіологічні показники водія, а також на тестуванні можливих рішень щодо підтримки оптимального рівня функціонального стану водіїв під час керування ТЗ.

Список літератури:

1. Дзюра В. О., Бабій М. В., Сташків А. П. Шляхи оптимізації кількості індивідуального транспорту в обмежених можливостях вулично-дорожньої мережі. *Вісник машинобудування та транспорту*. 2024. № 1(19). С. 46–54. DOI: 10.31649/2413-4503-2024-19-1-46-54.

2. Кашканова А. А. Надійність водія як фактор забезпечення безпеки дорожнього руху в транспортній системі міста. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: матеріали XVI-ої міжнар. наук.-практ. конф. (Вінниця, 23–25 жовтня 2023 року). Вінниця : ВНТУ, 2023. С. 171–173.

3. Попович П. В., Шевчук О. С., Гірник В. Р. Безпека руху вулично-дорожними мережами. *Актуальні задачі сучасних технологій*: матеріали VI міжнар. наук.-техн. конф. молодих учених та студентів. Тернопіль, 2017. С. 71–72.

4. Мигаль В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Харків : Майдан, 2018. 262 с.

5. Кушнірук М. В., Лукашук І. В. Основні фактори, які сприяють виникненню ДТП. *Транспортна безпека: правові та організаційні аспекти*: матеріали XV міжнар. наук.-практ. конф. Кривий Ріг, 2020. С. 156–158.

6. Бабій М. В., Кучвара І. М. Ключові проблеми безпеки дорожнього руху в Україні. *Безпека дорожнього руху: правові та організаційні аспекти*: матеріали XII міжнар. наук.-практ. конф. Кривий Ріг, 2017. С. 14–16.

7. Лобашов О. О., Прасоленко О. В. Вплив характеристик дорожнього руху на функціональний стан водія. *Комунальне господарство міст*. 2018. № 7. С. 40–45. DOI: 10.33042/2522-1809-2018-7-146-40-45

8. Статистика ДТП в Україні. URL: https://patrolpolice.gov.ua/statystyka/

9. Бойків М. В., Марій Р. А. Безпечна дистанція руху автомобілів у транспортних потоках з урахуванням функціонального стану водія. *Вісник Національного університету Львівська політехніка. Динаміка, міцність та проектування машин і приладів*. 2017. № 866. С. 116–120.

10. Ковалишин В. В. Швидкісні режими руху автомобіля у гірських умовах з урахуванням психофізіологічних особливостей водія : дис… канд. техн. наук: 05.22.01. Х. : ХНАМГ, 2013. 171 с.

11. Давідіч Ю. О. Куш Є. І. Понкратов Д. П. Change of car driver`s stress index during different periods of the day in urban traffic conditions. Transport Technologies. 2020. № 1(2). С. 23–32. DOI: 10.23939/tt2020.02.023

Postranskyy T. M., Tiurdo N. O. VEHICLE SPEED AS A FACTOR INFLUENCING THE DRIVER'S FUNCTIONAL STATE

The research paper reveals the relevance of the issue of road safety and the influence of the human factor on it. In particular, a literature analysis was carried out, which shows the dynamics of growth in the level of motorization and, accordingly, an increase in the number of vehicles on street and road networks. In turn, this phenomenon leads to a deterioration in traffic conditions and an increase in the level of accidents and, as a result, an increase in the probability of a road traffic accident. At the same time, in most cases, the main factor in reducing the level of traffic safety is the 'human factor' in the transport process. In addition, another significant factor and closely related to the previous one is the vehicle speed. Its value often determines both the probability of an emergency and the magnitude of the consequences in the event of a road traffic accident. Accordingly, this article is devoted to identifying the impact of vehicle speeds on the indicators of the drivers` functional state. The object of study is the process of vehicle driver control in different road conditions. In turn, the subject of the study is the dynamics of changes in the driver's functional state under the influence of traffic speed. Based on the results of the studies, the dynamics of changes in the variability of the drivers' heart rates were determined. These measurements were made using a Polar H10 device. Further, they were processed using the appropriate software, which made it possible to identify the dynamics of changes in the stress index of the drivers' bodies. At the same time as recording the indicators of the drivers' functional state, the instantaneous speed of the vehicle was collected. After statistical analysis of the recorded data, the regularity of changes in the drivers' stress index under the influence of the passenger cars` speed was established. The obtained values can be used to set speed limits on dangerous sections of streets and roads, as well as for further study of the human factor in the transport process.

Key words: *road safety, driver, vehicle, functional state, reliability, speed, stress index.*

УДК 614.841
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/42

Семичаєвський С. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Присяжнюк В. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Якіменко М. Л.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Осадчук М. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Свірський В. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Сидоренко В. Л.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

ПРО НЕОБХІДНІСТЬ ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ТА МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ ЗАХИСНОГО СПОРЯДЖЕННЯ ПОЖЕЖНИКА

У статті встановлено необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань захисного спорядження пожежника відповідно до європейської класифікації. Особливу увагу приділено необхідності підвищення якості захисного спорядження пожежника та збереження життя і здоровья пожежників-рятувальників під час виконання завдань за призначенням.

Визначено небезпечні фактори пожежі, які можуть впливати на особовий склад пожежно-рятувальних підрозділів під час гасіння пожеж та проведення рятувальних робіт, наприклад, полум'я та іскри, підвищена температура оточуючого середовища тощо. Описано також вторинні та другорядні прояви небезпечних факторів пожежі.

Наведено загальний вид основних видів захисного спорядження пожежника.

З'ясовано, що основними захисними властивостями захисного спорядження пожежника є такі параметри, як вогнестійкість, термостійкість, механічна міцність, хімічна стійкість, водонепроникність, зручність, ергономічність та безумовно видимість.

З'ясовано, що головну роль в захисті пожежника від дії небезпечних факторів, що виникають на пожежі становить комбінація пакету матеріалів. Найпоширеніший пакет матеріалів складається із матеріалу верху, водотривкого шару (мембрана), теплоізоляційного та підкладкового шарів, останні з яких найчастіше при виготовленні поєднуються між собою. Наведено 2 рівні вимог до показників якості захисного одягу пожежника.

Виявлено недоліки нормативних документів, які поширюються на захисне спорядження пожежника, зокрема на каску пожежника та рятувальника, рукавички пожежника, підкасник пожежника і захисний одяг пожежника.

Наведено основні питання, що підлягають дослідженню в рамках науково-дослідної роботи, метою якої є удосконалення вимог до показників якості касок пожежника та рятувальника, рукавичок

пожежника, підкасника пожежника і захисного одягу пожежника та розроблення відповідних національних стандартів України, гармонізованих з європейськими стандартами.

З'ясовано, що за результатами проведення досліджень буде розроблено методом технічного перекладу 5 проєктів національних стандартів України, які поширюватимуться на захисне спорядження пожежника. Ці стандарти будуть гармонізованими з відповідними європейськими стандартами зі ступенем відповідності IDT (ідентичний).

Ключові слова: *захисний одяг пожежника, захисне спорядження пожежника, каска пожежника та рятувальника, методи випробувань, підкасник пожежника, пожежно-рятувальні підрозділи, рукавички пожежника, технічні вимоги.*

Постановка проблеми. Відповідно до Статуту [1] гасіння пожежі – це 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 пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України, які повинні виконувати завдання за призначенням виключно у спеціальному захисному одязі, який захищає пожежних-рятувальників від небезпечних факторів пожежі.

В ДСТУ 2272 [2] наведено визначення терміну «небезпечні чинники пожежі» – це прояв пожежі, що призводить чи може призвести до опіків, отруєння легкими продуктами згоряння або піролізу, травмування чи загибелі людей і (або) до заподіяння матеріальних, соціальних, екологічних збитків.

Відповідно до ДСТУ 8828 [3] небезпечними чинниками пожежі є:

– полум'я та іскри;

– підвищена температура оточуючого середовища;

– токсичні продукти згоряння і термічного розкладання;

– дим;

– знижена концентрація кисню.

До вторинних проявів небезпечних чинників пожежі відносяться:

– уламки, частини зруйнованих апаратів, агрегатів, установок, конструкцій будівель і споруд;

– радіоактивні та токсичні речовини і матеріали, що вийшли із зруйнованих апаратів та установок;

– електричний струм, що виник в результаті винесення високої напруги на струмопровідні частини конструкцій, апаратів, агрегатів;

– небезпечні чинники вибуху (ударна хвиля, полум'я, уламки конструкцій, обладнання, комунікацій будівель і споруд, шкідливі речовини, що вивільнились в наслідок вибуху), який виник внаслідок пожежі;

– негативні наслідки, обумовлені застосуванням вогнегасних речовин.

До другорядних проявів небезпечних факторів пожежі належать: частини будівельних конструкцій, агрегатів, установок, що руйнуються; небезпечні фактори вибуху (ударна хвиля, теплове випромінювання), електричний струм, вогнегасні речовини та отруйні речовини, що можуть потрапити до навколишнього середовища із пошкодженого устаткування.

На сьогоднішній день в умовах війни ліквідація пожеж набуває особливого значення через підвищений ризик їх виникнення внаслідок бойових дій та постійних обстрілів територій. Під час ліквідації пожеж оперативні підрозділи ДСНС України постійно працюють в специфічних умовах, які можуть призвести до негативних наслідків. Тому якість захисного спорядження пожежника є критично важливою для забезпечення безпечної та ефективної роботи пожежно-рятувальних підрозділів. На рисунках 1–5 показано загальний вид основних видів захисного спорядження пожежника, зокрема, каска пожежника та рятувальника, рукавички пожежника, підкасник пожежника і захисний одяг пожежника.

Рис. 1. Загальний вид касок пожежника

Рис. 2. Загальний вид касок рятувальника

Рис. 3. Загальний вид рукавичок пожежника

Рис. 4. Загальний вид підкасника пожежника

Рис. 5. Загальний вид захисного одягу пожежника

Слід відмітити, що основними захисними властивостями захисного спорядження є такі параметри, як вогнестійкість, термостійкість, механічна міцність, хімічна стійкість, водонепроникність, зручність, ергономічність та безумовно видимість.

У звіті [4] приведено результати науково-дослідної роботи (далі – НДР) з обґрунтування показників якості і методів оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника. За результатами аналітичних та експериментальних досліджень, висвітлених у звіті [4] науково обґрунтовано складові і процедури для методів оцінювання захисного спорядження пожежника на відповідність вимогам його показників якості, параметри і кількість зразків для випробувань, які враховано в розробленому в рамках цієї НДР національному стандарті України [5].

На теперішній час національний стандарт [5] застосовується виробниками та споживачами захисного спорядження пожежника, а також органами з оцінки відповідності під час підтвердження його якості.

Нині в Україні діє низка національних стандартів [6–10], які встановлюють технічні вимоги та методи випробувань до захисного спорядження пожежника, а саме до: касок пожежника та рятувальника, рукавичок пожежника, підкасника пожежника та захисного одягу пожежника. В національному стандарті [5] є посилання на вимоги стандартів [6], [8–10].

Одним із головних видів спеціального спорядження пожежника є захисний одяг. Основна функція захисного одягу пожежника – це захист тіла пожежника від впливу небезпечних та шкідливих чинників, які виникають під час гасіння пожеж та ліквідації надзвичайних ситуацій.

Комплект захисного одягу складається з куртки та напівкомбінезону (або штани). Конструкція одягу, матеріали та фурнітура, що використовуються перешкоджають проникненню води та агресивних речовин. Головну роль в захисті пожежника від дії небезпечних факторів, що виникають на пожежі становить комбінація пакету матеріалів. Найпоширеніший пакет матеріалів складається із матеріалу верху, водотривкого шару (мембрана), теплоізоляційного та підкладкового шарів, останні з яких найчастіше при виготовленні поєднуються між собою. Також існують варіанти виготовлення пакету коли водотривкий шар поєднується із теплоізоляційним.

Національний стандарт [6] встановлює мінімальні технічні вимоги щодо показників якості захисного одягу пожежника, яким користуються під час гасіння пожеж. Він також встановлює 2 рівні вимог до показників якості, причому 1-й рівень є нижчим, а 2-й вищим. Для застосування підрозділами обирається рівень відповідно до можливих небезпек, які можуть виникнути на об'єктах в межах території виїзду певного підрозділу.

Практика застосування національних стандартів [6–10] виявила низку недоліків, що стосуються складнощів розуміння вимог зазначених вище нормативних документів, зважаючи на прийняття їх методом «підтвердження» та відсутності загальноприйнятих термінів у цій галузі. Вказане вище може призводити до недостатнього виявлення недоброякісної продукції, що потрапляє на оснащення у пожежно-рятувальні підрозділи ДСНС України.

Враховуючи вищенаведене, набуває актуальності питання збереження життя та здоров'я особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час виконання завдань за призначенням, завдяки підвищенню якості захисного спорядження пожежника.

Вищезазначене обумовлює необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань захисного спорядження пожежника відповідно до європейської класифікації.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У публікації [11] наведено актуальність проведення дослідження, направленого на впровадження в Україні сучасних вимог до показників якості спеціального захисного спорядження пожежника, методів і процедур їх оцінювання. Наведено види спеціального захисного спорядження пожежника. Наведено задачі, які необхідно вирішити в рамках проведення науково-дослідної роботи щодо обґрунтування показників якості і методів оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника.

У публікації [12] проаналізовано результати експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик зразків спеціального захисного спорядження пожежника, які проводились за такими показниками якості: «поширення полум'я», «теплопередача полум'ям», «теплопередача випромінюванням», «конвективний тепловий опір» та «контактна теплопередача».

Публікація [13] присвячена аналізу результатів експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик зразків одягу пожежника захисного – тепловідбивного. Вказаний одяг

використовується в сукупності з іншим спорядженням та призначений для захисту пожежника під час гасіння пожеж і проведення пожежно-рятувальних робіт в умовах високої температури навколишнього середовища, інтенсивного теплового випромінювання та тривалої дії відкритого полум'я.

В той же час, у вказаних публікаціях [11–13] не було розглянуто проблему щодо необхідності розроблення та прийняття методом «технічного перекладу» відповідних національних стандартів, що стосуються захисного спорядження пожежника на заміну стандартів [6–10], які було прийнято методом «підтвердження».

Постановка завдання. Для сприяння у вирішенні зазначеної вище проблеми, з метою удосконалення вимог до показників якості касок пожежника та рятувальника, рукавичок пожежника, підкасника пожежника і захисного одягу пожежника та розроблення відповідних національних стандартів України (ДСТУ), гармонізованих з європейськими стандартами, в Інституті наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України проводиться НДР за темою: «Обґрунтування технічних вимог та методів випробувань захисного спорядження пожежника відповідно до європейської класифікації» («Захисне спорядження – вимоги»).

Для досягнення поставленої мети в цій публікації необхідно розглянути основні питання, що підлягають дослідженню в рамках вказаної НДР.

Виклад основного матеріалу. Основні питання, що підлягають дослідженню в рамках вказаної НДР

В рамках проведення НДР передбачається провести:

– аналіз стану нормативної бази в Україні та у провідних країнах світу, що регламентує технічні вимоги та методи випробувань захисного спорядження пожежника, а саме: касок пожежника та рятувальника, рукавичок пожежника, підкасника пожежника, захисного одягу пожежника;

– аналіз типів та видів захисного спорядження пожежника, що застосовується в Україні та у провідних країнах світу.

За результатами проведення досліджень буде розроблено 5 проєктів національних стандартів України, що встановлюватимуть технічні вимоги та методи випробувань захисного спорядження пожежника, а саме: касок пожежника та рятувальника, рукавичок пожежника, підкасника пожежника і захисного одягу пожежника. Ці стандарти будуть розроблені методом технічного перекладу та відповідати із ступенем відповідності IDT (ідентичний) європейським стандартам.

Висновки:

1. Встановлено необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань захисного спорядження пожежника відповідно до європейської класифікації.

2. Впровадження результатів роботи в подальшому дозволить проводити випробування, за результатами яких здійснювати оцінку придатності щодо безпечної експлуатації касок пожежника та рятувальника, рукавичок пожежника, підкасника пожежника і захисного одягу пожежника в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС та сприятиме збереженню життя та здоров'я особового складу пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України під час виконання завдань за призначенням завдяки підвищенню якості захисного спорядження пожежника.

Список літератури:

1. Про затвердження Статуту дій у надзвичайних ситуаціях органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту та Статуту дій органів управління та підрозділів Оперативно-рятувальної служби цивільного захисту під час гасіння пожеж : наказ Міністерства внутрішніх справ України від 26.04.2018 р. № 340. Дата оновлення: 10.05.2024. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0801-18#Text (дата звернення: 15.01.2025).

2. ДСТУ 2272:2006. Пожежна безпека. Терміни та визначення основних понять. Київ, 2007. 28 с.

3. ДСТУ 8828:2019. Пожежна безпека. Загальні положення. Київ, 2019. 84 с.

4. Обґрунтування показників якості і методів оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника: звіт про НДР ІДУНДЦЗ; кер. Присяжнюк В. В. Київ, 2022. 765 с.

5. ДСТУ 9209:2023. Засоби індивідуального захисту пожежників. Класифікація, технічні вимоги та методи випробування. Київ, 2023. 59 с.

6. ДСТУ EN 443:2017. Засоби індивідуального захисту голови. Каски пожежні (EN 443:2008, IDT). Київ, 2017. 41 с.

7. ДСТУ EN 16473:2017. Каски пожежні. Каски для технічного порятунку (EN 16473:2014). Київ, 2017. 24 с.

8. ДСТУ EN 659:2017. Захисні рукавички для пожежників. Загальні технічні вимоги та методи випробування (EN 659:2003+A1:2008, IDT). З поправкою № 1:2017. Київ, 2017. 12 с.

9. ДСТУ EN 13911:2015. Захисний одяг для пожежників. Вимоги та методи випробування протипожежних капюшонів для пожежників (EN 13911:2004, IDT). Київ, 2015. 13 с.

10. ДСТУ EN 469:2017. Захисний одяг для пожежників. Вимоги щодо показників якості захисного одягу для пожежників (EN 469:2005; A1:2006; AC:2006, IDT). Київ, 2017. 48 с.

11. В. В. Присяжнюк, С. В. Семичаєвський, М. Л. Якіменко, М. В. Осадчук Щодо обгрунтування показників якості та методів їх оцінювання спеціального захисного спорядження пожежника. Комунальне господарство міст. 2021. Том 1, випуск 161. – С. 290–295.

12. С. В. Семичаєвський, В. В. Присяжнюк, М. Л. Якіменко Щодо експериментальних досліджень експлуатаційних характеристик зразків спеціального захисного спорядження пожежника. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33(72) № 5. – С. 348–353.

13. С. В. Семичаєвський Про експериментальні дослідження зразків одягу пожежника захисного – тепловідбивного. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2022. Том 33(72) № 5. – С. 354–358.

Semychayevsky S. V., Prisyajnyuk V. V., Yakimenko M. L., Osadchuk M. V., Svirskyi V. V., Sydorenko V. L. **ON THE NECESSITY OF SUBSTANTIATING TECHNICAL REQUIREMENTS AND TESTING METHODS FOR FIRE FIGHTER PROTECTIVE EQUIPMENT**

The article establishes the need for a study aimed at substantiating the technical requirements and testing methods for firefighter protective equipment in accordance with the European classification. Particular attention is paid to the need to improve the quality of firefighter protective equipment and preserve the life and health of firefighter rescuers while performing assigned tasks.

Hazardous fire factors that can affect the personnel of fire and rescue units during fire extinguishing and rescue operations are identified, for example, flames and sparks, increased ambient temperature, etc. Secondary and secondary manifestations of hazardous fire factors are also described.

A general view of the main types of firefighter protective equipment is given.

It is found that the main protective properties of firefighter protective equipment are such parameters as fire resistance, heat resistance, mechanical strength, chemical resistance, water resistance, convenience, ergonomics and absolute visibility.

It was found that the main role in protecting a firefighter from the effects of dangerous factors arising in a fire is played by the combination of a package of materials. The most common package of materials consists of the top material, a waterproof layer (membrane), a heat-insulating and lining layers, the latter of which are most often combined with each other during manufacture. 2 levels of requirements for the quality indicators of firefighter protective clothing are given.

The shortcomings of regulatory documents that apply to firefighter protective equipment, in particular to firefighter and rescuer helmets, firefighter gloves, firefighter undershirts and firefighter protective clothing, have been identified.

The main issues to be studied within the framework of scientific research, the purpose of which is to improve the requirements for the quality indicators of firefighter and rescuer helmets, firefighter gloves, firefighter aprons and firefighter protective clothing, and to develop relevant national standards of Ukraine, harmonized with European standards, are presented.

It was found that based on the results of the research, 5 draft national standards of Ukraine will be developed using the technical translation method, which will apply to firefighter protective equipment. These standards will be harmonized with the relevant European standards with the IDT (identical) degree of conformity.

Key words: *firefighter gloves, firefighter protective clothing, firefighter protective equipment, firefighter and rescuer helmet, fire and rescue units, test methods, technical requirements.*

УДК 614.841
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/43

Семичаєвський С. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Присяжнюк В. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Якіменко М. Л.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Осадчук М. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Свірський В. В.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

Бєлікова К. Г.
Інститут наукових досліджень з цивільного захисту
Національного університету цивільного захисту

ПРО ОБГРУНТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ ВИМОГ ТА МЕТОДІВ ВИПРОБУВАНЬ РУЧНИХ ПОЖЕЖНИХ ДРАБИН

У статті встановлено необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань ручних пожежних драбин.

З'ясовано, що пожежно-рятувальна техніка виготовлена в Україні комплектується трьома типами ручних пожежних драбин, а саме: драбинами – палицями, драбинами – штурмівками та триколінними висувними пожежними драбинами.

Виявлено проблемне питання, пов'язане з тим, що з наявних ручних пожежних драбин, які перебувають в оперативних розрахунках пожежно-рятувальних підрозділів України, здебільшого експлуатується триколінна висувна пожежна драбина, висота якої дозволяє проводити аварійно-рятувальні роботи не вище третього поверху будівлі. Також з'ясовано що нині існує певна методологія проведення випробувань ручних пожежних драбин вітчизняного виробництва, які використовуються на пожежно-рятувальній техніці. Застосування ідентичної методології проведення випробувань до пожежних драбин європейських виробників не можливе у зв'язку з різноманітністю їх конструктивного виконання та можливостями використання.

Наведено приклад пожежно-рятувальної техніки, укомплектованої ручними пожежними драбинами, яка застосовується в пожежно-рятувальних підрозділах України.

Визначено категорії ручних пожежних драбин відповідно до європейської класифікації та наведено їх зовнішній вигляд. Виявлено основні відмінності між ручними пожежними драбинами, які використовуються в пожежно-рятувальних підрозділах України та драбинами згідно з європейською класифікацією.

З'ясовано основні питання, що підлягають дослідженню в рамках науково-дослідної роботи, метою якої є удосконалення вимог до показників якості та методів контролю ручних пожежних драбин, розроблення відповідного національного стандарту України та створення необхідного випробувального обладнання для випробування ручних пожежних драбин.

З'ясовано, що за результатами проведення досліджень буде розроблено проєкт національного стандарту України, що встановлюватиме класифікацію, технічні вимоги та методи випробувань руч-

них пожежних драбин та створено випробувальний стенд для оцінювання якості ручних пожежних драбин, якими оснащується пожежна техніка. Також буде розроблено методологію проведення експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин для пожежно-рятувальних підрозділів України.

Ключові слова: *класифікація, методи випробувань, ручні пожежні драбини, технічні вимоги.*

Постановка проблеми. Одним із основних видів пожежно-технічного оснащення, яким комплектується пожежно-рятувальна техніка є ручні пожежні драбини. За допомогою цих драбин виконуються роботи щодо рятування людей, гасіння пожеж, а також розбирання невеликих конструкцій дахів будівель та споруд.

В основному пожежно-рятувальна техніка виготовлена в Україні комплектується трьома типами ручних пожежних драбин, а саме: драбинами -палицями, драбинами – штурмівками та триколінними висувними пожежними драбинами.

Статистика пожеж, які виникають у житлових будинках в Україні свідчить про те, що 87,3 % пожеж відбуваються в будинках до 5 поверхів (умовна висота 16 метрів). Отже в умовах щільної забудови житлового фонду для рятування та гасіння пожеж доцільно використовувати ручні пожежні драбини з умовною висотою підйому 15 метрів.

Саме тоді виникає проблемне питання, пов’язане з тим, що з наявних ручних пожежних драбин, які перебувають в оперативних розрахунках пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України, здебільшого експлуатується триколінна висувна пожежна драбина, висота якої дозволяє проводити аварійно-рятувальні роботи не вище третього поверху будівлі. Це суттєво обмежує спектр можливостей проведення аварійно-рятувальних робіт.

Водночас у зв’язку з введенням воєнного стану, на територію України від країн-партнерів надходять пожежно-рятувальні автомобілі, що укомплектовані ручними пожежними драбинами, які відповідають європейським вимогам та мають висоту вищу за триколінні висувні пожежні драбини, що перебувають у пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС України. Проблема постановки таких пожежних драбин в оперативний розрахунок полягає у тому, що пожежне, аварійно-рятувальне обладнання та спорядження перед постановкою на оперативне чергування підлягає випробуванню. Нині існує певна методологія проведення випробувань ручних пожежних драбин вітчизняного виробництва, які використовуються на пожежно-рятувальній техніці. Застосування ідентичної методології проведення випробувань до пожежних драбин європейських виробників не можливе у зв’язку з різноманітністю їх конструктивного виконання та можливостями використання.

Слід зазначити, що експлуатаційні випробування ручних пожежних драбин базувалися на вимогах національного стандарту України [1], який на теперішній час скасовано. Цей національний стандарт встановлював класифікацію, загальні технічні вимоги та методи випробувань ручних пожежних драбин, а саме: драбин-палиць, драбин-штурмівок та висувних пожежних драбин.

Приклад пожежно-рятувальної техніки, укомплектованої ручними пожежними драбинами наведено на рисунку 1.

Водночас в Україні є чинним національний стандарт [2], який прийнято методом підтвердження, що ускладнює його імплементацію у практичну діяльність. Національний стандарт [2] поширюється на категорії ручних пожежних драбин, що наведено у таблиці 1. Зовнішній вигляд цих категорій ручних пожежних драбин наведено на рисунках 2–7.

Рис. 1. Приклад пожежно-рятувальної техніки, укомплектованої ручними пожежними драбинами

Таблиця 1

Категорії ручних пожежних драбин згідно з національним стандартом [2]

Тип драбини	Максимальна кількість користувачів	Режим використання
Розсувні	3	Рятування і підйом
	2	Рятування і підйом
	1	Підйом
Штурмові	1	Підйом
Суцільні	3	Рятування і підйом
	2	Рятування і підйом
	1	Підйом
Для роботи на дахах будівель	1	Підйом
Секційні (телескопічні)	3	Рятування і підйом
	2	Рятування і підйом
	1	Підйом
Драбини-палиці	1	Підйом

На рисунку 2 наведено зовнішній вигляд розсувних пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2].

Рис. 2. Зовнішній вигляд розсувних пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2]

Основна відмінність розсувної пожежної драбини згідно з національним стандартом [2] від пожежної триколінної драбини, яка використовується пожежно-рятувальними підрозділами України полягає у різному механізмі висування. Існують двосекційні види драбин, на деяких європейських драбинах є опори та стійки.

Крім того, суттєво відрізняється максимальна висота висування європейських розсувних пожежних драбин, яка складає 16,5 метрів.

На рисунку 3 наведено зовнішній вигляд штурмових пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2].

Рис. 3. Зовнішній вигляд штурмових пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2]

Основною відмінністю штурмовової пожежної драбини згідно з національним стандартом [2] від вітчизняної штурмової драбини є різниця у вигляді конструкції гака. Він може бути іншої форми, або їх може бути два з обох сторін. Також у деяких драбинах гак є таким, що складається.

На рисунку 4 наведено зовнішній вигляд суцільних пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2].

Рис. 4. Зовнішній вигляд суцільних пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2]

Суцільні пожежні драбини згідно з національним стандартом [2] в пожежно-рятувальних підрозділах України є відсутніми. В основному вони призначені для евакуації потерпілих з першого поверху. За рахунок цільного корпусу вони досить міцні, але це також є їхнім недоліком через обмежену маневреність в середині приміщень.

На рисунку 5 наведено зовнішній вигляд пожежних драбин, які використовуються для робіт на дахах будівель, що відповідають національному стандарту [2].

Рис. 5. Зовнішній вигляд пожежних драбин, які використовуються для робіт на дахах будівель, що відповідають національному стандарту [2]

Такого типу ручних пожежних драбин теж немає на озброєнні в пожежно-рятувальних підрозділіх України. Цей тип драбин схожий на штурмову пожежну драбину, але існує відмінність у конструкції гака, який має специфічну форму для зручності кріплення за конструкцію дахів будівель.

На рисунку 6 наведено зовнішній вигляд секційних (телескопічних) пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2].

Рис. 6. Зовнішній вигляд секційних (телескопічних) пожежних драбин, які відповідають національному стандарту [2]

Такий тип ручних пожежних драбин теж не використовується в пожежно-рятувальних підрозділах України. За рахунок варіювання розміщення секцій драбини, зміни її розмірів та форм, вона є досить практичною і використовується для роботи і евакуації потерпілих.

На рисунку 7 наведено зовнішній вигляд драбин-палиць, які відповідають національному стандарту [2].

Такий вид ручних пожежних драбин є схожим із драбиною палицею, яка використовується пожежно-рятувальними підрозділами України.

Після скасування національного стандарту [1] виникає необхідність перегляду та розроблення методології проведення випробувань ручних пожежних драбин в пожежно-рятувальних підрозділах ДСНС, а також створення відповідної випробувальної бази, яка відповідає вимогам стандарту [2].

З огляду на наведене вище, набуває актуальності питання нормативного врегулювання використання в Україні європейських зразків ручних пожежних драбин для розширення можливостей повноцінного проведення аварійно-рятувальних робіт.

Рис. 7. Зовнішній вигляд драбин – палиць, які відповідають національному стандарту [2]

Вищезазначене обумовлює необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань ручних пожежних драбин.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У звіті [3] наведено результати пошукової науково-дослідної роботи з визначення шляхів удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання.

В той же час у цій роботі не наведено результатів обґрунтування технічних вимог та методів випробувань ручних пожежних драбин, а також не розглянуто проблему необхідності створення випробувального обладнання для проведення випробувань ручних пожежних драбин.

Постановка завдання. Для сприяння у вирішенні зазначеної вище проблеми, з метою удосконалення вимог до показників якості та методів контролю ручних пожежних драбин, розроблення відповідного національного стандарту України (ДСТУ) та створення необхідного випробувального обладнання для випробування ручних пожежних драбин, в Інституті наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту України проводиться НДР за темою: «Обґрунтування технічних вимог та методів випробувань ручних пожежних драбин» («Ручні пожежні драбини – вимоги»).

Для досягнення поставленої мети в цій публікації необхідно розглянути основні питання, що підлягають дослідженню в рамках вказаної НДР.

Виклад основного матеріалу. Основні питання, що підлягають дослідженню в рамках НДР

В рамках проведення НДР передбачається провести:

– аналіз стану нормативної бази в Україні та у провідних країнах світу, що регламентує класифікацію, технічні вимоги та методи випробувань ручних пожежних драбин;

– аналіз типів, видів ручних пожежних драбин, що застосовуються в Україні та у провідних країнах світу;

– створення випробувального стенда для оцінювання якості ручних пожежних драбин, якими оснащується пожежна техніка;

– розроблення проєкту національного стандарту України, що встановлюватиме класифікацію, технічні вимоги та методи випробувань ручних пожежних драбин;

– розроблення методології проведення експлуатаційних випробувань ручних пожежних драбин для пожежно-рятувальних підрозділів ДСНС України.

Висновки.

1. Встановлено необхідність проведення дослідження, направленого на обґрунтування технічних вимог та методів випробувань ручних пожежних драбин.

2. Розроблення проєкту національного стандарту України, що встановлюватиме класифікацію, технічні вимоги та методи випробувань ручних пожежних драбин дозволить у подальшому розв'язати проблемні питання з обслуговування, ремонту та випробування ручних пожежних драбин під час їх експлуатації в пожежно-рятувальних підрозділах та закладах освіти ДСНС України.

3. Створення випробувального обладнання для проведення випробувань ручних пожежних драбин дозволить здійснювати оцінку якості ручних пожежних драбин виробниками зазначеної продукції та сприятиме безпечному використанню драбин пожежно-рятувальними підрозділами.

Список літератури:

1. ДСТУ 3906-99. Техніка пожежна. Драбини пожежні ручні. Загальні технічні умови. Зі зміною № 1 (ІПС № 1-2-2005). Київ, 2000. 26 с.

2. ДСТУ EN 1147:2021. Драбини пожежні ручні (EN 1147:2010, IDT). Київ, 2021. 38 с.

3. Провести пошукові дослідження та визначити шляхи удосконалення технічного рівня, ефективності застосування протипожежної, аварійно-рятувальної та іншої спеціальної техніки і обладнання. Загальні технічні умови: звіт про НДР (заключний) УкрНДІЦЗ; кер. Борис О.П. Київ, 2016. 784 с.

Semychayevsky S. V., Prisyajnyuk V. V., Yakimenko M. L., Osadchuk M. V., Svirskyi V. V., Bielikova K. G. **ON SUBSTANTIATION OF TECHNICAL REQUIREMENTS AND TEST METHODS FOR MANUAL FIRE LADDER**

The article establishes the need for a study aimed at substantiating the technical requirements and testing methods for manual fire ladders.

It was found that fire and rescue equipment manufactured in Ukraine is equipped with three types of manual fire ladders, namely: ladders – sticks, ladders – assault ladders and three-legged retractable fire ladders.

A problematic issue was identified related to the fact that of the available manual fire ladders that are in the operational calculations of fire and rescue units of Ukraine, a three-legged retractable fire ladder

is mostly operated, the height of which allows emergency and rescue operations to be carried out no higher than the third floor of the building. It was also found that currently there is a certain methodology for testing domestically produced manual fire ladders that are used on fire and rescue equipment. The application of an identical testing methodology to fire escape ladders of European manufacturers is not possible due to the diversity of their design and possibilities of use.

An example of fire and rescue equipment equipped with manual fire escape ladders, which is used in fire and rescue units of Ukraine, is given.

The categories of manual fire escape ladders according to the European classification are determined and their appearance is given. The main differences between manual fire escape ladders used in fire and rescue units of Ukraine and ladders according to the European classification are identified.

The main issues to be studied within the framework of scientific research, the purpose of which is to improve the requirements for quality indicators and methods of control of manual fire escape ladders, develop the corresponding national standard of Ukraine and create the necessary testing equipment for testing manual fire escape ladders.

It was found out that based on the results of the research, a draft national standard of Ukraine will be developed, which will establish the classification, technical requirements and test methods for manual fire ladders, and a test stand will be created to assess the quality of manual fire ladders equipped with fire equipment. A methodology for conducting operational tests of manual fire ladders for fire and rescue units of Ukraine will also be developed.

Key words: *classification, manual fire escape ladders, technical requirements, test methods.*

УДК 656.61:656.073
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/44

Софронов А. І.
Одеський національний морський університет

Судник Н. В.
Одеський національний морський університет

АЛГОРИТМ ВИБОРУ НАПРЯМКУ РОБОТИ СУДНА В УМОВАХ ВОЛАТИЛЬНОСТІ ФРАХТОВОГО РИНКУ

Морські перевезення масових вантажів є найбільш важливою частиною світової торгівлі, а у контексті України – експорт зернових вантажів є стратегічно важливим напрямком економіки. І на відміну від лінійних перевезень, рівень фрахтових ставок є більш схильним до короткострокової волатильності, і залежить від більшої кількості факторів. У статті досліджується проблема тактики вибору напрямку роботи судна в умовах високої волатильності фрахтового ринку. Зокрема, розглядається експлуатація суден типу «коастер» на вантажопотоці зернових вантажів з України. В умовах нестабільності ринку та змін рівня фрахтових ставок судноплавні компанії стикаються з необхідністю вибору стратегії, яка дозволить максимізувати прибуток. На основі фактичних фрахтових ставок за 2023–2024 роки розроблено алгоритм прийняття рішень щодо вибору найбільш прибуткового варіанту експлуатації судна. У роботі проведено аналіз ретроспективних фрахтових ставок на окремих експортних напрямках, а також запропоновано декілька стратегій вибору рейсу залежно від динаміки ринку. Розглянуто різні сценарії експлуатації суден, серед яких: вибір найшвидшого рейсу, вибір напряму з найвищою ставкою фрахту, а також гібридні стратегії, що враховують загальні ринкові тенденції.

За результатами дослідження встановлено, що найбільш ефективною стратегією є максимізація кількості виконаних рейсів, особливо в умовах падіння ринку. Водночас, при підвищенні рівня фрахтових ставок ефективнішим є вибір найдовших рейсів, що дозволяє «переждати» низькі ставки. Значення даної роботи полягає у практичній спрямованості результатів, які можуть бути використані судноплавними компаніями та фрахтовими менеджерами для оптимізації експлуатації флоту. Отримані висновки можуть слугувати основою для подальших досліджень у сфері управління ризиками та адаптації бізнес-стратегій у судноплавстві в умовах мінливого ринку.

Ключові слова: *фрахтовий ринок, невизначеність, експлуатація судна, вибір рейсу, порівняльний аналіз.*

Постановка проблеми. За даними 2023 року, світовий балкерний флот складає більш ніж 13 тис. суден, які транспортують біля 3,2 мільярди тон масових сухих вантажів кожного року, і кількість суден і вантажообігу збільшується кожного року [1]. При цьому, на відміну від лінійних контейнерних перевезень, на ринку трампових перевезень за кожним окремим рейсом стоїть окремий ланцюг прийняття рішень з обох боків – фрахтувальника та судновласника, який залежить від факторів, що унікальні для кожного з можливих пар вантаж-судно.

При роботі флоту на ринку розмір фрахтової ставки визначається не лише з боку судновласника через розрахунок рейсових витрат і ТЧЕ (тайм-чартерного еквіваленту), але і залежить від ринкової ситуації (балансу між попитом тоннажу та пропозицією вантажу), особливо на найбільших та постійних вантажопотоках світового та локального фрахтового ринку. Для найбільш прибуткової роботи флоту, фрахтовому менеджеру судноплавної компанії необхідно визначати найбільш привабливий для виконання рейс залежно від ТЧЕ, рівня ринкової фрахтової ставки, обмежень щодо можливості роботи суден між конкретними портами, та загальної стратегії судноплавної компанії щодо локального фрахтового ринку, на якому експлуатується флот. В умовах волатильності фрахтового ринку, постає проблема максимізації прибутку від роботи судна та флоту, при цьому враховуючи обмежену гнучкість прийняття рішень, специфічну особливо для флоту малого тоннажу – коастерів – які на відміну від суден типорозміру «хендімакс» або «панамакс», не мають можливості «перейти» від одного фрахтового ринку до іншого, і ринок тайм-чартеру малого тоннажу вкрай обмежений.

В даній статті вищезазначена проблематика розглядається з точки зору роботи окремо взятого судна типу «коастер» на вантажопотоку зернових вантажів з України, на основі фактичних фрахтових ставках за 2023–2024 рік, і пропонується алгоритм вибору рейсу для максимізації відносних прибутків.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Тема підвищення ефективності роботи флоту в умовах невизначеності є темою, якій присвячується багато публікацій як у українською науковому середовищі [2–4], так і у закордонних.

У статті [4] описуються умови чартер-партій, такі як правила подачі NOR і рахування лейтайму, лейкен, диспач та інші, і далі аналізується вплив кожної з описаних умов на вірогідність успішного укладання чартер-партії. Хоча описані в цій статті умови беззаперечно мають свій вплив і на розмір фрахтової ставки, і на прийняття остаточного рішення щодо укладання угоди, з практики авторів умови чартер-партій для одного вантажопотоку є «стандартними», і обидві сторони перевезення віддають перевагу використанню прийнятих на цьому вантажопотоці умовам. В контексті перевезень зернових вантажів з України, найбільш поширеною проформою чартер-партій є Synacomex 2000, а окремі прийняті умови будуть розглянуті нижче, тому вплив умов чартер-партії на рівень фрахтової ставки в даній статі не розглядаються в тому числі через порівняльний характер статі, а не абсолютний.

У закордонних джерелах, проблематика роботи судна в умовах волатильності фрахтового ринку висвітлюється у статтях [5–7].

Таким чином можна стверджувати, що проблематика максимізації прибутку від роботи судна в різних умовах висвітлюється як українськими, так і закордонними авторами. Хоча дана тематика не є популярною, однак статтею нижче ми прагнемо доповнити праці попередників, використавши фактичні вихідні данні.

Постановка завдання. Метою даного дослідження є аналіз рівня фрахтових ставок на декількох суміжних напрямках протягом 2023–2024 рр., розробка алгоритму обґрунтування варіанту роботи судна з урахуванням стану фрахтового ринку, та порівняння ефективності його роботи за запропонованими варіантами.

Виклад основного матеріалу. Експорт сухих навалювальних вантажів з України до 2022 року здебільшого – близько 90 % – відбувався через морські порти. З початком війни і блокади портів, експорт залізної руди та металопрокату морськими портами фактично перервався, а обсяг експорту зернових вантажів через морські порти за підсумками 2022 року у відсотковому значенні склав лише 67 % [8]. Після відновлення безперешкодного експорту та імпорту через порти Великої Одеси наприкінці 2023 року, експорт масових вантажів як у абсолютному, так і у відносному значенні, наближається до рівня 2021 року. За даними [9] нижче наводиться актуалізована інформація щодо структури вантажообігу українських портів (табл. 1).

Як до початку війни, так і після, у абсолютних значеннях експорт саме зернових вантажів є найбільшою складовою вантажообігу морських портів – якщо у 2021 р. портами України було оброблено 50,8 млн. т. зернових, у 2022 р. – 26 млн. т., то все у 2023–2024 рр. цей обсяг склав 47,2 та 61,3 млн. т. відповідно [8, 10]. З точки зору фрахтового ринку, саме у сегменті морських перевезень зернових вантажів, за рахунок більшого обсягу та кількості фрахтувальників (видобуток та виробництво рудних вантажів та металопрокату є майже монополією), розмір фрахтової ставки піддається більшому впливу з боку через попит та пропозицію тоннажу та вантажу. Саме через те, що ринок перевезення зернових вантажів з України є найбільшою складовою експортного вантажообігу портів, а кількість потенційних фрахтувальників і напрямків перевезень є найбільш диверсифікованою, проблематика вибору напрямків роботи судна для максимізації прибутку залежно від стану ринку і стоїть найбільш

Таблиця 1

Структура експортних вантажопотоків в українських портах, %

Рік	Зерно	Руди	Метал	Вугілля та кокс	Добрива
2017	40,1	19,8	14,3	0,06	0,52
2018	40,2	18,4	15,2	0,07	0,43
2019	43,7	20,92	11,7	–	0,71
2020	38,15	27,8	12,22	–	1,26
2021	40,5	25,0	13,0	0,11	0,9
2022	65,0	30,0	5,0	–	–
2023	84,7	10,8	4,5	–	–
2024	63,6	29,6	6,8	–	–

гостро. Отож, для вирішення наведеної проблеми у цій статті і будуть розглянуті саме експортні вантажопотоки зернових вантажів для порівняльного аналізу варіантів роботи судна.

Як показують автори [8], фрахтові ставки з перевезення зернових вантажів з портів України були надзвичайно волатильними в період 2022–2023 рр., насамперед через значне зменшення пропускної здатності портової інфраструктури, що в свою чергу призвело до очікування судна для постановки під причал до 14 днів. Після відкриття глибоководних портів, судна тоннажу «хендісайз» та більше мали очікувати на проходження контролю спочатку на південній якірній стоянці Дарданелл, а після завантаження – на північній стоянці Босфору, що в свою чергу могло займати від 14 до 90 днів в окремих випадках. Такий великий час очікування суден призвело до зменшення вільних суден в регіоні, завдавши шоку локальному фрахтовому ринку, особливо в сегменті костерів, одночасно збільшивши попит на тоннаж (кількість зернових на експорт залишилася незмінною, але весь експорт мав бути суднами типу «костер»), зменшивши кількість тоннаже-миль в усьому регіоні (збільшення середнього часу рейсу через очікування суден на постановку під причал), та зменшивши кількість суден через відмову багатьох судновласників заходити в порти України, навіть на Дунаї. Судновласники, в свою чергу, намагаючись використати стрімке підвищення фрахтових ставок у своїх фінансових інтересах, поступово компенсували дисбаланс вільних тоннаже-миль за рахунок закупівлі та оренди суден-костерів з інших регіонів, що разом з розвитком інфраструктури портів Дунаю, призвело до стабілізації фрахтових ставок.

Через закінчення дії «зернової ініціативи» фрахтові ставки знов стрімко зросли, однак після відкриття портів Великої Одеси для безперешкодного імпорту та експорту будь-яких типів вантажів, не лише зернових, фрахтові ставки стабілізувалися на рівні 2021 року, а на деяких напрямках – знаходяться на рівні нижче, ніж до повномасштабного вторгнення (рис. 1). Звичайно, ринок костерних перевезень зернових з України пов'язаний і з іншими тонажо-розмірними групами регіону, і з іншими вантажними групами, і з макроекономічною ситуацією, однак на рисунку нижче явно прослідковується суттєвий дисбаланс між попитом та пропозицією в бік перенасичення ринку пропозицією тоннажу.

Як зазначають автори у [12], опираючись на праці з морської економіки, розмір фрахтової ставки залежить від балансу попиту (макроекономічної активності, геополітичної ситуації, сезонності торгівлі та ін.) та пропозиції (темпу будування нових суден та списання старих, ціни на бункер, ефективності роботи флоту та ін.), і запропонована модель майже ідентично відтворює BPI (Baltic Panamax Index). Однак, як і більшість закордонних та українських наукових праць по цій тематиці, опираючись на BDI (Baltic Dry Index), сегмент суден типу «костер» та «хендісайз» до 50 тис. т. дедвейту повністю випадає з аналізу рівня фрахтових ставок. Як було зазначено вище, судна малого тоннажу мають обмежену гнучкість в виборі регіону для експлуатації, тому при дослідженні фрахтового ринку в кон-

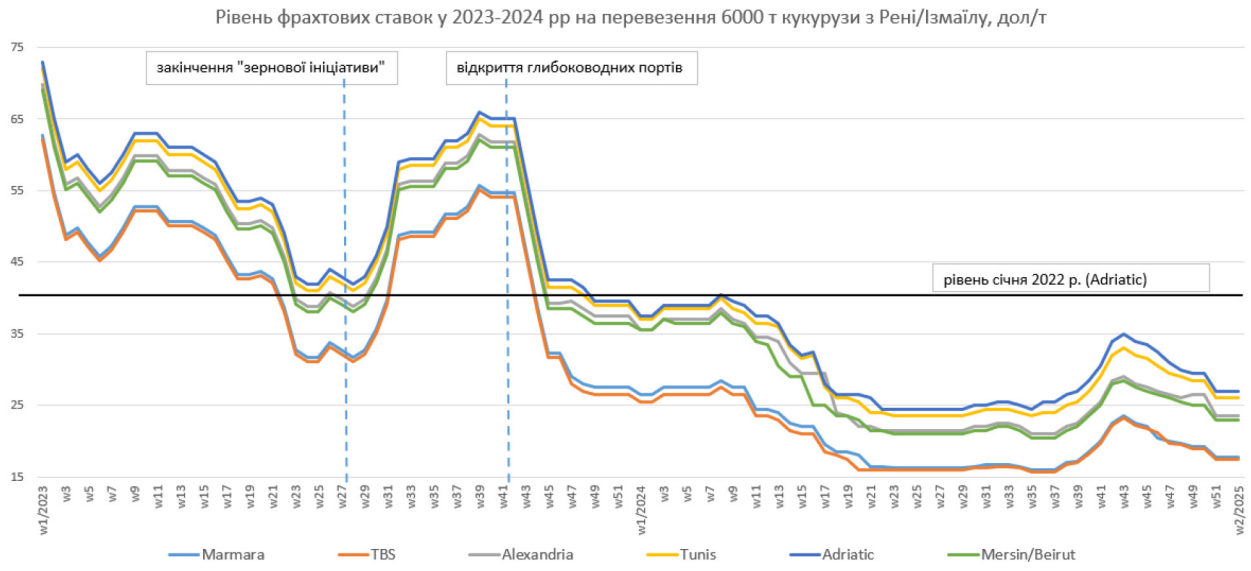


Рис. 1. Рівень фрахтових ставок з портів Дунаю по основним напрямкам перевезень зернових вантажів, дол/т.

тексті України використання BDI як показника є некоректним, у тому числі за відсутності відповідного сегменту тоннажу в даному показнику загалом та маршрутів з України (окрім S1B, що охвачує судна «супрамакс» з Середземного моря на Китай) зокрема.

Таким чином, у практичній діяльності фрахтового менеджера судноплавної компанії постає питання максимізації прибутку від експлуатації судна, і водночас – мінімізації кількості часу, коли судно не виконує рейс. Прийняття даного рішення потребує як розрахування ТЧЕ та аналізу умов чартер-партії кожного з потенціальних рейсів окремо, так і «тактики» вибору рейсу залежно від ринкової ситуації (фрахтові ставки зростають, падають, або не змінюються). Нижче будуть запропоновані варіанти виконання рейсів – «тактики» поведінки на ринку – і проведений порівняльний аналіз цих варіантів. Перед початком прорахунку, автори даної статті хотіли б відокремити наступні припущення. Приймаємо, що:

1) Судно виконує тільки кругові рейси (*прим. авторів – доповнення моделі з урахуванням зворотних напрямків буде наведено в наступних статтях*);

2) Волатильність ціни на бункер не впливає на результат аналізу;

3) Під час виконання рейсів немає затримок при проходженні каналів, демереджу та діспачу. Час на проходження Сулінського каналу в обидва боки – 3 доби, Босфору та Дарданелл – 0,5 діб кожний;

4) Швидкість судна приймається 12 вузлів, затримок через погодні умови – немає;

5) Рівень фрахтової ставки рахується по тижням (j), так як протягом тижня волатильність на окремих напрямках майже відсутня.

Більшість припущень вище виходять з того, що суміжні напрямки роботи судна, що були обрані для порівняльного аналізу, мають майже однаковий час рейсу, і погодні умови, що можуть викликати затримки судна, виникали би приблизно в однаковому етапу рейсу і викликали би приблизно однакові затримки. За таким же принципом будь-яка волатильність ціни на бункер мінімально впливає на результати, так як бункерування при експлуатації протягом року на кожному з напрямків проходило би приблизно в один й той же час.

Для визначення найбільш прибуткового варіанту роботи судна в залежності від стану фрахтового ринку, необхідно визначити ТЧЕ кожного з напрямків, на якому судно виконує рейс.

$$ТЧЕ_{ij} = \frac{F_{ij} - R_{ij}}{t_{pi}} = \frac{(f_{ij} \times Q_i) - (R_{пні} + R_{пві} + R_{бij} + R_{пост} + R_{кі})}{\left(\frac{Q_i}{П_{ні}} + \frac{Q_i}{П_{ві}}\right) + \frac{L_i}{V} + t_{кі}}, \quad (1)$$

де F_{ij} – прибуток судна за рейс на і-му напрямку на j-му тижні, дол; R_{ij} – витрати судна за рейс на i-му напрямку на j-му тижні, дол; t_{pi} – час кругового рейсу, діб; f_{ij} – розмір фрахтової ставки на і-му напрямку на j-му тижні; Q_i – кількість вантажу на і-му напрямку, тон (приймається однакова кількість через аналіз роботи тільки одного судна та перевезення вантажу з однаковим ПНО); $R_{пні}$ та $R_{пві}$ – портові збори в порту навантаження та вивантаження на i-му напрямку відповідно, дол (приймаються з практичної діяльності); $R_{бij}$ – витрати на бункер на i-му напрямку, дол; $R_{пост}$ – постійні витрати судна, приймаються 2500 дол/добу помножені на час рейсу; $R_{кі}$ – витрати на проходження каналів на і-му напрямку (приймаються 10000 дол за проходження Босфору та Дарданелл відповідно до [13]); $П_{ні}$ та $П_{ві}$ – норми навантаження та вивантаження на і-му напрямку відповідно, т/добу, приймаються згідно чартер-партії помножені на 1,6 (SSHEX eiu); L_i – протяжність кругового рейсу на і-му напрямку, миль; V – швидкість судна, вузл; $t_{кі}$ – час на проходження каналів на і-му напрямку.

Витрати на бункер розраховуються за наступною формулою:

$$R_{бij} = Ц_{бj} \times \left(\frac{L_i \times q_{пх}}{V}\right) + \left(\frac{Q_i}{П_{ні}} + \frac{Q_i}{П_{ві}}\right) \times q_{пст} = Ц_{бj} \times \left(t_{хі} \times q_{пх} + t_{сті} \times q_{пст}\right) = 600 \times \left(6,3t_{хі} + 0,46t_{сті}\right), \quad (2)$$

де $Ц_{бj}$ – ціна на бункер на j-му тижні, приймається 600 дол/т; $q_{пх}$ та $q_{пст}$ – витрати палива судна ходові та стоянкові відповідно;

Таким чином, нижче розраховані показники для кожного з напрямків для рівня фрахтових ставок 47-го тижня 2023 року (j = 1), що приймаються згідно до [11]:

Далі пропонуються алгоритми вибору напрямку ($Варіант_k$, $k = \overline{1,t}$) експлуатації судна на рейс в залежності від стану ринку:

– Варіант 1 – завжди найшвидший рейс, t_{pi} = min;

– Варіант 2 – завжди найбільша фрахтова ставка, f_{ij} = max;

Таблиця 2

Розрахунки для кожного з напрямків $i = \overline{1,n}$ при $j = 1$

Напрямок	(1) Ізмаїл (I) – Бандірма	(2) I – Карасу	(3) I – Александрія	(4) I – Сфакс	(5) I – Барі	(6) I – Мерсін
$П_{ні}$, т/добу	3200	3200	3200	3200	3200	3200
$П_{ві}$, т/добу	2800	2800	2800	2400	3200	2800
L_i, миль	306	464	1590	2244	1830	1646
$R_{пні}$, дол	18 500	18 500	18 500	18 500	18 500	18 500
$R_{пві}$, дол	9300	9200	12 130	13 000	13 600	10 000
$R_{бij}$, дол	6902	8976	23 755	32 595	26 713	24 490
$R_{пост}$, дол	36 299	35 171	49 945	57 946	50 285	50 431
$R_{кi}$, дол	15 000	0	20 000	20 000	20 000	20 000
$t_{хi}$, діб	1,06	1,61	5,52	7,79	6,35	5,72
$t_{стi}$, діб	10,46	10,46	10,46	11,39	9,76	10,46
$t_{канi}$, діб	3	2	4	4	4	4
f_{i1}, дол/т	29	28	39,5	41,5	42,5	38,5
Q_i, тон	6100	6100	6100	6100	6100	6100
$t_{пi}$, діб	14,52	14,07	19,98	23,18	20,11	20,17
F_{i1}, дол	176 900	170 800	240 950	253 150	259 250	234 850
R_{i1}, дол	86 001	71 847	124 330	142 041	129 098	123 421
$ТЧЕ_{i1}$, дол/добу	6260	7033	5837	4793	6472	5524

– Варіант 3 – якщо ринок знижується або залишається на тому ж ріні, то обирається найшвидший рейс, а якщо ринок підвищується – то найдовший рейс, $f_{ij} \geq f_{i(j+tpi)} \Rightarrow t_{pi} = \min; f_{ij} < f_{i(j+tpi)} \Rightarrow$ $\Rightarrow t_{pi} = \max$;

– Варіант 4 – протилежність варіанту 3, $f_{ij} \leq$ $\leq f_{i(j+tpi)} \Rightarrow t_{pi} = \min; f_{ij} > f_{i(j+tpi)} \Rightarrow t_{pi} = \max$;

– Варіант 5 – випадкова постановка судна на рейс.

Варіант 1 націлений на максимізацію кількості виконаних рейсів за відповідний період експлуатації судна, варіант 2 – на максимізацію прибутку від кожного рейсу. Варіанти 3 та 4 запропоновані як «інтуїтивна» поведінка, при цьому не є взаємно сковуючими: при варіанті 3 обирається найшвидший рейс, щоб у випадку підвищення рівня ринкових фрахтових ставок закінчити швидкий рейс і обрати більш вигідний напрямок, а при варіанті 4 – «переждати» низький ринок на довгому рейсі. Варіант 5 доданий для порівняння.

Першим періодом, за яким проводиться вибір найбільш прибуткової ринкової поведінки, обирається 6 місяців (26 тижнів) – з 47-го тижня 2023 року по 21-й тиждень 2024 року – за цей період рівень фрахтових ставок здебільшого знижався. За результатами аналізу першого періоду, буде обраний найвигідніший варіант роботи судна, який буде перевірений та порівняний протягом другого періоду – другого півріччя 2024 року – за цей період рівень фрахтових ставок здебільшого залишався незмінним з підвищенням в кінці року.

Для аналізу ефективності роботи судна за кожним з запропонованих варіантів вводиться показник усередненого тайм-чартерного еквіваленту $\overline{ТЧЕ}_k$:

$$\overline{Ò \times Å}_k = \frac{\sum_1^m Ò \times Å_{ij}}{\sum_1^t n_{ðk}}, \qquad (3)$$

де n_{pk} – кількість рейсів при k-му варіанті.

Отримуємо наступні результати:

З результатів бачимо, що при роботі на ринку, що знижується, найбільш ефективний варіант роботи – це максимізація кількості рейсів (обираються найкоротші рейси), а другий за ефективністю варіант – це варіант 3 – обирати найшвидші рейси, а при підвищенні ринку – найдовші.

За аналогічним алгоритмом, повторюються прорахунки за другий період, і порівняння наводяться нижче.

Отже при експлуатації судна на ринку, що підвищується, найвигіднішим знову є варіант з найшвидшими рейсами, а другий за ефективністю – варіант 4 – або «пережидання» зниження ринку на найдовшому рейсі. «Випадковий» варіант роботи судна в обох варіантах є найзбитковішим.

При цьому, якщо поєднати варіанти 3 та 4 і використовувати їх залежно від сезонних очікувань, то $\sum \overline{ТЧЕ}_k$ за рік $((\overline{ТЧЕ}_3 - 1 + \overline{ТЧЕ}_4 - 2)/2)$ буде дорівнювати 3577 долл/добу, що є другим за вигідністю варіантів після варіанту 1 – завжди найшвидші рейси.

Таблиця 3

Результати варіантів роботи судна залежно від ринкової ситуації за першим експлуатаційним періодом

Рейс	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
1	Карасу $f_{201} = 28$	Барі $f_{501} = 42{,}5$	Барі $f_{501} = 42{,}5$	Барі $f_{501} = 42{,}5$	Барі $f_{501} = 42{,}5$
2	Карасу $f_{203} = 26{,}5$	Барі $f_{504} = 39{,}5$	Карасу $f_{204} = 26{,}5$	Сфакс $f_{404} = 39$	Мерсін $f_{604} = 36{,}5$
3	Карасу $f_{205} = 26{,}5$	Барі $f_{507} = 37{,}5$	Сфакс $f_{406} = 39$	Сфакс $f_{407} = 37$	Александрія $f_{307} = 35{,}5$
4	Карасу $f_{207} = 25{,}5$	Барі $f_{510} = 39$	Карасу $f_{209} = 26{,}5$	Карасу $f_{210} = 26{,}5$	Карасу $f_{210} = 26{,}5$
5 f_{203}	Карасу $f_{209} = 26{,}5$	Барі $f_{513} = 39$	Карасу $f_{211} = 26{,}5$	Карасу $f_{212} = 26{,}5$	Бандірма $f_{212} = 27{,}5$
6	Карасу $f_{211} = 26{,}5$	Барі $f_{516} = 39$	Карасу $f_{213} = 26{,}5$	Карасу $f_{214} = 26{,}5$	Бандірма $f_{114} = 28{,}5$
7	Карасу $f_{213} = 26{,}5$	Барі $f_{519} = 36{,}5$	Карасу $f_{215} = 26{,}5$	Сфакс $f_{416} = 38$	Сфакс $f_{416} = 38$
8	Карасу $f_{215} = 26{,}5$	Барі $f_{522} = 32{,}5$	Карасу $f_{217} = 23{,}5$	Сфакс $f_{419} = 36$	Мерсін $f_{620} = 29$
9	Карасу $f_{217} = 23{,}5$	Барі $f_{525} = 26{,}5$	Карасу $f_{219} = 23$	Сфакс $f_{423} = 27{,}5$	Александрія $f_{323} = 29{,}5$
10	Карасу $f_{217} = 23$	–	Карасу $f_{221} = 21$	–	Карасу $f_{226} = 18$
11	Карасу $f_{221} = 21$	–	Карасу $f_{223} = 18{,}5$	–	–
12	Карасу $f_{223} = 18{,}5$	–	Карасу $f_{225} = 17{,}5$	–	–
13	Карасу $f_{225} = 17{,}5$	–	–	–	–
$\overline{ТЧЕ}_k$	5432	4770	5079	4680	4520

Таблиця 4

Результати варіантів роботи судна залежно від ринкової ситуації за першим та другим експлуатаційним періодом

Період	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3	Варіант 4	Варіант 5
$\overline{ТЧЕ}_k 1$	5432	4770	5079	4680	4520
$\overline{ТЧЕ}_k 2$	2430	1804	1593	2074	1339
$\sum \overline{ТЧЕ}_k / 2$, за рік	3931	3287	3336	3377	2929,5

Висновки. За результатами дослідження вище, були зроблені наступні висновки:

1. Спираючись на данні [11], вперше були надані у вигляді графіку ринкові фрахтові ставки на окремих експортних напрямках зернових вантажів з України за період 2023–2024 років, на відміну від BDI та його субіндексів, на які спираються у більшості статей, що присвячені дослідженню фрахтових ринків.

2. Були розроблені та запропоновані варіанти експлуатації судна в залежності від змін у стані фрахтового ринку – алгоритми вибору рейсу за одним зі суміжних напрямків.

3. За результатами розрахунку середнього *ТЧЕ* по кожному з варіантів з використанням фактичних ретроспективних значень фрахтових ставок було визначено, що при будь-якому стані фрахтового ринку найбільш ефективним варіантом є експлуатація судна на найшвидшому напрямку, а другим за ефективністю при ринку, що знижується, є обирання найдовших рейсів при підвищенні рівня фрахтових ставок, а на ринку, що зростає – «пережидання» зниження ринку на найдовшому рейсі.

Звичайно, у практичній діяльності, особливо у період особливого дисбалансу попиту та пропо-

зиції, вибір напрямків для експлуатації судна може бути обмеженим, і результати цього дослідження не є ідеальними через відсутність зворотних вантажів – тому подальші перспективи розвитку даного напрямку є: детальний аналіз та візуалізація більшості вантажопотоків усього Чорного та Середземного морів залежно від тоннажу; розвиток запропонованого алгоритму з урахуванням зворотних вантажів та ціни на бункер; детальний огляд факторів невизначеності, що впливають на рівень фрахтового ринку та результати окремого рейсу; моделювання розстановки флоту з різним тоннажем та формою власності з урахуванням факторів невизначеності та волатильності фрахтового ринку, та апробація результатів, спираючись на фактичний рівень фрахту.

Список літератури:

1. UNCTAD statistics. URL: unctadstat.unctad.org (дата звернення: 20.02.2025).
2. Vyshnevska, O. D., Vyshnevskyi D. O., Onyshchenko S. P. Modeling of the distribution of the vessels' time budget under long-term freight contracts within conditions of uncertainty. *Development of management and entrepreneurship methods on transport*. 2019. No 4(69). С. 15–25. DOI: 10.31375/2226-1915-2019-4-15-25
3. Onyshchenko, S. P., & Koskina, Y. O. Ensuring the given level of the voyage efficiency considering the risks factors associated with the charter party terms. *Reporter of the Priazovskyi State Technical University*. *Section: Technical Sciences*. 2018. No. (37). С. 192–201. https://doi.org/10.31498/2225-6733.37.2018.160296
4. Онищенко, С. П., & Коскіна, Ю. О. Дослідження впливу умов оферти на успішність укладання фрахтової угоди. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Вип. 6(3(78). 25–32. https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55738
5. Manolis G. Kavussanos. Comparisons of Volatility in the Dry-Cargo Ship Sector. *Journal of Transport Economics and Policy*. January 1996.
6. Lu Jing, Peter B. Marlow & Wang Hui. An analysis of freight rate volatility in dry bulk shipping markets, *Maritime Policy & Management: The flagship journal of international shipping and port research*. 2008. No. 35:3. С. 237–251. DOI: 10.1080/03088830802079987
7. Jane Jing Xu, Tsz Leung Yip, Peter B. Marlow. The dynamics between freight volatility and fleet size growth in dry bulk shipping markets, *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*. 2011. Volume 47(6). С. 983–991. ISSN 1366-5545, https://doi.org/10.1016/j.tre.2011.05.008
8. Sudnyk, N., & Sofronov, A. Огляд фрахтового ринку України в умовах війни. *Розвиток транспорту*. 2024. Вип. (1(20). С. 91–99. https://doi.org/10.33082/td.2024.1-20.08
9. Коскіна Ю. О., Решетков Д. М., Тихонін В. І. Вантажопотоки експортних сухих масових вантажів у портах України. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2024. Вип. 35 (74) № 1. С. 179–184. DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/28
10. Стан зовнішньої торгівлі продуктами АПК: інтерактивна таблиця. URL: https://surl.li/cevohl (дата звернення: 20.02.2025).
11. ISM Freight Report. URL: https://ismreport.com/freight-chartering/ (дата звернення: 20.02.2025).
12. Onyshchenko S., Onyshchenko A. Dry bulk freight market research based on correlation and regression analysis. *Розвиток методів управління та господарювання на транспорті: Зб. наук. праць*. 2022. Вип. 2(79). С. 5–17. DOI 10.31375/2226-1915-2022-2-5-17
13. Turkish Straits Transit Proforma. URL: https://www.turkishstraits.com/proforma (дата звернення: 20.02.2025).

Sofronov A. I., Sudnik N. V. ALGORITHM OF SELECTION OF VESSEL'S VOYAGE CONSIDERING FREIGHT MARKET VOLATILITY

Dry bulk shipping is the most important part of world trade, and in the context of Ukraine, grain export is a strategically important part of the economy. And unlike liner shipping, the level of freight rates is more prone to short-term volatility and depends on a larger number of factors. This paper examines the problem of tactics for choosing the direction of vessel operation in conditions of high volatility of the freight market. In particular, the operation of coaster-type vessels in the flow of grain cargo from Ukraine is considered. In conditions of market instability and changes in the level of freight rates, shipping companies are faced with the need to choose a strategy that will maximize profits. Based on the actual freight rates for 2023–2024, an algorithm for making decisions on choosing the most profitable option for operating a vessel has been developed. The paper analyzes retrospective freight rates on individual export routes and proposes several strategies for choosing a voyage depending on market dynamics. Various scenarios of vessel operation were considered, including choosing the fastest route, choosing the route with the highest freight rate, as well as hybrid strategies that take into account general market trends.

According to the results of the study, it was found that the most effective strategy is to maximize the number of completed voyages, especially in conditions of a falling market. At the same time, when the level of freight rates increases, it is more effective to choose the longest voyages, which allows you to "outwait" low freight rates. The value of this work lies in the practical orientation of the results, which can be used by shipping companies and freight managers to optimize fleet operation. The conclusions obtained can serve as the basis for further research in the field of risk management and adaptation of business strategies in shipping in conditions of a changing market.

Key words: *freight market, uncertainty, vessel operation, voyage selection, comparative analysis.*

УДК 656.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/45

Степанов О. В.
Національний університет біоресурсів і природокористування України

Волобуєва Т. В.
Одеська державна академія будівництва та архітектури

ДІАГНОСТИЧНА МОДЕЛЬ ОЦІНКИ СТАНУ ВАНТАЖНОГО АВТОТРАНСПОРТУ

Для експлуатаційної надійності вантажного автотранспорту особливого значення набуває їх повноцінне використання, запобігання передчасному зношуванню агрегатів, механізмів та деталей. Метою статті є розгляд діагностичної моделі оцінки дефектів вантажного автотранспорту та розробка алгоритму оцінки його працездатності. Визначено, що технічний стан вантажного автотранспорту в процесі експлуатації не залишається незмінним і в міру збільшення пробігу погіршується. При збільшенні пробігу автотранспорту інтенсивність зношування деталей силових агрегатів вантажного автотранспорту оцінюється їх технічним станом, який своєю чергою визначається в результаті технічного діагностування. Системи планово-попереджувальних робіт, що існують та стратегії технічних обслуговувань й ремонтів із застосуванням технічного діагностування не гарантують експлуатаційну надійність вантажного автотранспорту. Доведено, що основною ланкою підтримки експлуатаційної надійності вантажного автотранспорту є бортова діагностика його технічного стану. Для реалізації концепції бортової технічної діагностики використовується діагностична модель, яка ґрунтується на допускових засобах діагностування. Вона характеризується тим, що висновок про надійність функціонування об'єкта робиться на підставі оцінки сукупності діагностичних параметрів. Зроблено висновок, що застосування діагностичної моделі з урахуванням засобів технічного діагностування дозволить оцінити сукупність діагностичних параметрів та здійснити пошук дефектів. При цьому синтез об'єкта щодо глибини діагностування дозволяє розмістити структурні елементи діагностування вантажного автотранспорту. Відповідно, радикальним засобом підвищення експлуатаційної надійності вантажного автотранспорту є використання засобів бортової діагностики на рівні конструкції агрегатів та вузлів з виведенням результатів діагностики на блок відображення інформації.

Ключові слова: *вантажний автотранспорт, діагностична модель, технічний стан, технічна діагностика, дефекти.*

Постановка проблеми. Під час розвитку системи планово-попереджувальних робіт (ППР) розроблено безліч способів, методів, стратегій технічних обслуговувань та ремонтів для вантажного автотранспорту (надалі – автотранспорт). Система ППР передбачає технічне діагностування та виконання робіт певних видів технічного обслуговування і ремонту. Технічне обслуговування в системі ППР є головним профілактичним заходом, що проводиться з метою запобігання підвищеному зносу деталей та вузлів автотранспорту [1].

Розроблено різні стратегії технічного обслуговування, а саме: загальноприйнята стратегія (напрацювання); стратегія обслуговування з технічного стану; стратегія єдиного технічного обслуговування; єдине технічне обслуговування із застосуванням діагностування; контрольно-виконавча система технічного обслуговування; система забезпечення працездатності автотранспорту [9, 10, 13]. Найпоширенішою вважається загальноприйнята стратегія, яка рекомендується заводами-виробниками. Для автотранспорту загальноприйнята стратегія складається із щоденного технічного обслуговування, сезонного обслуговування, діагностування та поточного ремонту.

У процесі експлуатації технічний стан автотранспорту не залишається незмінним і в міру збільшення пробігу погіршується. Тобто для автотранспорту особливого значення набуває їх повноцінне використання, запобігання передчасному зношуванню агрегатів, механізмів та деталей автотранспорту.

Під час експлуатації інтенсивність зношування деталей силових агрегатів автотранспорту визначається їх технічним станом, який, що своєю чергою, оцінюється за допомогою технічного діагностування. Основною компонентою підтримки експлуатаційної надійності автотранспорту

є бортова діагностика його технічного стану. Для реалізації цієї концепції використовується діагностична модель, що заснована на допускових засобах діагностування. Відповідно до цього застосування діагностичної моделі з урахуванням засобів технічного діагностування дозволяє оцінити сукупність діагностичних параметрів, стан автотранспорту та здійснити пошук дефектів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням експлуатаційної надійності автотранспорту присвячені різнопланові роботи В. Я. Аніловича, О. В. Бажинова, В. Н. Варфоломєєва, С. В. Венцеля, М. А. Єлизаветіна, М. С. Ждановського, О. В. Закалова, О. П. Кравченка, І. В. Крагельського, Б. І. Костецького, М. В. Кондрачука, А. Т. Лебедєва, О. В. Мельниченка, Л. В. Назарова, М. А. Подригало, В. М. Ткачова й ін. Науковцями доведено, що інтенсивність зношування деталей силових агрегатів автотранспорту залежить як від дорожніх умов, що формують їх режим роботи, так і від складу вантажів, які перевозяться автотранспортом [6, 7, 8, 11]. При збільшенні пробігу поточна частина оцінюється їх технічним станом, який своєю чергою визначається в результаті технічного діагностування [1, 4, 8].

Проведеними дослідженнями роботи автотранспорту (автосамоскидів КрАЗ) на породних відвалах вугільних шахт встановлено, що постійною причиною зміни технічного стану агрегатів автосамоскидів є знос їх деталей [2, 3, 5, 7]. Зокрема: абразивне зношування деталей у коробці передач і роздавальної коробки; знос гумотехнічних виробів; знос гальмівних накладок та гальмівних барабанів; знос наконечників рульових тяг; зношування циліндро-поршневої групи двигуна, елементів підвіски, підрамника й ін. [11, 12]. Необоротність процесу накопичення пошкоджень вузлів автосамоскида, особливо балансира підіймального механізму вантажної платформи та підрамника кузова автосамоскида, підтверджується статистичними даними, зібраними при ремонтах автосамоскидів (рис. 1).

Відзначимо, що контролювати запиленість в агрегатах та перевантаження вантажної платформи породою в автосамоскидах КрАЗ неможливо через відсутність бортової технічної діагностики.

Аналіз наукових джерел [8–10] свідчить, що для визначення ролі технічного діагностування в системі обслуговування та поточного ремонту автотранспорту, його класифікують за основними організаційними ознаками [8]. Технічне діагностування включає ряд технологічних операцій, спрямованих на визначення технічного стану автотранспорту. Процес діагностування полягає в постановці діагнозу на основі логічної обробки інформації, яку надають засоби технічного діагностування [2, 4]. Для досягнення цього необхідно створити узагальнену структуру виконання аналізу діагностичної моделі, що дозволить отримати необхідне діагностичне забезпечення. Це дає змогу точно оцінювати стан технічного обслуговування та своєчасно виявляти несправності.

Постановка завдання. Мета статті – розглянути діагностичну модель оцінки стану вантажного автотранспорту для здійснення пошуку дефектів та розробити алгоритм оцінки працездатності на основі результатів бортової діагностики.

Виклад основного матеріалу. Аналіз експлуатації автотранспорту показав, що величина навантаження значно впливає на механізм руйнування твердого тіла. При поступовому збільшенні навантаження спочатку виникають пружні деформації, потім відбувається пластична деформація твердого тіла, а зрештою – його розрив (див. рис. 1).

З'ясовано, що основною ланкою підтримки експлуатаційної надійності автотранспорту є бор-

а *б*

Рис. 1. Руйнування балансира підіймального механізму кузова (а) та деформація підрамника кузова (б) автосамоскида КрАЗ при роботі на породних відвалах (фото авторів)

това технічна діагностика (надалі – діагностика) його технічного стану. Для реалізації концепції діагностики використовується діагностична модель, яка ґрунтується на допускових засобах діагностування [8]. Вона характеризується тим, що висновок про правильність функціонування об'єкта робиться на підставі якісної оцінки сукупності діагностичних параметрів. На основі збудованої моделі здійснюється пошук дефектів.

Зазначимо, в більшості діагностичних моделей та методів аналізу питання функціонального діагностування розглянуто недостатньо, що ускладнює практичне застосування методів та відповідних їм алгоритмів діагностування [1, 4]. Для цього потрібна узагальнена структура виконання аналізу діагностичної моделі для отримання діагностичного забезпечення автотранспорту.

Для вирішення цього завдання та з метою обґрунтованого вибору сукупності діагностичних показників, що достатні для розв'язання задачі з оцінки стану автотранспорту, необхідно впорядкувати безліч діагностичних показників, які характеризують його стан. Тобто побудувати їх у ряд по черзі, що визначається обраними критеріями.

Проаналізуємо діагностичну модель для оцінки стану автосамоскида. Припустимо, що діагностична модель автосамоскида містить у явному вигляді безліч $B_n(B_n) = \{b_{ni}\}$, $i = 1, 2, \ldots, N$ прямих показників ($B_n \subset B$), що характеризують стан об'єкта. Вони входять у діагностичну модель як аргументи чи коефіцієнти алгебраїчних і диференціальних рівнянь, операторів гілок та інших величин, які безпосередньо присутні в моделі.

Через технічні труднощі та з урахуванням економічної вигоди вибираємо з безлічі B_n прямих показників сукупності B_n $(\overline{B}_n = \{b_{ni}\}\ i = 1, 2, \ldots, m)$ для їх вимірів та оцінки в процесі діагностування.

Сукупність $\overline{B}_n$ повністю впорядковується запровадженням відношення порядку P_1 у припущенні, що $b_{ni=p} > b_{ni=q}$, якщо $u(b_{ni=p}) > u(b_{ni=q})$, де $u(b_{ni})$ визначається на елементах $B_п^э$, вигляд його залежить від умов експлуатації автосамоскида.

Якщо $\overline{B}_n = B_n^э$, то введений порядок дозволяє безпосередньо розробити алгоритм та програму діагностування. У цьому випадку програма передбачає послідовність оцінки показників b_{ni} у порядку, що визначено P_1.

Якщо $\overline{B}_n \subset B_n^э$ та $\overline{B}_n \neq B_n^э$, то визначається різниця $S = B_n^э / \overline{B}_n$ і вибирається підмножина $B_к(B_к = \{b_{кj}\}, j = 1, 2, \ldots, n)$ не прямих показників. При цьому потужність множини $B_к$ має бути такою, щоб повністю компенсувати неоцінювані прямі показники, тобто різницю S.

Підмножина непрямих показників $B_к$ повністю впорядковується запровадженням порядку P_2 у припущенні, що $b_{кj=p} > b_{кj=q}$ якщо $v(b_{кj=p}) > v(b_{кj=p})$. Щодо критерію $v(b_{кj})$, який визначається на елементах $B_к$, використовується норма вектора чутливості $v(b_{кj}) = ||v(b_{кj})||$.

При експлуатації автосамоскида значення прямих показників b_{ni} можуть змінитися, що порушує введений порядок P_2. Тому після його запровадження доцільно встановити межі зміни показників b_{ni}, у яких порядок P_2 збережеться.

Таким чином, впорядкована безліч $B_к$ непрямих показників повністю визначає алгоритм та програму діагностування (оцінка $B_к$ в порядку P_2).

Достатність сукупностей прямих і непрямих показників з метою оцінки стану об'єкта із заданою точністю визначається величиною ймовірності:

$$p(m,n) = \left[\sum_{i=1}^{m} u(b_{ni}) + \sum_{j=1}^{n} v(b_{кj})\right]\left[\sum_{i=1}^{M} u(b_{ni}) + \sum_{j=1}^{N} v(b_{кj})\right]^{-1}, \quad (1)$$

де: m – кількість оцінюваних прямих показників; n – кількість оцінених непрямих показників.

За необхідності забезпечити можливість близької $p_0 = 1$ повинні дотримуватися рівності $m = M$ та $n = N$, тобто оцінюються прямі та непрямі показники з певним ступенем ймовірності. Якщо задана величина $p_0 < 1$, тоді кількість оцінюваних прямих і непрямих показників вибирається з урахуванням порядків, що вводяться P_1 і P_2 так, щоб дотримувалася умова $p(m, n) \geq p_0$. Якщо остання умова не задовольняється, необхідно переглядати обрану сукупність $\overline{B}_n$ і відповідно $B_к$, щоб задовольнити вимогу вірної оцінки стану об'єкта за заданою ймовірністю p_0.

Після того, як сформовані сукупності $\overline{B}_n$ та $B_к$, що задовольняють умові $p(m, n) \geq p_0$, необхідно визначити умови працездатності (УР) та подібні дефекти (ПД) у об'єкті. Ці умови та ознаки визначаються як допустимі області зміни оцінюваних показників $\overline{B}_n$ та $B_к$ і, отже, є безліччю $\{УР_i\}$, $\{УР_j\}$, $\{ПД_i\}$, $\{ПД_j\}$ величин меж допустимих змін оцінюваних показників.

Згодом даний етап розробки діагностичного забезпечення закінчується вибором методів оцінки прямих та непрямих показників, що характеризують стан об'єкта. На завершення процедури розробки діагностичного забезпечення будується алгоритм та програма діагностування автосамоскида.

Автосамоскид складається з різних структурних одиниць, які слід діагностувати через проміжки часу. У цьому випадку програма діагностування має враховувати різні періоди перевірки структурних одиниць. Відповідно до цього програма складена у два етапи. На першому етапі згруповано окремі блоки за періодами їх перевірок. На другому етапі – визначено послідовність перевірок.

Якщо для показників, що характеризують безвідмовність окремих частин автосамоскида, використовувати інтенсивність відмов, а для характеристики їх контролепридатності – тривалість діагностування, то можна побудувати програму для всього автосамоскида в заданий час. Тобто використання діагностування дає необхідний ефект лише за умови задоволення вимог пристосовності автосамоскида до діагностування.

У цьому випадку умову діагностування можна визначити математично з рівняння

$$\overline{Y} = \overline{B}_n^э \overline{X}, \qquad (2)$$

де: $\overline{Y}$ – полівектор першого рангу, що описує безліч вихідних параметрів об'єкта діагностування; $\overline{X}$ – полівектор першого рангу, що описує безліч вхідних параметрів об'єкта діагностування; $\overline{B}_n^э$ – полівектор другого рангу, що описує безліч прямих діагностичних параметрів.

Компоненти $B_п^э = \{b_{ij}\}$ залежать від конструкційних параметрів та характеристик елементів, з яких складається об'єкт:

$$b_{ij} = \varphi_{ij}(k_1, k_2, \ldots, k_{s-1}, k_s), \quad \forall i, j = 1, 2, \ldots, n, \quad (3)$$

де: $k_1, \ldots, k_s$ – конструкційні параметри та характеристики елементів об'єкта діагностування; s – загальна кількість конструкційних елементів технічного об'єкта.

Математичною умовою діагностування об'єкта по входах $\overline{X} = \{x_i\}$ і виходам $\overline{Y} = \{y_j\}$ є лінійна незалежність рівнянь зв'язку:

$$\sum_{i,j}^{n} c_{kij} b_{ij} = c_{kij} b_{ij} = 0, \quad \forall k = 1, 2, \ldots, l; i, j = 1, 2, \ldots, n, \quad (4)$$

або нерівності нулю визначника $\det C \neq 0$, де $C = \{c_{kij}\}$ – полівектор третього рангу постійних характеристик системи, отриманих з аналізу системи рівнянь $b_{ij} = \varphi_{ij}(k_1, k_2, \ldots, k_{s-1}, k_s)$ та не залежні від зміни стану об'єкта діагностування та зовнішніх змінних.

Зауважимо, що вираз $c_{kij} b_{ik} = 0$ є необхідною умовою, а залежність $\det C \neq 0$ – необхідною та достатньою умовою.

Наведені умови діагностування справедливі, якщо об'єкт має такі властивості:

1) стан об'єкта діагностування характеризується сукупністю оцінюваних прямих показників $B_n^э = \{b_{ij}\}$, $(\forall i, j = 1, 2, \ldots, n)$;

2) аналіз структури об'єкта діагностування дозволяє скласти

$l = (n - 1)n$ рівнянь зв'язку виду $c_{kij} b_{ij} = 0$, $(\forall k = 1, 2, \ldots, l; i, j = 1, 2, \ldots, n)$;

3) входи $\overline{X} = \{x_i\}$ та виходи $\overline{Y} = \{y_j\}$, $(\forall i, j = 1, 2, \ldots, n)$ об'єкта діагностування – контрольовані.

Алгоритм технічного діагностування є послідовністю операцій з оцінки обраних прямих $B_n^э$. та непрямих $B_к^э$ діагностичних показників під час експлуатації автосамоскида (рис. 2).

Для цього до обчислювального блоку інформації надходить комплекс сигналів $p_{ij}(t) = \Phi[q_{ij}(t)]$, які ідентифікуються з вихідними характеристиками $\{y_j\} \equiv Y$ автосамоскида.

Відповідно до концепції бортової діагностики автосамоскида необхідно вибрати таку підмножину елементів $b \in B$ з безлічі вихідних характеристик $\{y_j\} \equiv Y$ автосамоскида, що однозначно будь-якої миті часу визначили технічний стан контрольованого об'єкта.

Діагностичні характеристики автосамоскида за певних умов експлуатації містять у явному вигляді безліч $B_n^э (B_n^э = \{b_{ni}\}, i = 1, 2, \ldots, N)$ прямих показників ($B_n \subset B$) та підмножину $B_к^э (B_к^э = \{b_{кj}\}$, $i = 1, 2, \ldots, N)$ непрямих показників, що характеризують стан об'єкта.

Потужність множини $B_к^э$ повинна бути такою, щоб повністю компенсувати прямі показники, що не оцінюються. Якщо автосамоскид відповідає умові діагностування, необхідно провести синтез об'єкта діагностування щодо кількості точок і глибини діагностування. Це дозволяє отримати оптимальне діагностичне забезпечення контролю за технічним станом автосамоскида з метою підвищення його експлуатаційної надійності.

Висновки. Аналіз роботи автосамоскидів показав, що зростання витрат на підтримку їх працездатності призводить до збільшення собівартості вантажоперевезень. Це зумовлено, по-перше, недостатньо організованою технічною діагностикою та ремонтом автосамоскидів, по-друге, конструкцією автосамоскидів, що не мають належної бортової технічної діагностики. Цю проблему можна вирішити, по-перше, шляхом впровадження ліній інструментального технічного контролю на автопідприємствах, по-друге,

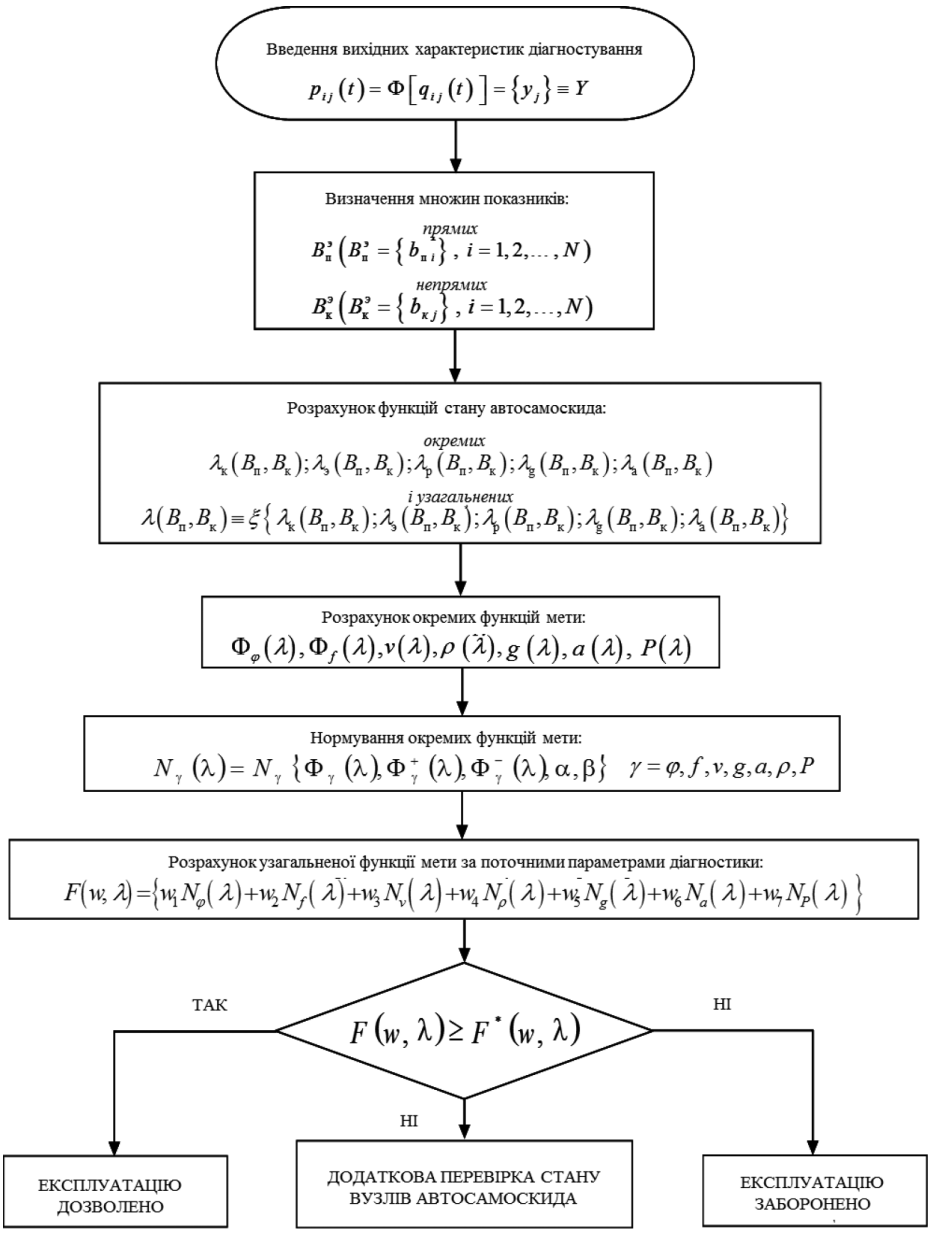


Рис. 2. Блок-схема алгоритму обробки інформації з бортової технічної діагностики автосамоскида

оснащенням автосамоскидів вбудованими системами бортової технічної діагностики [13, 14].

Запропонований алгоритм оцінки працездатності на основі результатів бортової діагностики дозволяє визначати ступінь надійності автотранспорту. Одним із ефективних способів підвищення експлуатаційної надійності є інтеграція засобів бортової технічної діагностики в конструкцію агрегатів і вузлів з виведенням результатів на інформаційний блок, що є перспективним напрямом для подальших досліджень.

Список літератури:

1. Порядок проведення технічного огляду, випробування та експертного обстеження (технічного діагностування) машин, механізмів, устаткування підвищеної небезпеки. Постанова Кабінету Міністрів України від 26 травня 2004 р. N 687(редакція від 01.05.2022).

2. Про затвердження Порядку проведення технічного діагностування. Постанова Кабінету Міністрів України № 1078 від 11.11.2016.

3. ДСТУ 2823-94 Зносостійкість виробів тертя, зношування та мащення. Терміни та визначення. Київ. Держстандарт України.

4. ДСТУ 3960-2000. Система технічного діагностування технічних засобів. Київ. Держстандарт України.

5. Венцель С. В. Змащення та довговічність двигунів внутрішнього згоряння. К. *Техніка*, 1977. 204 с. 5. https://t.me/specmachinery_com_ua

6. Закалов О. В. Основи тертя і зношування в машинах: Навчальний посібник. Тернопіль : Видавництво ТНТУ ім. І. Пулюя, 2011. 322 с.

7. Кондрачук М. В., Хабутель В. Ф., Пашечко М. І., Корбут Є. В. Трибологія. К. : Вид-во Національного Авіаційного університету «НАУ-друк», 2009. 232 с.

8. Мельниченко А. А. Технічне діагностування транспортних засобів: новітні методи і практичні аспекти. *Технічна механіка*, 2019. С. 92–101.

9. Петров, О. В. Автотранспортні підприємства: Організація та управління технічним обслуговуванням. Київ : НТУ, 2011. 228 с.

10. Сорокін, В. І. Інженерія транспорту та логістики: Теорія та практика. Харків : ХНТУ, 2014. 280 с.

11. Степанов О. В. Вплив фізико-механічних властивостей гірських порід, що перевозяться на надійність вантажного автомобіля. *Автомобільне та тракторобудування*. Вісник НТУ «ХПІ», 2004. № 2. С. 115–118.

12. Степанов О. В., Волобуєва Т. В., Лемішко Д. С. Оптимізація оцінки технічного стану агрегатів. *Енергетичні установки та альтернативні джерела енергії* : зб. тез та доп. міжнар. конф., 11–12 берез. 2024 р. / М-во освіти і науки України, Харків. нац. автомоб.-дор. ун-т. Харків : ФОП Бровін О. В., 2024. С. 253–256.

13. Патент № 31744. Україна, МПК G06F 11/30. Система дистанційної діагностики технічного стану автосамоскида, що працює на породних відвалах вугільних шахт; заявл. 02.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8. 4 с.

14. Патент № 31745. Україна, МПК G01R 27/00. Пристрій діагностики забруднення мастила в агрегатах автомобіля; заявл. 02.11.2007; опубл. 25.04.08, Бюл. № 8. 4 с.

15. Шевченко М. С. Проблеми та перспективи розвитку систем технічного обслуговування транспортних засобів. К. : *Техніка*, 2010. 420 с.

Stepanov O. V., Volobuyeva T. V. DIAGNOSTIC MODEL OF CONDITION ASSESSMENT OF FREIGHT TRANSPORT

For the operational reliability of trucks, their full utilization and prevention of premature wear and tear of units, mechanisms and parts are of particular importance. The aim of the article is to consider a diagnostic model for assessing defects in freight vehicles and to develop an algorithm for assessing its performance. It is determined that the technical condition of freight vehicles during operation does not remain unchanged and deteriorates with increasing mileage. With an increase in the mileage of motor vehicles, the intensity of wear of parts of the power units of freight vehicles is assessed by their technical condition, which in turn is determined as a result of technical diagnostics. Existing systems of planned preventive maintenance and strategies of maintenance and repair with the use of technical diagnostics do not guarantee the operational reliability of freight vehicles. It is proved that the main link in maintaining the operational reliability of freight vehicles is on-board diagnostics of their technical condition. In order to implement the concept of on-board technical diagnostics, a diagnostic model based on the tolerance diagnostic tools is used. It is characterized by the fact that the conclusion about the reliability of the object's functioning is made on the basis of an assessment of a set of diagnostic parameters. It is concluded that the application of the diagnostic model, taking into account the means of technical diagnostics, will allow to evaluate the set of diagnostic parameters and search for defects. At the same time, the synthesis of the object in terms of the depth of diagnosis allows to place the structural elements of diagnosing freight vehicles. Accordingly, a radical means of increasing the operational reliability of freight vehicles is the use of on-board diagnostics at the level of the design of units and assemblies with the output of diagnostic results to the information display unit.

Key words: *freight vehicles, diagnostic model, technical condition, technical diagnostics, defects.*

УДК 656.13
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/46

Шапенко Є. М.
Національний транспортний університет

Котова С. О.
Національний транспортний університет

Білоног О. В.
Національний транспортний університет

СУЧАСНІ ТЕНДЕНЦІЇ ТА ПЕРСПЕКТИВИ СТАЛОГО РОЗВИТКУ СИСТЕМИ МІСЬКОГО ПАСАЖИРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

Стаття присвячена проблематиці міської мобільності як однієї з ключових рушійних сил урбанізації, що безпосередньо впливає на соціально-економічний розвиток міст і регіонів. Незважаючи на динамічний розвиток транспортних систем у світі, доступність робочих місць, соціальних послуг і економічних можливостей залишається гострою проблемою. Визначено, що сьогодні багато міст стикаються з кризою доступності, яка зумовлена неефективною транспортною інфраструктурою, надмірною автомобілізацією, заторами та значними екологічними викликами.

У статті досліджено урбанізаційні процеси в Україні, які супроводжуються трансформацією моделей міської мобільності та потребують комплексного підходу до формування сталої транспортної системи. З'ясовано, що зростаюча чисельність міського населення визначає мобільність як важливий напрям державної політики.

Отже, актуальність дослідження обумовлена необхідністю розробки ефективних транспортних рішень, що забезпечать комфортне, екологічно безпечне та доступне пересування для населення, а також сприятимуть розвитку бізнес-середовища та інвестиційної привабливості регіонів.

У статті розкрито концепцію сталого розвитку міського пасажирського транспорту як основи для модернізації транспортної системи України, що включає зменшення шкідливого впливу транспорту на довкілля, раціональне використання інфраструктури та впровадження сучасних інноваційних технологій у сфері перевезень. Визначено, що зміна клімату, підвищені вимоги до якості міського середовища та євроінтеграційні процеси збільшують потребу в розширенні мережі екологічного громадського транспорту, створенні комфортних умов для пішоходів і велосипедистів, а також у розвитку інтелектуальних транспортних систем, які сприятимуть підвищенню ефективності перевезень і мінімізації транспортних витрат.

У статті проаналізовано сучасні тенденції у сфері міської мобільності, що дозволяють визначити стратегічні пріоритети державної політики, сприяти раціональному використанню ресурсів та забезпечити збалансований розвиток транспортної інфраструктури міст і регіонів. Інтеграція сталих транспортних рішень у міське планування є необхідною умовою створення комфортного та екологічно безпечного життєвого простору, що відповідатиме сучасним викликам та сприятиме підвищенню якості життя населення.

Ключові слова: *сталий розвиток пасажиропотоки, Smart City, розумні міста, міський пасажирський транспорт, урбанізація, мобільність, пасажирські перевезення.*

Постановка проблеми. Сучасні тенденції розвитку міської мобільності вказують на поступовий перехід до принципів сталої мобільності, що передбачають розвиток саме громадського транспорту, впровадження екологічно чистих видів перевезень, застосування інтелектуальних транспортних систем та технологій.

Для українських міст проблеми сталого розвитку системи міського пасажирського транспорту є актуальними на сьогодні через низку викликів, таких як застарілість інфраструктури, недостатня взаємодія різних видів транспорту, а також невідповідність існуючих транспортних систем потребам мешканців.

Система міського пасажирського транспорту відіграє важливу роль у забезпеченні соціально-економічного розвитку міст, оскільки впливає на якість життя населення, рівень мобільності та екологічний стан міських територій. Проте, сучасні проблеми, що пов'язані з інтенсивною

урбанізацією, зростанням кількості приватного автотранспорту, погіршенням екологічної ситуації та нерівномірним розвитком транспортної інфраструктури, створюють значні перешкоди для ефективного функціонування системи міського пасажирського транспорту.

Метою даного дослідження є аналіз сучасних тенденцій у сфері міського пасажирського транспорту та визначення перспектив його сталого розвитку в Україні. Визначення стратегічних пріоритетів у цій сфері дозволить сформувати науково обґрунтовані рекомендації щодо оптимізації транспортної політики, підвищення ефективності використання ресурсів та створення комфортного транспортного середовища для населення.

Таким чином, дослідження сучасних тенденцій та перспектив є актуальним завданням, результати якого можуть стати основою для розробки інноваційних підходів до реформування транспортної галузі та забезпечення її сталого розвитку.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Країни, що розвиваються, зазнають значних трансформацій у зв'язку зі стрімким економічним зростанням, збільшенням чисельності населення, урбанізацією та збільшенням рівня автомобілізації [1, с. 83].

У 2018–2024 роках 55 % світового населення проживало в містах. За прогнозами дослідників, до 2050 року показник зросте до 68 % [2, с. 1]. Так, наприклад в Азії мешкало 4.4 мільярда осіб, що становить 55 % світового населення світу [3, с. 1].

Неефективність системи громадського транспорту в містах є нагальними проблемами, що значною мірою залежать від просторових параметрів і щільності населення [4, с. 230]. Для вирішення цих складних викликів необхідне планування сталої міської мобільності

На сьогодні існує доволі широкий діапазон досліджень що присвячені вивченню технологій розумних міст та розвитку їх в Україні. Так, на думку вчених [5, с. 69] розвиток «розумних» міст із сталим розвитком транспортних систем залежить від багатьох факторів, серед яких основними є розвиток міських інформаційних мереж.

У дослідженні [6, с. 287] особлива увага приділяється розвитку міської інфраструктури, зокрема транспортної системи, яка має не лише задовольняти потреби сучасного суспільства, а й забезпечувати гідні умови життя для майбутніх поколінь. Такий підхід є надзвичайно актуальним у контексті дослідження сталого розвитку міського пасажирського транспорту, оскільки ефективне управління міською мобільністю має враховувати принципи екологічної безпеки, соціальної доступності та економічної ефективності, сприяючи збалансованому розвитку урбанізованих територій.

Науковці [7, с. 334] відзначають, що проблеми сталого розвитку системи міського пасажирського транспорту будь-якої держави стають проблемами її економічного розвитку та перешкоджають створенню повноцінних умов життя в суспільстві, оскільки якість функціонування транспортної системи безпосередньо пов'язана зі стандартом життя будь-якого суспільства. Розвиток системи міського пасажирського транспорту тісно пов'язаний з індексом людського розвитку, оскільки проблеми розвитку транспортної мережі призводять до зниження загального рівня життя в країні, що, своєю чергою, негативно впливає на якість життя окремих громадян.

Постановка завдання. Дослідження сучасних тенденцій та перспектив сталого розвитку міського пасажирського транспорту в Україні та світі і як результат – визначення тенденцій та перспектив для сталого розвитку системи міського пасажирського транспорту.

Виклад основного матеріалу. Сталий розвиток системи міського пасажирського транспорту має включає в себе заходи, реалізація яких, при мінімальних витратах дає максимальний результат. Це концепція, яка формує сучасний підхід у плануванні міських пересувань. Планування сталої міської мобільності допомагає ширше розглянути питання транспортної проблеми, і не тільки питання руху транспорту, який є інструментом для переміщення людей, а концентрується безпосередньо на людях і потребах їх переміщень, щоб знайти більш ефективні способи забезпечення потреб мобільності, які дозволять підняти якість життя у місті.

Ефективна система міського пасажирського транспорту являє собою складну мережу різних видів транспорту, яка має забезпечувати безперебійне та комфортне пересування мешканців міста. Така система повинна відповідати принципам сталого розвитку, мінімізуючи негативний вплив на довкілля та підвищуючи якість обслуговування пасажирів. Проте її вдосконалення пов'язане з низкою викликів та обмежень.

Серед ключових проблем, що перешкоджають сталому розвитку міського пасажирського транспорту, можна виділити наступні:

- конфлікт інтересів між різними учасниками транспортного процесу;
- недостатня ефективність управління транспортною системою. А саме, відсутність єдиного комплексного підходу до планування та регулю-

вання транспортної мережі призводить до дублювання маршрутів, незбалансованого використання рухомого складу і нераціонального розподілу пасажиропотоків;

• неефективне використання бюджетних коштів, що не відповідає реальним потребам, а нераціональне витрачання бюджетних коштів гальмує розвиток транспорту;

• відсутність сучасних транспортних вузлів, якісних доріг, велоінфраструктури та пішохідних зон обмежує мобільність населення та підвищує навантаження на наявні транспортні засоби;

• наявне законодавство не завжди враховує сучасні потреби транспортної галузі, що ускладнює впровадження нових технологій і механізмів управління транспортними потоками.

Концепція сталої міської мобільності передбачає, що на першому місці повинні бути пішоходи, потім громадський транспорт, далі велосипеди та легкий особистий транспорт [8, с 136]. Лише після цього йде логістика та доставка, автомобілі та, нарешті, приватні припарковані автомобілі.

Сьогодні більшість українських міст розвиваються за екстенсивним сценарієм на фоні автомобілізації, яка постійно зростає. Наприклад, у Києві на 1000 мешканців сьогодні припадає 257 автомобілів, у Львові – 180. Якщо нічого не робити, то за підрахунками експертів, уже у 2025 році у столиці на 1000 мешканців припадатиме 450 автомобілів, а середня поїздка забиратиме 2 години в одну сторону [9, с. 57].

На відміну від Києва та Львова, Полтава не має надмірної автомобілізації – тут зафіксовано лише 152 автомобілів на 1000 мешканців. Але до 2031 року в Полтаві прогнозується 330 автомобілів на 1000 мешканців. Наразі основний вид пересування у Полтаві – громадський транспорт (рисунок 1).

Планування сталої міської мобільності – це стратегічне планування сталого розвитку міського пасажирського транспорту в напрямку забезпечення сталої мобільності з акцентуванням уваги на мешканцях та їх потребах, що передбачає сприяння комплексній політиці (узгодження планів сталої міської мобільності з іншими міськими чи регіональними програмами), оптимізування системи міського пасажирського транспорту за рахунок впровадження інтелектуальних транспортних систем, озеленення міського транспорту, посилення фінансової підтримки впровадження запланованих дій та подальший моніторинг ефективності системи міської мобільності.

Розглянемо основні тенденції сталого розвитку міського пасажирського транспорту з точки зору аспектів сталого розвитку системи міського пасажирського транспорту:

У Лондоні активно розширюється мережа електричних автобусів у межах програми Zero Emission Bus [10, с. 1], яка передбачає поступове заміщення дизельного транспорту на електричний. Також введено зони з нульовими викидами (Ultra Low Emission Zone – ULEZ), що обмеж-

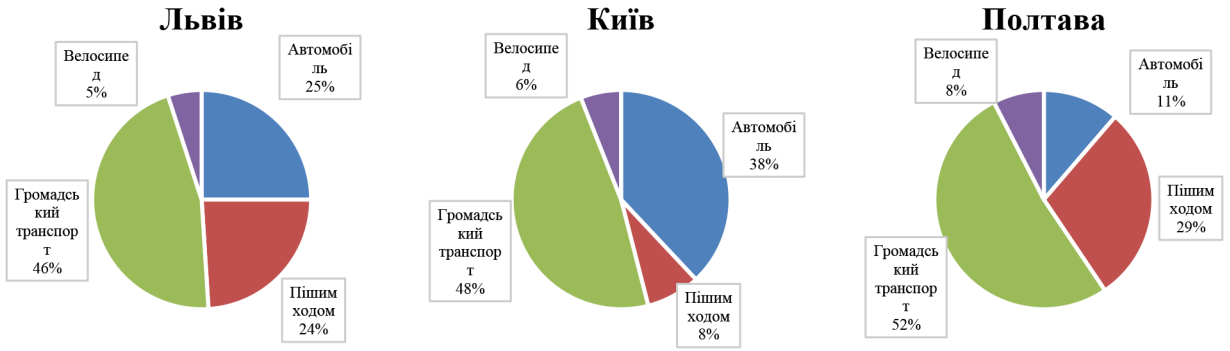


Рис. 1. Структура пересувань в містах

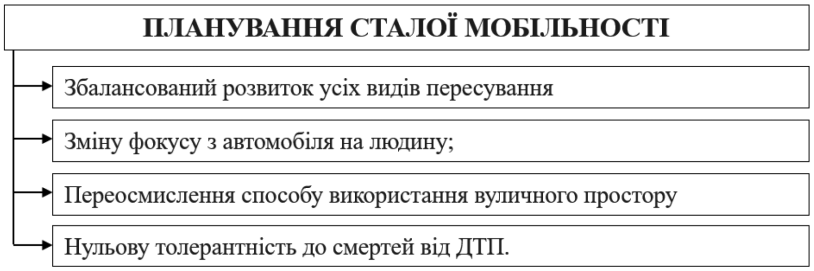


Рис. 2. Планування сталої міської мобільності

ують в'їзд автомобілів із високим рівнем забруднення.

У Парижі впроваджується масштабна програма розвитку велосипедного транспорту. Завдяки ініціативі Vélib' більше 20 000 велосипедів доступні для громадського прокату. У місті також активно обмежують автомобільний рух, створюючи зони, доступні лише для пішоходів і велосипедистів.

Сінгапур активно запроваджує систему інтелектуального управління дорожнім рухом, яка використовує штучний інтелект для аналізу потоків транспорту та регулювання світлофорів у режимі реального часу. Крім того, місто є лідером у випробуваннях автономного громадського транспорту.

У Амстердамі працює інтегрована система управління транспортом, що включає мобільні додатки, які дозволяють пасажирам у реальному часі планувати маршрути, комбінуючи громадський транспорт, велосипеди та каршеринг.

У місті Копенгаген понад 50 % мешканців користуються велосипедами для щоденних поїздок. Розвинена велоінфраструктура включає понад 400 км велодоріжок, а також «зелені хвилі» на світлофорах, які дають пріоритет велосипедистам.

Барселона впроваджує концепцію «суперблоків», що обмежують рух автотранспорту у певних районах, роблячи їх пішохідними зонами. Це дозволяє зменшити рівень шуму та покращити якість повітря.

Місто Токіо використовує систему Big Data для аналізу пасажиропотоків. Це дає змогу оперативно змінювати маршрути транспорту залежно від завантаженості певних ліній, що знижує рівень перевантаженості.

У місті Нью-Йорк розвивається система швидкісного автобусного сполучення (BRT – Bus Rapid Transit), що дозволяє створювати виділені смуги для автобусів, скорочуючи час поїздок.

Питання інклюзивності та доступності є актуальним для всіх міст. Так у Берліні запроваджено спеціальні програми для перевезення маломобільних груп населення. Громадський транспорт обладнаний зручними платформами та звуковими сповіщеннями для людей із порушеннями зору та слуху.

Місто Стокгольм реалізувало 100 % доступність громадського транспорту для людей з обмеженими можливостями, забезпечивши низькопідлогові автобуси, ліфти на станціях метро та тактильні смуги для незрячих.

Останніми роками в українських містах реалізуються проєкти, спрямовані на розвиток системи міського пасажирського транспорту та сталої мобільності, а саме: створення пішохідних вулиць, покращення мобільності школярів, розвиток зелених просторів, будівництво велоінфраструктури, трансформації вуличного простору та впровадження автоматизованої системи оплати проїзду в громадському транспорті. Аналіз цих практик дозволив виявити основні проблеми та перешкоди, які виникали під час реалізації проєктів, та рішення з їх усунення.

Серед основних ініціатив, поєднують екологічні, технологічні та планувальні інновації, що слід відзначити впровадження екоініціатив та зменшення викидів.

Перший етап передбачає створення зон з обмеженим транспортним доступом (Low Emission Zones). Наприклад, у Львові з 2022 року в історичному центрі заборонено в'їзд для авто із двигунами нижче євростандарту 4, що знизило викиди NO_2 на 22 %.

Другий напрям – зелені коридори. В Києві проект озеленення вулиці Хрещатик збільшив частку зелених зон на 15 %, покращивши якість повітря та зменшивши ефект міського «теплового острова» [5, с. 2]. За даними WHO, подібні ініціативи знижують рівень пилу PM2.5 на 10–18 %.

Висновки. Міська мобільність є важливим чинником соціально-економічного розвитку міст. В умовах постійно зростаючої урбанізації та автомобілізації необхідність формування сталої транспортної системи громадського транспорту набуває доволі великого значення. Дане дослідження підтверджує важливість комплексного підходу, що передбачає необхідність оптимізації використання інфраструктури, впровадження екологічних та інтелектуальних транспортних технологій, розвиток системи громадського транспорту та створення комфортних умов для пішоходів і велосипедистів. Інтеграція сталих транспортних рішень у міське планування дозволить досягти балансу між мобільністю, економічним розвитком та екологічною безпекою.

Аналіз практик великих міст показав необхідність впровадження ініціатив, таких як розробка зон з нульовими викидами, «суперблоки», а також впровадження системи планування маршрутів у реальному часі, сприятиме зменшенню рівня забруднення в містах, полегшить мобільність і підвищить ефективність використання транспортної інфраструктури.

Таким чином, реалізація сучасних тенденцій сталого розвитку системи міського пасажирського транспорту сприятиме покращенню якості життя населення, підвищенню інвестиційної привабливості регіонів та сталому розвитку міського середовища.

Список літератури:

1. Shahbaz, M.; Loganathan, N.; Muzaffar, A.T.; Ahmed, K.; Ali Jabran, M. How Urbanization Affects CO_2 Emissions in Malaysia? The Application of STIRPAT Model. Renew. Sustain. Energy Rev. 2016, 57, 83–93. [CrossRef]

2. UN DESA. World Urbanization Prospects 2018: Highlights (ST/ESA/SER.A/421); United Nations: New York, NY, USA, 2019.

3. UN DESA. World Population Prospects 2022; United Nations: New York, NY, USA, 2022.

4. Newman, P.; Kenworthy, J. R. Sustainability and Cities: Overcoming Automobile Dependence; Island Press: Washington, DC, USA, 1999.

5. Єршова О. Л., Бажан Л. І. Розумне місто: концепція, моделі, технології, стандартизація. *Статистика України*. 2020. № 2–3. С. 68–77. URL:http://194.44.12.92:8080/jspui/handle/123456789/5372

6. Тур О. В. Концепція розумного міста як основа сталого розвитку територій. *Східна Європа: економіка, бізнес, управління*. 2018. Вип. 4(15). С. 287–289 URL:http://srd.pgasa.dp.ua:8080/xmlui/handle/123456789/3946

7. Ukubassova, G. S., Amirbekova, A. B., Primzharova, K. K., DARIBAYEVA, A. K., ISMAILOVA, D. T.: Competitive peculiarities of industrial enterprises' products, *Periodico Tche Quimica*, Vol. 16, No. 33, pp. 434–447, 2019.

8. Біль М. Просторова мобільність населення: теорія, методологія, практика: монографія / Мар'яна Біль. Львів : ПАІС. 2018. 392 с.

9. 1. DEVELOPMENT OF SUSTAINABLE MOBILITY IN UKRAINE / Y. Shapenko та ін. *The 13th International scientific and practical conference "Problems, current state and prospects for business development"*, Graz, Austria, 1–4 квіт. 2025. ISBN 979-8-89692-726-6. URL: https://doi.org/10.46299/ISG.2025.1.13

10. London reaches major milestone with more than 1,000 zero emission buses. Https://tfl-newsroom.prgloo.com. 04.08.2023. URL: https://surl.li/mpjsfh

11. Www.aup.edu. news. URL: https://surli.cc/teyuaf

12. Маслов Т. Парки у Києві реконструюють за вимогами безбар'єрності. tykyiv.com. /city. 20.03.2024. URL: https://tykyiv.com/city/rekonstruktsiia-zelenikh-zon-iz-zabezpechenniam-usikh-vimog-bezbariernosti-iak-planuiut-ozeleniti-misto

Shapenko Ye. M., Kotova S. O., Bilonoh O. V. CURRENT TRENDS AND PROSPECTS FOR SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE URBAN PASSENGER TRANSPORT SYSTEM

The article is devoted to the issue of urban mobility as one of the key driving forces of urbanization, which directly affects the socio-economic development of cities and regions. Despite the dynamic development of transport systems in the world, the availability of jobs, social services and economic opportunities remains an acute problem. It is determined that today many cities are facing an accessibility crisis, which is caused by inefficient transport infrastructure, excessive motorization, traffic jams and significant environmental challenges.

The article examines urbanization processes in Ukraine, which are accompanied by the transformation of urban mobility models and require an integrated approach to the formation of a sustainable transport system. It is found that the growing number of urban population determines mobility as an important direction of state policy.

Thus, the relevance of the study is due to the need to develop effective transport solutions that will provide comfortable, environmentally safe and affordable travel for the population, as well as contribute to the development of the business environment and investment attractiveness of regions.

The article reveals the concept of sustainable development of urban passenger transport as a basis for the modernization of the transport system of Ukraine, which includes reducing the harmful impact of transport on the environment, rational use of infrastructure and the introduction of modern innovative technologies in the field of transportation. It is determined that climate change, increased requirements for the quality of the urban environment and European integration processes increase the need to expand the network of ecological public transport, create comfortable conditions for pedestrians and cyclists, as well as in the development of intelligent transport systems that will help increase the efficiency of transportation and minimize transport costs. The article analyzes modern trends in the field of urban mobility, which allow determining strategic priorities of state policy, promoting the rational use of resources and ensuring balanced development of the transport infrastructure of cities and regions. The integration of sustainable transport solutions into urban planning is a necessary condition for creating a comfortable and environmentally safe living space that will meet modern challenges and help improve the quality of life of the population.

Key words: *sustainable development of passenger traffic, Smart City, smart cities, urban passenger transport, urbanization, mobility, passenger transportation.*

ЕЛЕКТРОНІКА

УДК 621.382
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/47

Барило Г. І.
Національний університет «Львівська політехніка»

Брич М. В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Шлюсар Ю. А.
Національний університет «Львівська політехніка»

Живицький І. Б.
Національний університет «Львівська політехніка»

Бойкачов Г. В.
Національний університет «Львівська політехніка»

Пришляк С. О.
Національний університет «Львівська політехніка»

МАКРОМОДЕЛЬ П'ЄЗОЕЛЕКТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА З РОЗШИРЕНОЮ ФУНКЦІОНАЛЬНІСТЮ

У статті розглянуто теоретичні та прикладні аспекти побудови схемотехнічних макромоделей п'єзоелектричних перетворювачів, які широко використовуються у сенсорних пристроях для задач ультразвукової діагностики, контролю середовища, безконтактного вимірювання та систем структурного моніторингу. Проаналізовано сучасні тенденції розвитку сенсорних технологій, що базуються на п'єзоелектричних елементах, і виділено основні фактори дестабілізації їх функціонування: температурні флуктуації, часову деградацію, релаксаційні процеси, зволоження, механічні впливи, радіаційне навантаження, а також широкий спектр шумових завад, які ускладнюють точну інтерпретацію результатів. Показано, що класичні SPICE-моделі, зокрема ті, які побудовані на основі ідеалізованих параметрів резонансних контурів, не забезпечують належної адекватності у моделюванні реального функціонування сенсорів в умовах довготривалого навантаження та складного середовища. Запропоновано нову SPICE-сумісну макромодель п'єзоелектричного перетворювача Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel, яка враховує вплив зовнішніх і внутрішніх чинників на процес формування вимірювального сигналу. Структурно модель містить два функціональні блоки: Signal Formation Unit, який моделює процеси спотворення, амплітудної модуляції, релаксації, температурного дрейфу, шумів і затримок; та Equivalent Circuit Unit, що відтворює резонансні властивості перетворювача, зокрема добротність, внутрішню ємність і частотну характеристику. У моделі використано вбудовані компоненти сучасних SPICE-систем: Amplitude Modulator Macro, Noise Source Macro, Delay T, температурні коефіцієнти TC1, TC2, TCE, а також універсальне джерело струму NFI з формульною специфікацією. Це дозволяє реалізувати точне й адаптивне моделювання фізичних процесів, які відбуваються при поширенні та реєстрації ультразвукових хвиль у складних умовах. Результати дослідження можуть бути використані при створенні надійних сенсорних систем для роботи в агресивному середовищі, систем охоронного призначення, автономних вимірювальних пристроїв з функціями самодіагностики, а також у галузях біомедичних технологій, промислової автоматизації та екологічного моніторингу.

Ключові слова: *п'єзоелектричний перетворювач, сенсорні пристрої, SPICE, макромодель, модуляція, температурна нестабільність.*

Постановка проблеми. П'єзоелектричні перетворювачі є ключовими елементами сучасних сенсорних систем, що застосовуються в ультразвуковій діагностиці, моніторингу об'єктів, безконтактному вимірюванні та контролі параметрів середовища. Їх функціональність значною мірою залежить від точності, стабільності та достовірності перетворення фізичних величин у вимірювані електричні сигнали. Однак такі структури є чутливими до зовнішніх дестабілізуючих чинників – температурних коливань, вологості, вібрацій, електромагнітних завад і процесів старіння. Ці впливи не лише знижують точність перетворення, а й ускладнюють довготривале використання сенсорів у складних умовах.

У процесі побудови перетворювачів ефективним засобом дослідження їх властивостей є схемотехнічне моделювання, яке дозволяє відтворити роботу сенсорних елементів з урахуванням реальних умов експлуатації. Зокрема, моделі мають враховувати вплив зовнішнього середовища на параметри сигналу та функціональні характеристики пристрою. Існуючі SPICE-моделі здебільшого описують ідеалізовані умови, що обмежує їх застосування у практиці. Тому актуальним є створення універсальної схемотехнічної макромоделі, здатної імітувати дестабілізуючі фактори, зокрема температурний та часовий дрейф, релаксаційні ефекти, шуми й деградаційні процеси, для забезпечення верифікації та оптимізації сенсорних систем з п'єзоелектричними елементами.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз наукових публікацій свідчить про зростаючий інтерес до моделювання п'єзоелектричних сенсорів, що поєднують традиційні функції перетворення сигналу з розширеними можливостями – самодіагностикою, адаптацією до змін зовнішнього середовища, підвищеною стабільністю та енергоефективністю. Зокрема, у роботах [1–4] розглянуто підходи до побудови моделей, здатних відтворювати складну динаміку електромеханічного зворотного зв'язку в п'єзоструктурах, з урахуванням нелінійності, температурного дрейфу та механічних впливів.

У дослідженнях [5–7] увагу зосереджено на реалізації самодіагностичних функцій у сенсорних вузлах, зокрема через моніторинг імпедансних характеристик, використання діагностичних сигналів та алгоритмів виявлення відмов. Водночас автори робіт [8–10] наголошують на необхідності інтеграції таких моделей у цифрові сенсорні системи з обмеженими ресурсами, що зумовлює актуальність схемотехнічних макромоделей з мінімальною обчислювальною складністю.

У власних роботах [11, 12] авторами обґрунтовано підходи до моделювання та схемотехнічної реалізації імпедансних перетворювачів для сенсорних пристроїв, що враховують комплексний вплив дестабілізуючих чинників, а також запропоновано двомодовий драйвер для п'єзоелектричних випромінювачів. Зазначені результати стали основою для побудови нової макромоделі з розширеною функціональністю.

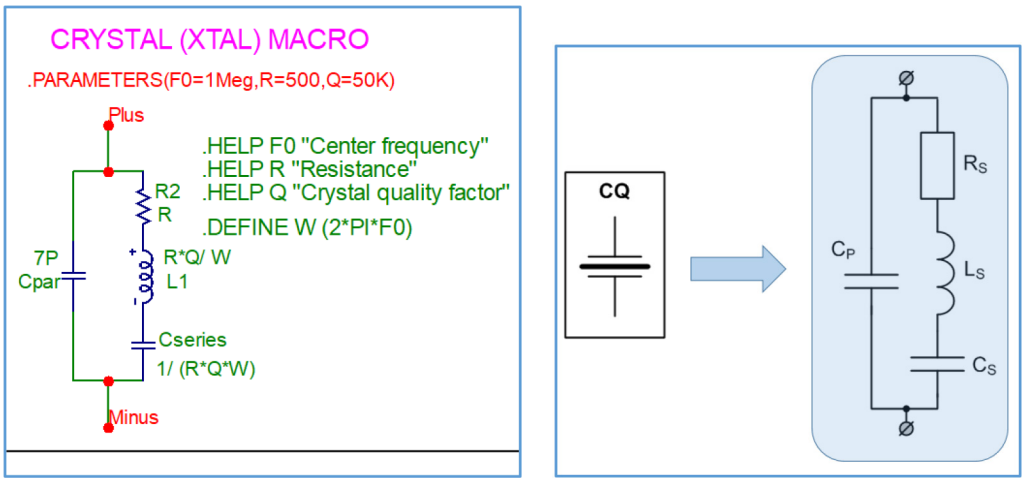
Постановка завдання. Метою роботи є розроблення схемотехнічної SPICE-макромоделі п'єзоелектричного перетворювача з розширеною функціональністю, яка забезпечує можливість врахування дестабілізуючих впливів та реалізацію вбудованої самодіагностики в сенсорних пристроях.

Виклад основного матеріалу. Основою більшості задач, пов'язаних із дослідженням, системно-параметричним аналізом та оптимізацією схем сигнальних трактів, є побудова відповідних математичних моделей. На сьогодні найбільш поширеним інструментом комп'ютерного моделювання електронних схем є програмні платформи сімейства SPICE (Simulation Program with Integrated Circuit Emphasis), зокрема PSPICE, LTspice, Micro-Cap та інші.

З огляду на системно-параметричний аналіз сенсорних пристроїв, принципово важливим є забезпечення узгодженості моделювання як первинних перетворювачів (чутливих елементів сенсорів), так і сигнальних трактів, що реалізують широкий спектр вимірювальних функцій.

У сучасних реалізаціях SPICE-систем уже реалізовано бібліотеки моделей окремих типів первинних перетворювачів, зокрема терморезисторів, фотодіодів, сенсорів магнітного поля на основі ефекту Холла тощо. У контексті тематики даного дослідження особливу увагу приділено розробці спеціалізованих SPICE-макромоделей п'єзоелектричних перетворювачів, зокрема типу XTAL (Crystal Macro).

Типова схема заміщення XTAL такої макромоделі (рис. 1) містить ланку послідовно з'єднаних резистора R_S, індуктивності L_S та конденсатора C_S, що характеризує ефект п'єзоелектричного резонансу, а саме власну резонансну частоту F_0 та добротність Q. Крім того в схему заміщення введено конденсатор C_P, що характеризує електричну ємність базової структури п'єзоелектричних перетворювачів «метал-діелектрик (п'єзоелектрик)-метал».



а *б*

Рис. 1. Макромодель XTAL SPICE: *а* – схема заміщення; *б* – еквівалентна схема

Разом із тим, вирішення задач, поставлених у межах даної роботи, вимагає аналізу більш глибоких фізичних процесів, що відбуваються в сенсорних системах на основі п'єзоелектричних перетворювачів. Це, зокрема, обумовлено наявністю низки дестабілізуючих факторів, серед яких – температурний і часовий дрейф, шуми, старіння матеріалів та інші джерела впливу.

Відповідно до сформульованих вимог здійснено синтез схеми заміщення SPICE-моделі з розширеною функціональністю, яка забезпечує можливість урахування комплексу дестабілізуючих чинників, що впливають на процес формування сигналів у сенсорних системах.

Розроблена SPICE-макромодель (рис. 2) п'єзоелектричного перетворювача (Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel) включає два основні функціональні блоки:

- блок формування сигналу (Signal Formation Unit), який відповідає за моделювання факторів спотворення та деградації сигналу (Distortion & Degradation) на основі розширеного набору впливів;
- еквівалентну схему (Equivalent Circuit Unit), яка відтворює базові параметри – резонансну частоту та добротність (Frequency & Q-Factor) – з використанням схеми заміщення п'єзоелектричних перетворювачів, поданої на рис. 1.

Першим із набору впливів у блоці формування сигналу є амплітуда (Amplitude) сигналу. Її зміна (модуляція) зумовлена характеристиками п'єзоелектричних перетворювачів, які виконують функції випромінювання та приймання імпульсів ультразвукових коливань у ланцюжку перетворення «електричний струм → ультразвукове коливання → електричний струм». Додатково враховуються параметри затухання сигналу, які виникають у процесі поширення ультразвукових хвиль у середовищі та при їх відбитті від об'єктів у цьому середовищі.

Для модельного представлення процесу амплітудної модуляції в розробленій SPICE-макромоделі використано вбудований бібліотечний функціональний компонент сучасних версій SPICE – Amplitude Modulator Macro (AM), який виконує гармонічну модуляцію несучого сигналу.

Основними параметрами цього бібліотечного елемента є (рис. 3):

- FS (Frequency of the carrier signal) – частота несучого сигналу;
- VPEAK (Magnitude of the carrier signal) – амплітуда несучого сигналу;

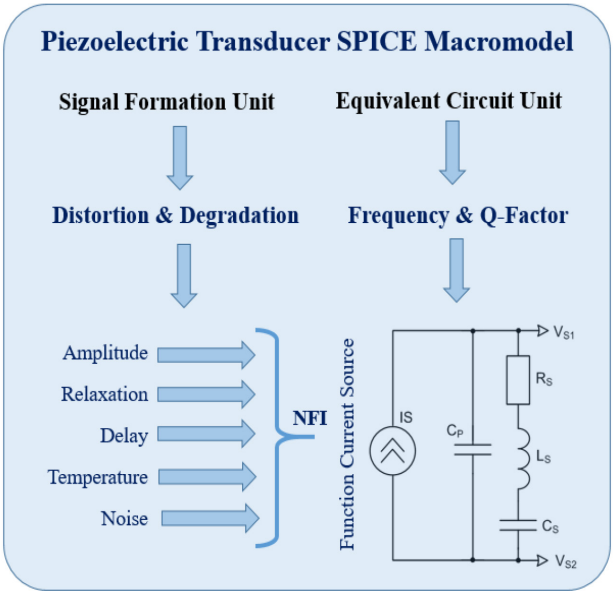


Рис. 2. Структура SPICE моделі п'єзоелектричних перетворювачів з розширеною функціональністю

• MODINDEX (Modulation index) – індекс модуляції;

• Type modulation – тип модуляції: SM (sine modulation) або CM (cosine modulation).

На вхід модулятора AM подається сигнал, параметри якого визначають інформативне складову модуляції. Такий підхід дозволяє імітувати зміни, що зумовлені зовнішніми фізичними впливами на сенсорну систему.

Приклад результатів формування амплітудно-модульованих сигналів для двох типів модуляції (макромодель XU1) наведено на рис. 4.

Другим важливим фактором є релаксація (Relaxation), яка визначає динаміку наростання та спаду сигналу. У середовищі SPICE доцільно представляти процес релаксації за допомогою інтегрувальної RC-ланки, характеристичний час якої визначає час встановлення сигналу у п'єзоелектричному перетворювачі.

У межах такого підходу напруга на інтегрувальному конденсаторі використовується як керуючий сигнал для згаданого вище амплітудного модулятора. Приклад формування сигналу з використанням поєднання інтегрувальної ланки (Rq, Cq) та модулятора (XU1) наведено на рис. 5.

Третій фактор – затримка (Delay) поширення ультразвукового коливання в середовищі ToF (Time-of-Flight) може бути представленою модельним SPICE компонентом Delay DT. Результати моделювання затримки на основі наведеного компоненту Delay DT представлено на рис. 6.

Четвертим впливовим фактором є температура (Temperature) та її вплив на параметри сигнального тракту. У середовищі SPICE цей вплив моделюється за допомогою стандартних температурних коефіцієнтів, зокрема:

• TC1 – лінійний температурний коефіцієнт,

• TC2 – квадратичний температурний коефіцієнт,

• TCE – експоненціальний температурний коефіцієнт.

Для виконання температурного аналізу застосовується режим DC ANALYSIS / TEMP, у межах якого можна дослідити зміну параметрів електронних компонентів залежно від температури.

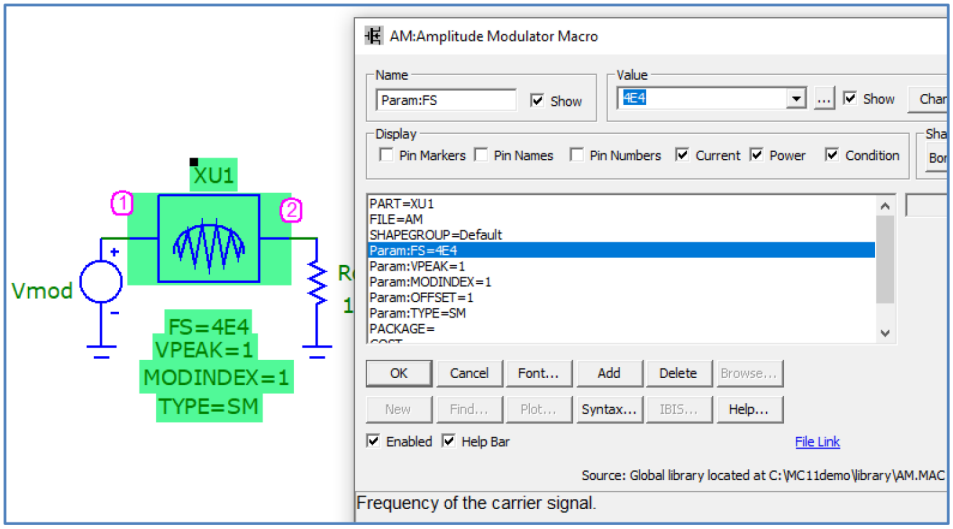
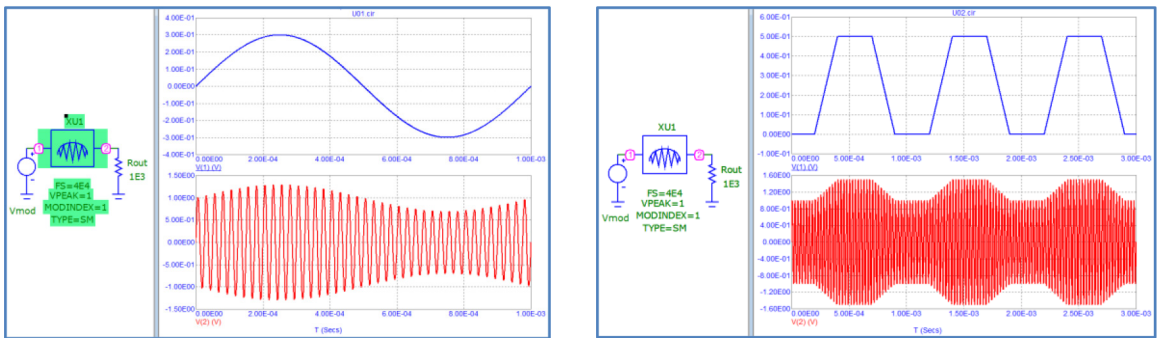


Рис. 3. Специфікація компоненту Amplitude Modulator Macro



а *б*

Рис. 4. Результат формування AM сигналу: *а* – синусоїдального; *б* – трапецієподібного

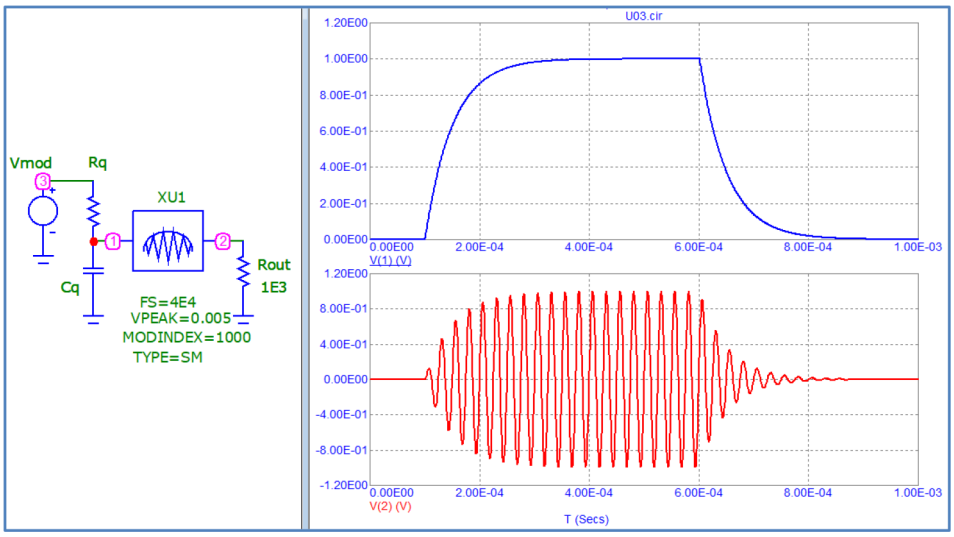


Рис. 5. Результат формування сигналу з врахуванням релаксації

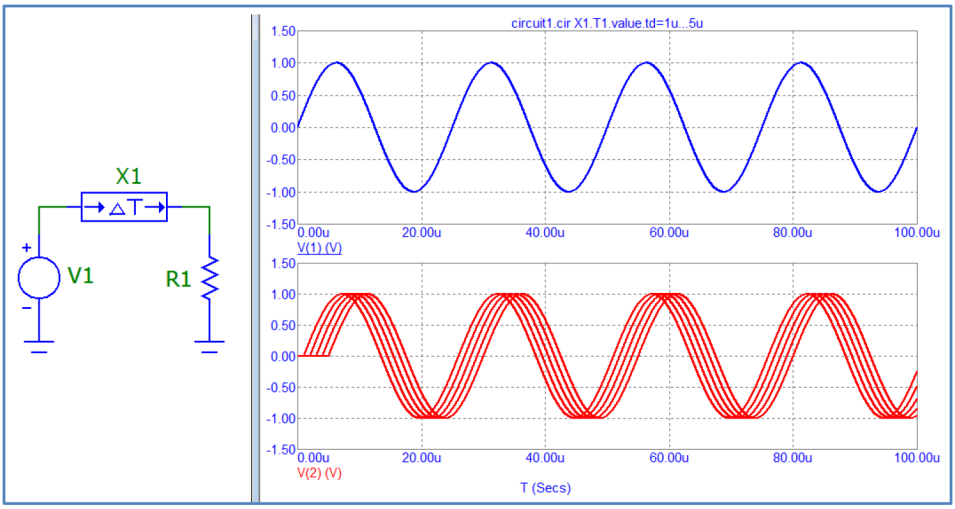


Рис. 6. Результат формування сигналу з компонентом Delay DT

Приклад результатів моделювання для елементарного резистивного компоненту наведено на рис. 7.

П'ятим фактором є шум (Noise), який моделюється за допомогою макромоделі джерела шуму – Noise Source Macro. Основними параметрами цього компоненту є:

- TS – часові характеристики,
- VS – амплітуда напруги білого шуму (white noise).

Залежно від необхідної глибини аналізу шумових складових у сигнальних колах, кількість джерел шуму у схемі може змінюватися: від одного (для елементарного випадку) до довільної кількості, що дозволяє моделювати кольоровий шум (colored noise). Вікно параметрів цієї моделі наведено на рис. 8.

Зв'язок між компонентами модуля Signal Formation Unit (який відповідає за моделювання спотворень і деградації сигналу – Distortion & Degradation) та Equivalent Circuit Unit (який формує базові параметри – Frequency & Q-Factor) реалізується за допомогою функціонального джерела струму формульного типу – NFI (Function Formula Type Current Source). Вікно параметрів цього джерела наведено на рис. 9.

Цей тип джерела характеризується високою універсальністю та адаптивністю у задачах моделювання складних сенсорних систем. Його використання дозволяє ефективно поєднувати електронні компоненти в межах SPICE-моделі, де перехідні процеси описуються математичним апаратом, заснованим на законах Кірхгофа.

Формування сигналу у вхідних колах сенсорів здійснюється на основі функціонального зв'язку між фізичними процесами в оточуючому середовищі (у даному випадку – процесами поширення ультразвукових коливань) та електричними про-

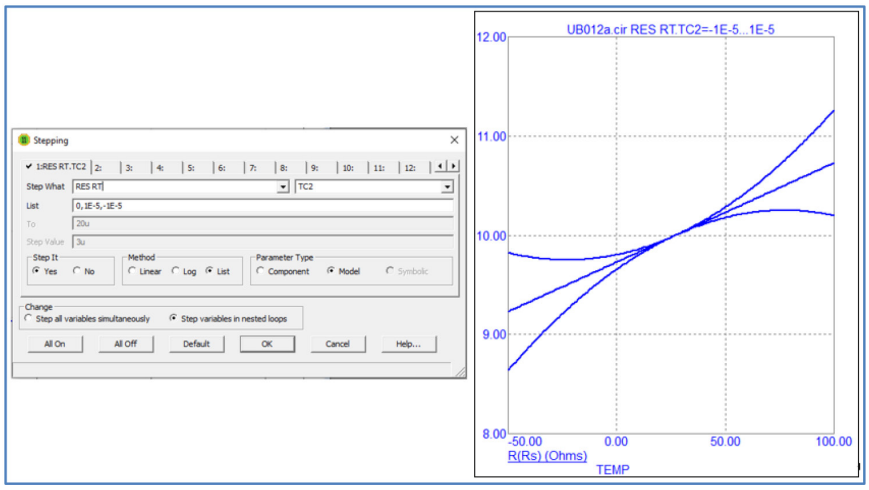


Рис. 7. Специфікація та результат моделювання при температурному аналізі

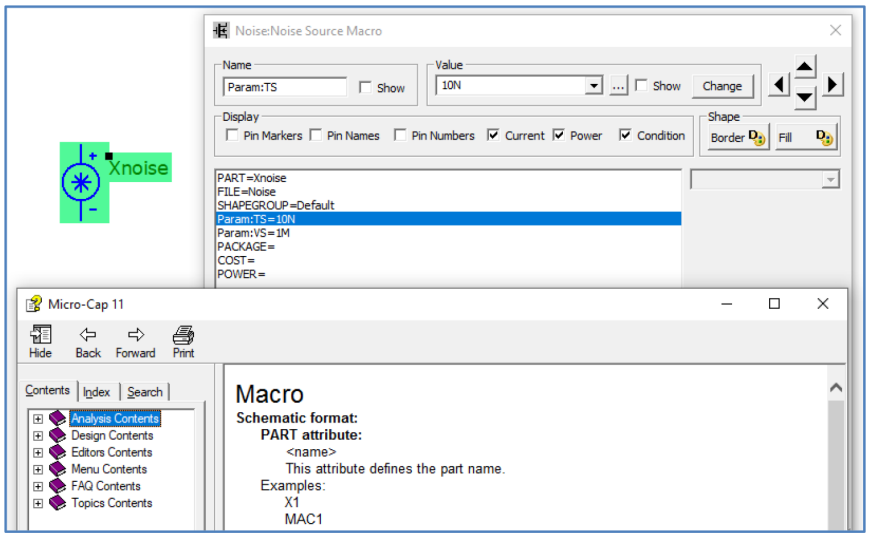


Рис. 8. Вікно специфікації джерела шуму Noise Source Macro

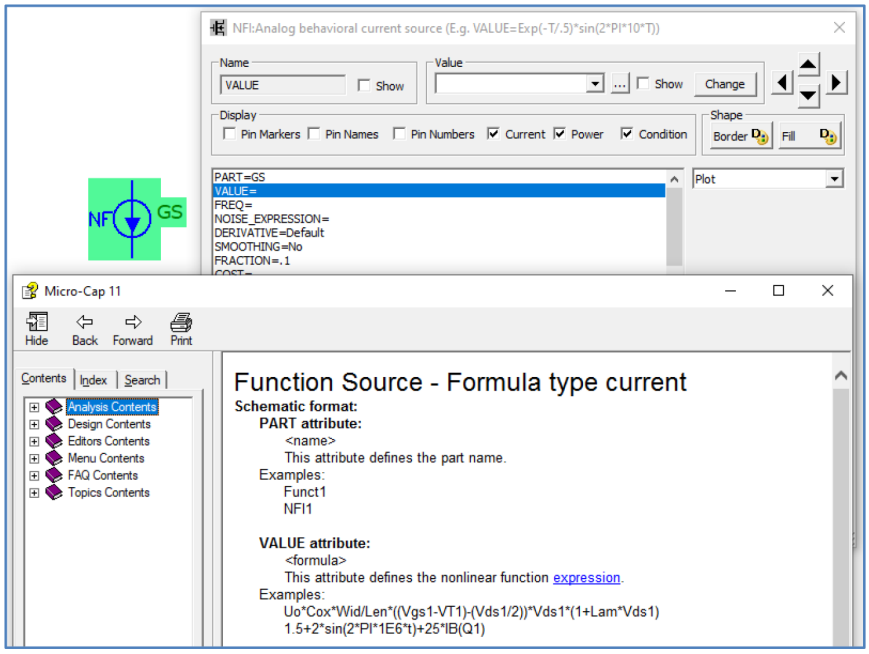


Рис. 9. Вікно специфікації джерела NFI

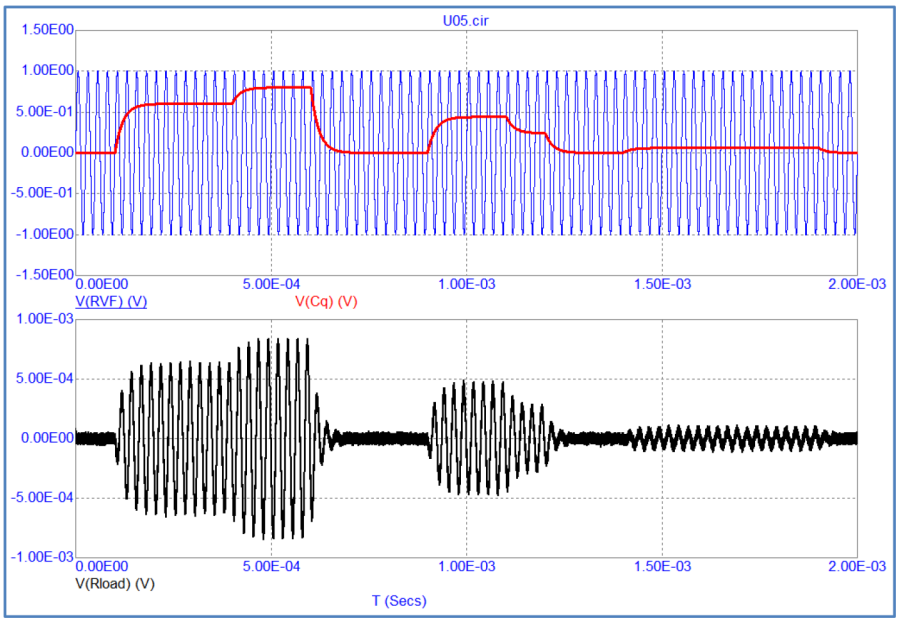


Рис. 10. Приклад варіанту синтезу сигналів з ефектом відбиття

цесами в сигнальних трактах аналогового фронтенду сенсорного пристрою.

Новизна запропонованого підходу до формування зв'язку між компонентами блоку формування сигналів та блоку еквівалентної схеми полягає у використанні передавальної функції типу $V \to I \to V$ («напруга → струм → напруга»). Такий підхід передбачає перехід від інформативних параметрів, представлених у вигляді напруги, до проміжного струмового представлення, що дозволяє здійснити передавання інформації зі схеми блоку формування сигналів до блоку еквівалентної схеми без порушення резонансних властивостей п'єзоелектричного перетворювача.

Застосування даної макромоделі дозволяє проводити комплексні дослідження, результати яких використовуються для параметричної оптимізації структурних елементів сигнальних перетворювачів. Приклад такого моделювання в процесі дослідження відбиття ультразвукових хвиль, представлено на рис. 10.

Висновки. У даному дослідженні сформульовані базові підходи синтезу SPICE макромоделі (Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel) сигнальних трактів п'єзоелектричних перетворювачів з врахуванням факторів дестабілізуючих процесів формування їх сигналів. Така макромодель містить два основні функціональні компоненти – блок формування сигналу (Signal Formation Unit), який формує ефекти спотворення та деградації з використанням розширеного набору факторів впливу, та еквівалентну схему (Equivalent Circuit Uni, яка формує базові параметри власної резонансної частоти та добротності з використанням схеми заміщення п'єзоелектричних перетворювачів. Новизною запропонованого рішення формування зв'язку між цими компонентами є специфікація передавальної функції з перетворенням $V \to I \to V$ «напруга – струм – напруга», яка здійснюється функціональним джерелом струму формульного типу NFI (Function Formula Type Current Source).

Список літератури:

1. Yao S., Zhang Y., Li Y., Wang Y., Zhang J. A small diameter ultrasonic water meter with self-diagnosis function and self-adaptive technology. IEEE Access. 2021. Vol. 9. P. 80703–80715. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3085300

2. Kang L., Feeney A., Dixon S. The high-frequency flexural ultrasonic transducer for transmitting and receiving ultrasound in air. IEEE Sensors Journal. 2020. P. 1–1. DOI: https://doi.org/10.1109/JSEN.2020.2981667

3. Lee S., Choi W., Lee D. Securing ultrasonic sensors against signal injection attacks based on a mathematical model. IEEE Access. 2019. Vol. 7. P. 1–1. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2932843

4. Roy R., Hazarika N., Bezboruah T. Ultrasonic sensor-based weight measurement using extension spring. IEEE Sensors Letters. 2023. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/LSENS.2023.3307113

5. Horsley D., Lu Y., Tang H.-Y., Jiang X., Boser B., Tsai J., Ng E., Daneman M. Ultrasonic fingerprint sensor based on a PMUT array bonded to CMOS circuitry. Proceedings of IEEE International Ultrasonics Symposium (ULTSYM). 2016. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/ULTSYM.2016.7728817

6. Tong Z., et al. A flexible ultrasonic sensor based on piezoelectric micromachined ultrasonic transducers (pMUTs). 2021 International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT) (Xi'an, China, 2021). Xi'an, 2021. P. 1–4. DOI: https://doi.org/10.1109/ICEPT52650.2021.9567942

7. Addabbo T., Fort A., Mecocci A., Parrino S., Pozzebon A., Vignoli V. A LoRa-based IoT sensor node for waste management based on a customized ultrasonic transceiver. IEEE Sensors Applications Symposium (SAS). 2019. P. 1–6. DOI: https://doi.org/10.1109/SAS.2019.8705980

8. Klambauer R., Bergmann A. A new principle for an ultrasonic flow sensor for harsh environment. IEEE Sensors Conference (SENSORS) (Glasgow, UK, 2017). Glasgow, 2017. P. 1–3. DOI: https://doi.org/10.1109/ICSENS.2017.8234394

9. Kesuma H., et al. Ultrasonic wireless sensor network for human habitation in deep space mission. 2019 IEEE International Conference on Wireless for Space and Extreme Environments (WiSEE). 2019. P. 122–127. DOI: https://doi.org/10.1109/WiSEE.2019.8920364

10. Holst C.-A., Lohweg V. A redundancy metric based on the framework of possibility theory for technical systems. IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). 2020. DOI: https://doi.org/10.1109/ETFA46521.2020.9212080

11. Барило Г. І., Сорока В. С., Никон О. О., Адам'як О. М., Шлюсар Ю. І. Моделювання двомодового драйвера п'єзоелектричних випромінювачів. Вісник КрНУ імені Остроградського. 2024. № 5(14). С. 98–104. DOI: https://doi.org/10.32782/1995-0519.2024.5.14

12. Барило Г. І., Павленко М. Є., Адам'як О. М., Никон О. О., Сорока В. С. Алгоритм моделювання сигнальних перетворювачів імпедансу для сенсорних пристроїв. Вісник Хмельницького національного університету. Технічні науки. 2024. Т. 343, № 6(1). С. 23–30. DOI: https://doi.org/10.31891/2307-5732-2024-343-6-3

Barylo H. I., Brych M. V., Shliusar Yu. A., Zhyvytskyi I. B., Boikachov H. V., Pryshliak S. O.

MACROMODEL OF A PIEZOELECTRIC TRANSDUCER WITH EXTENDED FUNCTIONALITY

The article considers both theoretical and practical aspects of designing circuit-level SPICE-compatible macromodels for piezoelectric transducers, which are widely used in sensor systems for ultrasonic diagnostics, contactless measurement, environmental control, and structural health monitoring applications. The paper analyzes modern trends in piezoelectric-based sensing technologies and identifies key destabilizing influences affecting their long-term performance, including temperature fluctuations, aging effects, material degradation, relaxation dynamics, humidity exposure, mechanical vibrations, and a wide range of noise interferences. It is demonstrated that conventional SPICE models – primarily based on ideal resonance circuit parameters – are not capable of adequately simulating the real-world operation of piezoelectric transducers under prolonged usage and harsh environmental conditions. A novel and adaptive macromodel, Piezoelectric Transducer SPICE Macromodel, is proposed, which accounts for signal instability and environmental disturbances during signal formation. The model consists of two principal functional blocks: the Signal Formation Unit, simulating distortion effects, amplitude modulation, relaxation, signal delays, thermal drift, and noise; and the Equivalent Circuit Unit, which captures the transducer's resonance behavior, quality factor, capacitance, and frequency response. The implementation uses state-of-the-art SPICE components including Amplitude Modulator Macro, Noise Source Macro, Delay T, temperature coefficients (TC1, TC2, TCE), and the highly flexible NFI formula-based current source. Such structure ensures high-fidelity simulation of ultrasonic wave propagation and interaction in complex environments. The proposed model serves as a foundation for robust sensor system design with self-diagnostic capabilities, applicable to security systems, biomedical devices, autonomous environmental monitors, and industrial automation solutions, where signal reliability, adaptability, and system longevity are of critical importance.

Key words: *piezoelectric transducer, sensor devices, SPICE, macromodel, modulation, temperature instability.*

УДК 658.589
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/48

Лук'янюк С. В.
Український науково-дослідний інститут
спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

ЕКОДИЗАЙН ЯК ОСНОВА СУЧАСНОГО ІНЖЕНЕРНОГО ПРОЕКТУВАННЯ

Зростаюче значення еко-дизайну в електронній промисловості в поєднанні з дедалі жорсткішими нормами Європейського Союзу щодо екологічного довкілля зумовлює необхідність розробки та впровадження передових методологій, які інтегрують принципи еко-дизайну у виробництво електронних пристроїв. Оскільки сучасні виробничі парадигми зміщуються в бік циркулярної економіки, впровадження інтелектуальних інструментів і технологій, заснованих на даних, стає необхідним для оптимізації ефективності використання ресурсів і мінімізації впливу на навколишнє середовище. У цьому дослідженні проаналізовано існуючі підходи, моделі та стратегії еко-дизайну у виробництві електронних пристроїв, висвітлено їхні переваги та обмеження. Аналіз існуючих підходів показує, що хоча сучасні методології надають цінну інформацію, але вони не повністю враховують унікальні складнощі електронного виробництва, особливо щодо вибору матеріалів, довговічності компонентів та можливості їхньої переробки після закінчення терміну служби. Щоб подолати цю прогалину, необхідно розробити нові моделі на основі існуючих фреймворків, інтегруючи при цьому найсучасніші наукові досягнення. У статті розглянуто методологію еко-дизайну, орієнтованого на переробку, яка інтегрує сучасні цифрові технології та інтелектуальні системи автоматизації. Запропонований підхід спрямований на підвищення екологічної ефективності та забезпечення стійкості протягом усього життєвого циклу продукту. Особливу увагу приділено інструментам, що дозволяють оптимізувати проектування, виробничі процеси, експлуатацію та утилізацію, сприяючи реалізації принципів циркулярної економіки та зменшенню негативного впливу на довкілля. Даний підхід використовує оригінальний набір індикаторів переробки, які полегшують оцінку придатності до вторинної переробки, забезпечуючи оптимальне відновлення матеріалів та зменшення електронних відходів. Крім того, ця методологія забезпечує безперешкодну інтеграцію в розподілені середовища проектування та підтримує взаємодію з різними системами САПР, що дозволяє оновлювати дані в режимі реального часу та проводити автоматизовану оцінку впливу на довкілля без безпосереднього втручання користувача. Дослідження підкреслює необхідність постійних інновацій у методології екодизайну, виступаючи за міждисциплінарні дослідження, що поєднують штучний інтелект, машинне навчання та практики інжинірингу. Впроваджуючи інструменти еко-дизайну, адаптовані до специфічних вимог виробництва електронних пристроїв, це дослідження сприяє розвитку більш ефективних, екологічно відповідальних і відповідних нормативним вимогам виробничих процесів в електронній промисловості. Застосування таких інструментів дозволяє оптимізувати виробничі практики, знизити екологічний вплив і підвищити раціональність використання ресурсів. Зазначається, що інтеграція еко-дизайну враховує як особливості матеріалів, що використовуються у виробництві електроніки, так і технологічні обмеження, що дозволяє забезпечити відповідність сучасним стандартам сталого розвитку та екологічних регуляцій.

Ключові слова: *відновлюване виробництво, термін служби, еко-дизайн, дизайн для відновлюваного виробництва, методологія, електронна промисловість.*

Постановка проблеми. Впровадження екологічних норм у виробничий сектор електричного та електронного обладнання ґрунтується на двох ключових аспектах: мінімізації відходів на стадії виробництва та оптимізації життєвого циклу продукції з метою подальшої переробки. Перший аспект стосується розробки екологічно оптимізованих продуктів – таких, що включають відновлювані та нетоксичні матеріали, мають високий ступінь переробки або повторного використання, а також відповідають принципам циркулярної економіки [1, 2]. Другий аспект стосується самих виробничих процесів, які повинні бути розроблені таким чином, щоб оптимізувати енергоефективність, зменшити викиди шкідливих речовин (газоподібних, рідких і твердих забруднювачів) і забезпечити відповідальне поводження з відходами. Сучасні методології екодизайну не повною мірою враховують необхідність інтеграції принципів циркулярної економіки у вироб-

ничі процеси. Відсутність системного підходу до інтеграції цих принципів обмежує можливості переходу до економіки замкненого циклу. Таким чином необхідність переходу до замкнутих циклів виробництва потребує розробки методологічної моделі, яка б дозволила враховувати можливість повторного використання матеріалів та компонентів на етапі проектування [3]. Слід зазначити, що існуючі підходи часто не враховують складність процесів утилізації та повторного використання матеріалів (рециклінгу), а також не забезпечують достатнього рівня інтеграції між різними етапами життєвого циклу продукту. Зокрема, вони не враховують технічні обмеження, що виникають при розділенні матеріалів, деградації властивостей під час переробки, а також енергетичні витрати, пов'язані з цими процесами [4]. Сучасні дослідження у сфері екодизайну підкреслюють, що відсутність взаємозв'язку між етапами життєвого циклу, такими як вибір матеріалів, виробництво, використання, утилізація та рециклінг, призводить до значних втрат ресурсів і збільшення обсягів відходів. Наприклад, за даними Європейського агентства з охорони довкілля (EEA – European Environment Agency), лише близько 12 % матеріалів, що використовуються у виробництві, походять із вторинної сировини, що свідчить про низьку ефективність існуючих процесів рециклінгу [5]. Ще однією проблемою є те, що дизайн продукції часто орієнтований на короткострокову функціональність, а не на довгострокову екологічну ефективність. Наприклад, складні багатокомпонентні конструкції, що використовують матеріали з різними властивостями, ускладнюють процеси їх розділення для переробки. Це особливо актуально для електроніки, де поєднання рідкоземельних металів, пластику та інших компонентів створює значні труднощі для утилізації. Для вирішення цих проблем сучасна методологія екодизайну повинна враховувати наступні аспекти:

– модульність конструкцій – забезпечення можливості легкого розділення матеріалів і компонентів на етапі утилізації;

– використання матеріалів із низьким впливом на довкілля – зокрема, біорозкладних або таких, що легко піддаються переробці;

– розробка систем оцінки життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) – для інтеграції екологічних параметрів на всіх етапах проектування та виробництва;

– інноваційні підходи до переробки – наприклад, застосування хімічного рециклінгу або процесів, які дозволяють відновлювати матеріали до стану, близького до первинного.

Таким чином, ефективний екодизайн повинен не лише враховувати складність процесів утилізації та повторного використання, але й забезпечувати системний зв'язок між усіма етапами життєвого циклу [3, 6]. Інтеграція цих аспектів може сприяти досягненню більш стійкого споживання ресурсів, зменшенню екологічного навантаження та переходу до моделі замкненого циклу. Як наслідок, виникає потреба у розробці методології, яка б сприяла створенню продуктів, придатних для рециклінгу, та забезпечувала ефективне використання вторинних матеріалів. Комплексне дослідження проблематики виявляє ряд критичних аспектів, що потребують науково-технічного опрацювання:

– проблематика використання критичних сировинних ресурсів – інкорпорація рідкоземельних елементів та інших матеріалів, класифікованих як «критичні», значно ускладнює технологічні процеси рециклінгу та генерує підвищені екологічні ризики. Складні хімічні та фізичні властивості компонентів потребують індивідуального підходу до розробки методів їхньої переробки та повторного використання;

– технологічна недосконалість процесів рециклінгу – наявний інструментарій переробки характеризується недостатньою селективністю та ефективністю при екстракції цінних функціональних компонентів із відпрацьованих технічних систем. Спостерігається дефіцит високотехнологічних рішень, що забезпечують максимальне збереження матеріальної цінності при мінімальних енергетичних затратах;

– відсутність економічних механізмів стимулювання використання вторинних матеріалів – суб'єкти виробничої діяльності проявляють низький рівень зацікавленості у використанні вторинних матеріалів через їх потенційно знижені фізико-механічні характеристики або підвищену собівартість внаслідок комплексних процесів переробки. Економічна парадигма потребує трансформації шляхом впровадження принципів ресурсоефективності;

– кумулятивний ефект мікроконцентрацій токсичних субстанцій – у складі технічних виробів часто присутні шкідливі речовини в незначних концентраціях, які, однак, проявляють тенденцію до біоакумуляції в екосистемах та формування довгострокових негативних ефектів. Даний аспект потребує впровадження превентивних методологій проектування з урахуванням повного життєвого циклу продукції.

Вищезазначені проблеми актуалізують необхідність розробки інтегрованих підходів до екодизайну, що забезпечуватимуть системну оптимізацію матеріальних потоків. Перспективним напрямком є створення комплексних інформаційних систем моніторингу хімічного складу виробів для підвищення ефективності їх подальшої переробки, розробці інноваційних матеріалів із підвищеною здатністю до рециклінгу та розвитку адаптивних технологічних процесів, що забезпечують максимальне збереження ресурсного потенціалу вторинної сировини.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Системний підхід до проектування, що враховує життєвий цикл матеріалів та можливість їх повторного використання, представлений рециклінг-орієнтованим екодизайном, є необхідною умовою для забезпечення сталого розвитку в умовах виснаження природних ресурсів та акумуляції відходів. Наукова спільнота проявляє підвищений інтерес до даної проблематики, що відображається у значній кількості публікацій, присвячених теоретико-методологічним та прикладним аспектам інтеграції принципів рециклінгу в інженерний дизайн виробів. Проведений аналіз літературних джерел дозволяє систематизувати наявні знання та виявити перспективні напрямки подальших досліджень. Історичний аналіз показує, що концепція екологічно орієнтованого проектування пройшла значну еволюцію від фрагментарних підходів до системного інтегрування екологічних аспектів у процес розробки виробів. У роботі [7] зазначається, що трансформація парадигми інженерного дизайну відбувалася паралельно з розвитком екологічної свідомості суспільства та посиленням регуляторних вимог. Автори відзначають, що рециклінг, як елемент інженерного дизайну, почав активно впроваджуватися в 1990-х роках, однак системний підхід до проектування з урахуванням повного життєвого циклу виробів сформувався лише на початку XXI століття. Значний внесок у розвиток теоретичних засад рециклінг-орієнтованого екодизайну зроблено в роботі [3], в якій автори запропонували модель циркулярного дизайну продукції, що передбачає інтеграцію принципів рециклінгу на етапі концептуального проектування. Дана модель відображає перехід від традиційної лінійної моделі «видобуток-виробництво-споживання-утилізація» до циркулярної моделі, де відходи одного виробничого циклу стають ресурсами для іншого. Дослідники в роботі [8] провели комплексний аналіз існуючих методологій екодизайну та виявили, що більшість із них фокусується на зниженні впливу на довкілля на етапі виробництва та експлуатації, приділяючи недостатню увагу етапу утилізації та рециклінгу. Автори наголошують на необхідності розробки інтегрованих підходів, що забезпечують оптимізацію екологічних показників протягом усього життєвого циклу виробу.

Важливим етапом у розвитку концепції рециклінг-орієнтованого екодизайну стало формування ряду ключових методологій.

Методологія “Design for Disassembly” (DfD). Цей підхід фокусується на розробці конструкцій, що дозволяють швидко та ефективно розбирати вироби на компоненти для подальшої переробки. Дослідження авторів в роботі [9] показують, що застосування принципів DfD може збільшити показники рециклінгу електронного обладнання на 20–30 %. Систематизація принципів DfD представлена в роботі [10], в якій автори виділяють наступні ключові аспекти: мінімізація кількості з’єднань, використання стандартизованих з’єднань, забезпечення доступу до з’єднань, мінімізація кількості інструментів для демонтажу, використання матеріалів, що легко ідентифікуються. Однак, як відзначають автори, застосування цих принципів може входити в протиріччя з іншими вимогами до виробу, такими як міцність, надійність або естетичні характеристики. Авторами в роботі [11] пропонується методологія кількісної оцінки показників DfD на основі індексу легкості демонтажу, яка враховує час, необхідний для розбирання виробу, кількість операцій та складність інструментів. Дана методологія дозволяє порівнювати різні конструктивні рішення та обирати оптимальні з точки зору подальшого рециклінгу. Однак, як зазначають автори, оцінка показників DfD на ранніх етапах проектування залишається викликом через відсутність детальної інформації про конструкцію виробу. Аналіз слабких сторін підходу DfD, проведений дослідниками в роботі [12], показує, що його ефективність значною мірою залежить від наявності відповідної інфраструктури для збору та сортування відходів. Крім того, автори відзначають, що економічна доцільність демонтажу може бути низькою для виробів із невисокою вартістю матеріалів, що обмежує застосування даного підходу.

Методологія «Design for Recyclability» (DfR) фокусується на виборі матеріалів та технологій, що забезпечують ефективну переробку виробів після закінчення терміну їх експлуатації. Дослідження авторів у роботі [13] показує, що застосування принципів DfR дозволяє збільшити частку

матеріалів, що підлягають рециклінгу, на 15–40 % залежно від типу виробу. Систематизація принципів DfR представлена в роботі [14], якій дослідники виділяють наступні ключові аспекти: мінімізація кількості різних матеріалів, використання матеріалів, що легко ідентифікуються та сортуються, уникнення комбінацій матеріалів, що ускладнюють переробку, мінімізація використання добавок та наповнювачів. Автори наголошують, що впровадження цих принципів потребує комплексного підходу, що враховує технічні, економічні та екологічні аспекти. В роботі [15] автори пропонують методологію кількісної оцінки показників DfR на основі індексу рециклінгу, що враховує частку матеріалів, які можуть бути перероблені, енергетичні витрати на переробку та екологічний вплив процесів рециклінгу. Дана методологія дозволяє оптимізувати вибір матеріалів та технологій на етапі проектування для досягнення максимальної ефективності рециклінгу. Аналіз слабких сторін підходу DfR, проведений дослідниками в роботі [16], показує, що його ефективність обмежується технологічними можливостями існуючих процесів переробки та ринковим попитом на вторинні матеріали. Крім того, автори відзначають, що застосування принципів DfR може призводити до зростання собівартості виробів та зниження їх функціональних характеристик.

Методологія «Design for Circularity» (DfC) представляє собою розширення концепцій DfD та DfR, фокусуючись на проектуванні виробів для циркулярної економіки, де відходи одного виробничого циклу стають ресурсами для іншого. Дослідження авторів в роботі [17] показує, що застосування принципів DfC дозволяє значно зменшити споживання первинних ресурсів та обсяги відходів, що підлягають захороненню. Систематизація принципів DfC представлена в роботі [18], в якій виділяються наступні ключові аспекти: проектування довговічних виробів, забезпечення можливості ремонту та модернізації, створення систем повторного використання компонентів, розробка ефективних технологій рециклінгу матеріалів. В роботі наголошується, що впровадження цих принципів потребує трансформації бізнес-моделей та споживчої поведінки. В роботі [19] автори пропонують методологію кількісної оцінки показників DfC на основі індексу циркулярності, що враховує тривалість життєвого циклу виробу, потенціал повторного використання компонентів та ефективність рециклінгу матеріалів. Дана методологія дозволяє порівнювати різні дизайнерські рішення та обирати оптимальні з точки зору принципів циркулярної економіки. Аналіз слабких сторін підходу DfC, проведений дослідниками в роботі [20], показує, що його ефективність обмежується відсутністю відповідної інфраструктури та економічних стимулів для впровадження циркулярних бізнес-моделей. Крім того, автори відзначають, що системна трансформація виробничих та споживчих практик потребує значних інвестицій та тривалого часу.

Постановка завдання. Метою статті є проведення комплексного дослідження принципів ефективного екодизайну в галузі виробництва електронних пристроїв. Основна мета полягає в аналізі різноманітних підходів, що враховують не лише складність процесів утилізації та повторного використання, але й забезпечують інтеграцію всіх стадій життєвого циклу продукту. Впровадження таких підходів сприяє оптимізації використання ресурсів, мінімізації негативного впливу на навколишнє середовище та переходу до циклічної економіки. Таким чином, виникає необхідність у розробці методології, що стимулює створення продуктів, придатних для рециклінгу, та гарантує ефективне застосування вторинних матеріалів. Концепція ефективного екодизайну є багатогранною та залежить від регіональних та контекстуальних факторів. Отже, актуальним є дослідження різних методологій та філософій, що лежать в основі впровадження відновлювального виробництва. В той же час систематичний аналіз дозволяє сформувати цілісне розуміння ключових питань, що виникають у цій сфері.

Виклад основного матеріалу. Процес інженерного дизайну представляє собою цілісну систему, яка базується на трьох ключових аспектах: проектуванні конструкції, підборі матеріалів і розробці технологій [21]. Ці аспекти не існують ізольовано, а працюють у взаємозалежності, формуючи єдину структуру. Наприклад, рішення, прийняті на етапі вибору матеріалів, можуть суттєво впливати на технологічну реалізацію продукту та його конструктивні характеристики, що вимагає ретельної координації між усіма складовими. Слід більш детально розглянути кожен з цих аспектів.

Конструктивний дизайн. На цьому етапі визначаються форма, геометричні характеристики та допуски на складання виробу, щоб забезпечити його функціональність, ефективність і простоту виготовлення [21]. Фундаментальний принцип проектування підкреслює, що простіші конструкції забезпечують кращу ефективність, економічність і придатність до вторинної переробки. Крім

того, мінімізація використання матеріалів при збереженні структурної цілісності є ключовим завданням еко-дизайну, що безпосередньо сприяє ресурсоефективності та сталому розвитку.

Вибір матеріалу є ключовим етапом у розробці продукту, оскільки він безпосередньо впливає на механічні, фізичні та хімічні властивості пристрою [22]. Поширення сучасних матеріалів на біологічній основі, матеріалів, що підлягають вторинній переробці, та гібридних матеріалів розширює діапазон вибору, доступного для дизайнерів. Хоча тенденції стандартизації матеріалів спрямовані на обмеження надмірної диверсифікації, інновації в матеріалознавстві продовжують впроваджувати високоефективні альтернативи, сприяючи виробництву довговічних, але придатних для вторинної переробки електронних компонентів.

Технологічний дизайн. Вибір виробничих процесів є не менш важливим, оскільки він визначає кінцеву структурну цілісність, споживання енергії та утворення відходів [23]. Такі процеси, як адитивне виробництво (AM – Additive Manufacturing), точна механічна обробка та виробництво на основі «зеленої хімії», стають дедалі популярнішими завдяки мінімальним відходам матеріалів та низькому впливу на навколишнє середовище. Крім того, оптимальна стратегія складання має важливе значення для забезпечення того, щоб компоненти продукту були не тільки ефективно інтегровані, але й легко відокремлювалися в кінці їхнього життєвого циклу, що сприяє повторному використанню та відновленню.

Варто зазначити, що технологічний дизайн також повинен враховувати такі фактори, як масштаб виробництва, рівень автоматизації та можливість циклічного виробництва. Інтеграція технологій Індустрії 4.0, прогнозованого технічного обслуговування та роботизованої автоматизації ще більше підвищує ефективність процесу, зменшуючи при цьому відходи матеріалів та споживання енергії. Саме в цьому сенсі в основі методології екодизайну, орієнтованого на переробку, покладено структурований підхід, який від самого початку інтегрує придатність до вторинної переробки та ресурсоефективність у дизайні продукту [24]. Цей підхід ґрунтується на наступних принципах:

– вибір матеріалів для циклічної переробки – надання пріоритету нетоксичним матеріалам, які легко відокремлюються та придатні для вторинної переробки;

– дизайн для розбирання (DfD) та повторного використання – впровадження модульних архітектур та стандартизованих інтерфейсів для полегшення розбирання, ремонту та повторного використання компонентів, тим самим подовжуючи термін служби продукту та зменшуючи утворення відходів [25];

– енергоефективне виробництво з низьким рівнем викидів – оптимізація виробничих процесів для мінімізації споживання енергії, води та викидів вуглекислого газу з одночасним впровадженням стратегій відновлення та реконструкції;

– управління утилізацією та реверсна логістика – створення систем для ефективного збору, сортування та відновлення матеріалів, що забезпечує високий вихід цінних матеріалів з викинутих електронних пристроїв;

– цифрові моделі та прогнозування на основі штучного інтелекту – використання штучного інтелекту, машинного навчання та моделювання цифрових моделей для прогнозування деградації матеріалів, оптимізації переробки наприкінці терміну служби та покращення оцінки придатності до вторинної переробки.

Проте складність інтеграції принципів екодизайну, орієнтованого на переробку, в інженерну практику потребує структурованого управління проектуванням [26]. А для ефективної реалізації екодизайну, що зумовлено його міждисциплінарною природою, необхідна інтеграція знань та зусиль фахівців з різноманітних галузей. Зокрема, до таких галузей належать – матеріалознавство, машинобудування, електроніка, екологія та управління ланцюгами поставок. Крім того, через варіативність дизайну продукції, виробничих процесів та організаційних структур не існує універсальної методології, яку можна було б застосувати в усіх галузях промисловості [27]. В окремих випадках слід адаптувати стратегії екодизайну до конкретних операційних моделей, нормативно-правової бази та вимог ринку. Оптимізація екодизайну, орієнтованого на рециклінг, передбачає:

– стратегічне планування – визначення чітких екологічних цілей та включення їх у корпоративну політику сталого розвитку;

– міжфункціональна співпраця – сприяння комунікації та співпраці між дизайнерами, інженерами, матеріалознавцями та регуляторними експертами;

– передові аналітичні інструменти – використання програмного забезпечення LCA (Life Cycle Assessment), аналізу методом скінченних елементів (FEA – finite element analysis) та алгоритмів оптимізації на основі штучного інтелекту для оцінки впливу на навколишнє середовище та характеристик матеріалів [28].

Процес еко-дизайну складається з кількох етапів, кожен з яких відіграє вирішальну роль у забезпеченні сталості та придатності до переробки електронних пристроїв. Ці етапи включають розробку робочої концепції, планування, концептуальний дизайн, загальний дизайн, детальний дизайн, верифікацію, перевірку прототипу та впровадження у виробництво. Структурований та аналітичний підхід до кожного етапу підвищує ефективність використання ресурсів, зменшує утворення відходів та сприяє впровадженню принципів циркулярної економіки [29].

Розробка робочої концепції – початковий етап еко-дизайну, орієнтованого на переробку, який передбачає розробку структурованої робочої концепції. Ця фаза фокусується або на вдосконаленні існуючого продукту з екологічної точки зору, або на створенні абсолютно нової концепції, яка відповідає цілям сталого розвитку. Основна мета полягає у створенні стратегічного плану, який ефективно інтегрує стратегії покращення стану довкілля. Оскільки не існує універсальної схеми, застосовної до всіх продуктів, кожен дизайн розробляється індивідуально, виходячи з його конкретних вимог, ринкового попиту і технологічної доцільності. Оцінку запропонованих змін у дизайні слід порівнювати з базовим продуктом, використовуючи числові екологічні показники для оцінки покращення екологічних характеристик. Сучасні обчислювальні інструменти, такі як вибір матеріалів на основі штучного інтелекту та цифрове моделювання моделей, ще більше оптимізують цей етап, прогнозуючи вплив на навколишнє середовище модифікацій дизайну.

Етап планування. Ефективне планування є наріжним каменем успішної реалізації еко-дизайну [30]. Цей етап починається з комплексного аналізу ринку для збору необхідної інформації для прийняття рішень. Основні напрямки дослідження повинні включати:

– аналіз ринкового попиту та очікувань споживачів – розуміння потреби в нових продуктах або вдосконаленні існуючих;

– аналіз конкурентних продуктів – оцінка аналогічних продуктів для виявлення можливостей для підвищення стійкості;

– потенціал ринку – оцінка економічної доцільності та потенційної швидкості прийняття екологічно розроблених продуктів.

Використовуючи передові аналітичні методи, такі як аналіз вартості життєвого циклу (LCCA – lifecycle cost analysis) та опитування споживачів, орієнтовані на сталий розвиток, дають цінну інформацію. Наряду з цим використання методу анкетування разом з аналітикою великих даних допомагає зрозуміти поведінку споживачів і тенденції вподобань, забезпечуючи відповідність еко-дизайну потребам ринку та дотримання регуляторних вимог.

Етап концептуального дизайну. На цьому етапі розробляється основна концепція електронного пристрою, що включає екологічні міркування у вибір матеріалів та виробничі процеси [31]. На цьому етапі важливо провести оцінку впливу на навколишнє середовище використовуючи різні інструменти та методології:

– оцінка життєвого циклу (LCA – Life Cycle Assessment) – комплексний інструмент для оцінки впливу продукту на навколишнє середовище від видобутку сировини до утилізації після закінчення терміну експлуатації;

– матеріальні витрати на одиницю послуги (MIPS – Material Input Per Service Unit) – вимірюється ресурсоефективність продукту;

– показник матеріаломісткості (MIT – Material Intensity Indicator) – оцінюється споживання матеріалів відносно функціональності продукту;

– методи еко-індикаторів – кількісна оцінка впливу на навколишнє середовище на основі стандартизованих критеріїв.

Для оптимізації ефективності використання матеріалів, полегшення модульності, прогнозування потенціалу для вторинної переробки, покращення процесу прийняття рішень раціонально використовувати платформи екодизайну на основі штучного інтелекту та CAD/CAM-систем.

Етап загального проектування. Цей етап розширює концептуальну основу, перетворюючи ідеї на детальні конфігурації продукту. Основна увага повинна приділятися наступним аспектам [32]:

– вибір матеріалів – забезпечення використання матеріалів, придатних для вторинної переробки, нетоксичних та екологічно чистих;

– визначення технологічного процесу – визначення екологічно чистих методів виробництва, таких як адитивне виробництво, низько енергетична пайка та замкнуті системи водопостачання;

– розробка документації – створення детальних технічних специфікацій та звітів про сталий розвиток.

Етап загального проектування також інтегрує принципи забезпечення якості, для гарантування того, що заходи еко-дизайну не вплинуть на продуктивність продукту. Використовуючи цифрове прототипування та віртуальне моделювання, інженери можуть оцінити доцільність викорис-

тання екологічно чистих матеріалів ще до початку фізичного виробництва.

Етап детального проектування. На цьому етапі варіанти матеріалів і процесів, які можуть бути запропоновані, зводяться до одного або декількох варіантів. З ціллю проведення оптимального процесу проектування розробники використовують бази даних, системи підтримки прийняття рішень на основі штучного інтелекту та оцінки життєвого циклу матеріалів та рекомендується використовувати наступні підходи:

– вибір і стандартизація компонентів – використання модульних підходів до проектування для полегшення розбирання та переробки;

– екологічно чисті методи склеювання – мінімізація кількості клеїв, що перешкоджають переробці;

– енергоефективне проектування схем – зменшення енергоспоживання та тепловиділення.

Верифікація дизайну та перевірка прототипу. Етап верифікації гарантує, що запропонований дизайн відповідає екологічним та функціональним вимогам. Цей процес включає в себе наступні операції:

– аналіз технічної документації – виявлення потенційних недоліків дизайну до виготовлення прототипу;

– фізичне тестування прототипу – оцінка довговічності, функціональності та придатності до вторинної переробки;

– аналіз режимів та наслідків відмов (FMEA – Failure Mode and Effects Analysis) – систематична оцінка потенційних відмов, які можуть вплинути на екологічні показники.

Використовуючи цифрове моделювання та алгоритми прогнозування технічного обслуговування, виробники можуть оптимізувати життєвий цикл продукту та його придатність до вторинної переробки після закінчення терміну експлуатації.

Виробництво та виведення на ринок. Це заключний етап, який включає в себе широкомасштабне виробництво і виведення на ринок продукції. Ключовими аспектами цього етапу є:

– сталі методи виробництва – впровадження енергоефективних процесів і замкнутих матеріальних потоків;

– екологічне маркування та сертифікація – отримання екологічних сертифікатів, таких як EPEAT, Energy Star та Blue Angel;

– прогнозування витрат протягом життєвого циклу – оцінка експлуатаційних витрат та витрат на утилізацію для забезпечення економічної доцільності.

Висновки. Таким чином, комплексна методологія еко-дизайну, орієнтована на переробку, має важливе значення для зменшення впливу електронних пристроїв на довкілля. Систематично звертаючись до кожного етапу процесу проектування – від розробки концепції до виведення на ринок – виробники можуть підвищити ефективність використання ресурсів, сприяти переробці та відповідати світовим стандартам сталого розвитку. Інтеграція передових наукових методологій, таких як вибір матеріалів на основі штучного інтелекту, LCA та цифрове моделювання, ще більше посилює стратегії еко-дизайну, гарантуючи, що електронні пристрої сприятимуть більш стійкій та циркулярній економіці.

Список літератури:

1. Bocken N. M., Pauw I., Bakker C., Van der Grinten B. Product design and business model strategies for a circular economy, Journal of Industrial and Production Engineering, 33(5), 2016, pp. 308–320.

2. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: from definition to implementation, Journal of Cleaner Production, 114, 2016, pp. 11–21.

3. Bakker C., Wang F., Huisman J., Hollander M. Products that go round: exploring implications of the circular economy for product design, Journal of Cleaner Production, 69, 2014, pp. 17–28.

4. Lieder M., Rashid A. Towards circular economy implementation: a framework in relation to the historic development of EI, Journal of Cleaner Production, 115, 2016, pp. 36–51.

5. EEA (European Environment Agency). Circular economy in Europe – developing the knowledge base. EEA Report No. 11/2019, Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2020.

6. Ghisellini P., Cialani C., Ulgiati S. A review on circular economy: from definition to implementation, Journal of Cleaner Production, 114, 2016, pp. 11–21.

7. Kim H., Paques J. Evolution of eco-design paradigm: A historical perspective, Journal of Sustainable Design and Innovation, 9(2), 2021, pp. 112–125.

8. Paras A., Teixeira R., Figueiredo V. Review of eco-design methodologies: Focus on end-of-life stage, Sustainable Production and Consumption, 18, 2019, pp. 218–232.

9. Vanegas P., Peeters J. R., Cattrysse D., Tecchio P. Disassembly line design for electronic waste: A review and classification, Journal of Cleaner Production, 172, 2018, pp. 4461–4475.

10. Sabaghi M., Bidhandi H. M., Tseng M. L. A review of design for disassembly: Methodologies, tools, and applications, Resources, Conservation and Recycling, 112, 2016, pp. 151–164.
11. Rocha L. C., Gomes J. P., da Silva, F. J. G. Quantitative assessment of design for disassembly: A disassembly ease index, Journal of Manufacturing Systems, 66, 2023, pp. 280–292.
12. Choi J., Lee S., Kim T. Challenges and limitations of design for disassembly in electronic product recycling, Waste Management, 142, 2022, pp. 150–162.
13. Mathieux F., Ardente F., Arena M., Bobba S. Design for recyclability: A critical review of existing approaches, Resources, Conservation and Recycling, 146, 2019, pp. 416–430.
14. Wagner T., Schlummer M. Design for recyclability: A systematic review of principles and guidelines, Sustainable Materials and Technologies, 26, 2020, p. 222–234.
15. Han Y., Kim J., Lee H. Quantitative evaluation of design for recyclability: A recyclability index, Journal of Cleaner Production, 385, 2023, pp. 13576–13588.
16. Singh A., Kumar R., Singh V. Limitations of design for recyclability in the context of emerging economies, Environmental Science and Pollution Research, 28(15), 2021, pp. 18884–18898.
17. De los Rios I., Charnley S. From design for disassembly to design for circularity: A review, Journal of Cleaner Production, 142, 2017, pp. 797–805.
18. Moreno M., De los Rios C., Rowe Z., Charnley S. A conceptual framework for circular design implementation, Journal of Cleaner Production, 175, 2018, pp. 16–35.
19. Bocken N. M., Ritala P., Albareda L. A literature and practice review to develop sustainable business model archetypes, Journal of Cleaner Production, 330, 2022, pp. 129752–129772.
20. Korhonen J., Honkasalo A., Seppala J. Circular economy: the concept and its limitations, Ecological Economics, 143, 2018, pp. 37–46.
21. Dieter G. E., Schmidt L. C. Engineering design 6th edition, McGraw-Hill Education, 2020, pp. 656.
22. Ashby M. F. Materials selection in mechanical design, third edition 2005, Butterworth-Heinemann, 2005, p. 624.
23. Gutowski T. G., Dahmus J. B., Thiriez A. Electrical energy requirements for manufacturing processes, 17th CIRP conference on life cycle engineering, 2009, pp. 623–628.
24. Tischner U., Charter M. Sustainable product development, Sheffield, UK: Greenleaf Publishing, 2001, 384 p.
25. Maxwell D., Van der Vorst R., Gijzel J. Product lifetime optimization: a component-based approach, Journal of Industrial Ecology, 10(1–2), 2006, pp. 173–190.
26. Dewulf W., Duflou J. R. Design for X (DfX): a conceptual framework and industrial case studies, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 129(6), 2007, pp. 1198–1207.
27. Cooper T., Allwood J. Rethinking Design for Sustainability, Sustainable Development, 20(3), 2012, pp. 201–217.
28. European Commission. Eco-design requirements for energy-related products, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2012, 52 p.
29. Luttropp C., Lagerstedt J. EcoDesign and product development strategies aiming at function optimisation and dematerialization, Environmental Management and Health, 17(4), 2006, pp. 408–420.
30. Pigosso D. C. A., McAloone T. C., Rozenfeld H. Ecodesign integration in product development: Part 1 – A literature review, Journal of Engineering Design, 24(1–3), 2013, pp. 1–26.
31. Rathi S. Design for Environment: A holistic approach, New Delhi: TERI Press, 2006, pp. 150–175.
32. Tischner U., Charter M. Sustainable product design, Earthscan, 2001, pp. 90–115.

Lukyanuk S. V. ECODESIGN AS THE BASIS OF MODERN ENGINEERING DESIGN

The growing importance of eco-design in the electronics industry, coupled with increasingly stringent European Union environmental regulations, necessitates the development and implementation of advanced methodologies that integrate eco-design principles into the production of electronic devices. As modern manufacturing paradigms shift towards a circular economy, the introduction of intelligent tools and data-driven technologies is becoming necessary to optimize resource efficiency and minimize environmental impact. This study analyzes existing eco-design approaches, models, and strategies in the production of electronic devices, highlighting their advantages and limitations. The analysis of existing approaches shows that while current methodologies provide valuable information, they do not fully take into account the unique challenges of electronic manufacturing, especially in terms of material selection, component durability, and end-of-life recyclability. To bridge this gap, new models need to be developed based on existing frameworks while integrating the latest scientific advances. This paper presents a recycling-oriented eco-design methodology that integrates modern digital technologies and intelligent automation systems. The proposed approach

is aimed at improving environmental efficiency and ensuring sustainability throughout the product life cycle. Particular attention is paid to tools that optimize design, production processes, operation, and disposal, contributing to the implementation of the principles of the circular economy and reducing the negative impact on the environment. This approach uses an original set of recycling indicators that facilitate the assessment of recyclability, ensuring optimal material recovery and reducing e-waste. In addition, this methodology provides seamless integration into distributed design environments and supports interaction with various CAD systems, allowing for real-time data updates and automated environmental impact assessment without direct user intervention. The study emphasizes the need for continuous innovation in ecodesign methodology, advocating interdisciplinary research that combines artificial intelligence, machine learning, and engineering practices. By introducing eco-design tools adapted to the specific requirements of electronic device manufacturing, this research contributes to the development of more efficient, environmentally responsible and compliant manufacturing processes in the electronics industry. The use of such tools can optimize production practices, reduce environmental impact, and increase resource efficiency. It is noted that the integration of eco-design takes into account both the characteristics of the materials used in electronics production and technological limitations, which allows for compliance with modern standards of sustainable development and environmental regulations.

Key words: *renewable production, service life, eco-design, design for renewable production, methodology, electronics industry.*

КОРАБЛЕБУДУВАННЯ

УДК 504.06:656.61
DOI https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.1/49

Булгаков М. П.
Одеський національний морський університет

Мельник О. М.
Одеський національний морський університет

Пуляєв І. О.
Одеський національний морський університет

Волошин Д. А.
Одеський національний морський університет

ОГЛЯД СУЧАСНИХ ВИКЛИКІВ І ШЛЯХІВ МІНІМІЗАЦІЇ ЕКОЛОГІЧНИХ РИЗИКІВ У СУДНОПЛАВСТВІ

Морське судноплавство є ключовим елементом глобальної економіки, забезпечуючи перевезення понад 80 % вантажів у світі. Проте інтенсивне зростання морського транспорту супроводжується низкою серйозних екологічних викликів. Основними з них є забруднення морського середовища нафтою, хімічними речовинами, твердими відходами, а також перенесення інвазивних видів через баластні води. Додатково, судноплавство є джерелом значних обсягів атмосферних викидів, таких як CO_2, NO_x, SO_x, *які сприяють глобальному потеплінню та погіршенню якості повітря в прибережних зонах. Не менш важливим є і шумове забруднення, яке впливає на навігацію, спілкування та міграцію морських ссавців, зокрема китів і дельфінів. У статті здійснено комплексний аналіз основних екологічних ризиків, пов'язаних із морським транспортом, а також надано огляд міжнародних нормативно-правових актів, таких як Конвенція MARPOL, та сучасних технологій, спрямованих на їх мінімізацію. Зокрема, розглянуто системи очищення баластних вод, газоочисні установки (скруббери), використання альтернативного пального, такого як ЗПГ, а також оптимізацію маршрутів як засіб підвищення енергоефективності суден. Окрему увагу приділено економічним аспектам впровадження екологічних технологій у судноплавстві: порівнюються витрати на їхнє встановлення із потенційними довгостроковими вигодами, такими як зменшення штрафів, підвищення репутації компаній, економія на паливі. Висвітлено перспективи розвитку екологічно безпечного судноплавства завдяки міжнародній співпраці, інтеграції екологічних стандартів у політику судноплавних компаній та розвитку інновацій. Матеріали статті можуть бути корисними для фахівців морської галузі, екологів, розробників політики та науковців, які працюють над підвищенням стійкості транспортної інфраструктури до екологічних викликів. Збереження морського середовища залежить від здатності галузі адаптуватися до нових стандартів і розвивати технології, що сприяють зменшенню негативного впливу на довкілля.*

Ключові слова: *судноплавство, екологічні ризики, забруднення води, забруднення повітря, баластні води, МАРПОЛ, технології очищення, альтернативні види пального, шумове забруднення, морські екосистеми, міжнародні стандарти, екологічна стійкість.*

Постановка проблеми. Морське судноплавство посідає найважливіше місце у світовій економіці, обслуговуючи солідну частину товарних перевезень. Оскільки зростають обсяги морських перевезень, посилюється і вплив на довкілля. Екологічний вплив судноплавства на навколишнє середовище – це складно багатогранна проблема, що зачіпає всі аспекти діяльності судноплавства: від забруднення води і повітря до інтродукції інвазивних видів через баластні води. Ризики ці мають довгостроковий характер не тільки для екосистем, а й для самої галузі, включно з фінансовими та репутаційними втратами.

Однією з основних проблем судноплавної промисловості є зменшення впливу на навколишнє середовище, що передбачає запровадження нових технологій, дотримання міжнародних норм і стандартів, а також співпрацю держав, морських компаній та екологічних організацій.

Унікальність даної роботи полягає в інтеграції технічних, екологічних і економічних аспектів, що дозволяє створити комплексне бачення проблеми і можливих рішень. В статті не тільки аналізуються поточні екологічні загрози, а й досліджуються практичні шляхи зниження цих ризиків через інноваційні технології і міжнародні стандарти, що робить її важливою для галузі.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Одним із найбільш серйозних екологічних ризиків є забруднення морських вод нафтою та хімічними речовинами. Зокрема, дослідження [1, 2] показують, що навіть незначні розливи нафтопродуктів можуть суттєво змінювати структуру морських екосистем, негативно впливаючи на популяції морських організмів та рослин. Морські судна, особливо танкери, можуть випадково або навмисно скидати нафтові продукти та хімічні речовини в море, що призводить до тривалого забруднення водойм. Розливи нафти ускладнюють процес фотосинтезу водних рослин і завдають серйозної шкоди морській фауні. Навіть невеликі витоки нафтопродуктів можуть значно впливати на екосистему, порушуючи баланс морської флори та фауни.

Крім того, тверді відходи, особливо пластик, створюють серйозну загрозу для морської фауни. За оцінками GESAMP [3], щороку в океани потрапляє близько 8 мільйонів тонн пластикових відходів, що призводить до суттєвих екологічних та економічних збитків. Морське сміття, зокрема пластикові відходи, є однією з найбільших загроз для морських тварин. Пластик в океанах становить небезпеку для таких тварин, як черепахи, риби та морські птахи, які можуть проковтувати пластикові предмети, що спричиняє їхню загибель або ослаблення організму. Окрім того, мікропластик, що накопичується в харчових ланцюгах, може потрапляти до організму людини, створюючи екологічні та санітарні проблеми.

Особливу увагу науковців привертає проблема перенесення інвазивних видів через баластні води. Згідно з дослідженнями [4], баластні води здатні переносити бактерії, водорості, а іноді навіть великі організми, які, потрапляючи до нових регіонів, спричиняють серйозні порушення місцевих екосистем і становлять загрозу біорізноманіттю. Конвенція IMO з управління баластними водами є ключовим механізмом регулювання цього процесу, однак її ефективність багато в чому залежить від наявних технологій очищення води, які потребують подальшого вдосконалення й розвитку.

Суттєвою екологічною проблемою також залишаються атмосферні викиди з морських суден, які включають CO_2, оксиди азоту (NO_x) і сірки (SO_x). Згідно з останніми звітами IMO, міжнародне судноплавство відповідає приблизно за 3 % глобальних викидів CO_2. Дослідження [4] показують, що ці викиди не лише сприяють глобальному потеплінню, а й значно погіршують якість повітря в портових містах, створюючи серйозні ризики для здоров'я населення. Викиди оксидів азоту та сірки, своєю чергою, спричиняють утворення кислотних дощів, які можуть знищувати рослинність і порушувати цілі екосистеми. Ці речовини також суттєво погіршують якість повітря, що становить загрозу для здоров'я людей у районах великих портів.

Одним з дієвих рішень цієї проблеми є впровадження систем очищення (скруберів) та перехід на альтернативні види палива, зокрема зріджений природний газ (LNG), що здатен суттєво знизити обсяги шкідливих викидів.

Основні екологічні ризики в судноплавстві показані на рис. 1.

Шумове забруднення також становить серйозну загрозу для морських екосистем. Згідно з результатами досліджень [5], підвищений рівень шуму, що створюється суднами, може порушувати комунікацію та міграцію морських тварин зокрема, китів і дельфінів. Ці тварини використовують звукові хвилі для навігації, пошуку їжі та спілкування. Внаслідок підвищення шумового фону в океані морські ссавці можуть дезорієнтуватися й навіть гинути.

Крім того, шумове забруднення впливає й на інші види морських тварин, викликаючи у них стресові реакції, що призводить до порушення екосистем і змін чисельності морської фауни. Міжнародні екологічні організації рекомендують вживати заходів щодо зменшення шуму, який створюють судна, для збереження морських екосистем.

Міжнародні рекомендації, зокрема [6], пропонують технічні рішення для зменшення впливу шуму, однак необхідною залишається їх широка імплементація на глобальному рівні (рис. 2). Також актуальним напрямом є розробка та впровадження нових конструктивних рішень у суднобудуванні, спрямованих на зниження шуму вже на етапі проєктування.

Рис. 1. Основні екологічні ризики в судноплавстві

Таблиця 1

Основні види екологічних ризиків у судноплавстві

Вид екологічного ризику	Опис	Потенційні наслідки	Відсоток впливу
Забруднення води	Викиди нафти, хімікатів, баластні води	Руйнування екосистеми, забруднення води	25 %
Забруднення повітря	Викиди CO_2, NO_x, SO_x, тверді частки	Погіршення якості повітря, зміна клімату	20 %
Мусор в океані	Пластикові відходи, інші забруднення	Загибель морських тварин, порушення екосистем	15 %
Шумове забруднення	Шум, створений судами	Дезорієнтація морських тварин, порушення міграції	10 %
Інвазивні види	Перенос інвазивних видів через баластні води	Зниження біорізноманіття, порушення екосистем	30 %

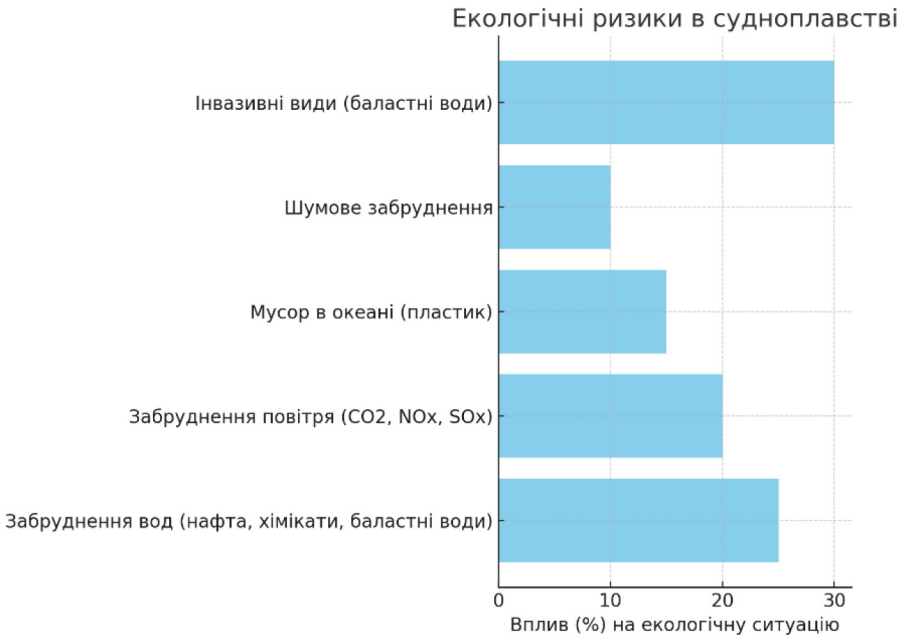


Рис. 2. Розподіл основних екологічних ризиків с судноплавстві

Постановка завдання. В даній статті метою є розгляд основних екологічних ризиків у судноплавстві, оцінка сучасних стандартів і технологій, а також можливості подальшого підвищення екологічної стійкості в цій галузі.

У табл. 1 показаний відсоток впливу від кожного морського екологічного ризику.

Виклад основного матеріалу. Для управління екологічними ризиками у сфері судноплавства було розроблено низку міжнародних норм і стандартів, спрямованих на зменшення негативного впливу цієї галузі на навколишнє середовище. Одним із найважливіших нормативних документів є Конвенція МАРПОЛ (MARPOL Convention), яка регламентує питання забруднення морського середовища з боку суден [8]. Вона охоплює декілька видів забруднень, включаючи нафтові розливи, скиди хімічних речовин, сміття та забруднення повітря.

Конвенція розроблена Міжнародною морською організацією (IMO) і є однією з основоположних міжнародних угод у галузі морської екології. Її метою є запобігання забрудненню морського середовища судноплавством. Вона містить вимоги до очищення баластних вод, обмеження викидів сірки та інших забруднюючих речовин в атмосферу, а також встановлює правила щодо боротьби з нафтовими розливами. Зокрема, структура Конвенції передбачає такі розділи:

- Розділ I – запобігання забрудненню нафтою;
- Розділ II – запобігання забрудненню небезпечними рідкими речовинами;
- Розділ III – запобігання забрудненню сміттям;
- Розділ IV – запобігання забрудненню через викиди в атмосферу.

Одним із останніх досягнень IMO стало впровадження стандарту IMO 2020, який обмежує вміст сірки в судновому паливі до 0,5 %. Це нововведення покликане суттєво знизити рівень викидів сірки в атмосферу та поліпшити якість повітря в прибережних районах.

Крім того, вказане рішення стимулює розвиток нових екологічно чистих технологій, зокрема впровадження зрідженого природного газу (LNG) як альтернативного палива та систем очищення викидів [9].

Технологічні та інноваційні рішення для мінімізації екологічних ризиків. На сьогодні існує низка технологій, спрямованих на зменшення екологічних ризиків у судноплавстві. Серед них особливої уваги заслуговують технології очищення баластних вод, які запобігають поширенню інвазивних видів і мають важливе значення для збереження екологічної стійкості морських екосистем. Сучасні системи очищення води використовують механічні, хімічні та ультрафіолетові методи для видалення мікроорганізмів та інших шкідливих домішок [10].

Системи скруберів застосовуються для очищення газових викидів від сірки, що дає можливість судноплавним компаніям дотримуватись вимог стандарту IMO 2020. Такі системи дозволяють суттєво знизити вміст сірки у викидах, доводячи їх до рівнів, безпечних для довкілля [11].

Використання зрідженого природного газу (LNG) та інших альтернативних видів пального також сприяє значному зменшенню викидів вуглекислого газу, оксидів азоту та сірки. LNG вважається екологічно чистішим пальним у порівнянні з традиційними судновими видами пального [12].

Мінімізація екологічних ризиків у галузі судноплавства потребує значних інвестицій у нові технології, а також суворого дотримання міжнародних стандартів, що впливає на загальну економіку галузі. Проте, незважаючи на високі початкові витрати, забезпечення екологічної стійкості може призвести до довгострокових економічних переваг.

Одним із головних бар'єрів на шляху впровадження екологічно чистих технологій у судноплавстві є їх висока вартість. Наприклад, системи очищення викидів, такі як скрубери, можуть коштувати кілька мільйонів доларів за одну установку. Технології очищення баластних вод також потребують значних капіталовкладень. Однак ці витрати можуть бути компенсовані зниженням штрафів за недотримання екологічних стандартів, а також зменшенням операційних витрат завдяки підвищенню ефективності використання пального [13]. В табл. 2 підсумовано основні технології, їхні переваги та застосування.

Зниження операційних витрат шляхом підвищення енергоефективності суден

Енергоефективність є ключовим чинником у зменшенні операційних витрат судноплавних компаній. Впровадження технологій, що підвищують ефективність використання пального, не лише сприяє зменшенню шкідливих викидів, але й допомагає суттєво скоротити витрати на паливо одну з основних статей витрат у морській логістиці.

Одним із таких рішень є перехід на більш екологічні та ефективні види пального, зокрема зріджений природний газ (LNG). У порівнянні з традиційними видами пального, такими як вугілля

Таблиця 2

Технології для мінімізації екологічних ризиків у судноплавстві

Технологія	Опис	Переваги	Приклад використання
Системи очищення баластних вод	Технології для очищення баластних вод від мікроорганізмів та інвазивних видів	Запобігання поширенню інвазивних видів	Системи для очищення баластних вод на великих суднах
Скруббери для очищення газових викидів	Очищення газових викидів від серних сполук	Зниження викидів серної кислоти в атмосферу	Використання на суднах з високим рівнем забруднення
Альтернативні види пального (LNG)	Використання сжиженого природного газу (LNG) замість традиційного пального	Зниження викидів CO_2, NO_x, SO_x	Встановлення на сучасних контейнеровозах
Оптимізація маршрутів	Використання програмного забезпечення для планування оптимальних маршрутів	Зниження витрат пального, економія часу	Прогнозування погодних умов і вибір найкоротших шляхів

або мазут, LNG має низку переваг: менший вміст діоксиду вуглецю (CO_2), оксидів азоту (NO_x) і сірки (SO_x) у викидах, а також вищу теплотворну здатність.

Використання LNG дозволяє не лише зменшити рівень викидів, а й знизити загальні експлуатаційні витрати за рахунок зменшення витрат на паливо. Наприклад, судна, що працюють на LNG, демонструють вищу енергоефективність, що сприяє зниженню витрат на експлуатацію та подовженню строку служби двигунів [14].

Важливим елементом підвищення енергоефективності також є оптимізація судноплавних маршрутів. Сучасні технології – такі як системи автоматизованого планування маршрутів і прогнозування погодних умов – дозволяють судноплавним компаніям мінімізувати споживання пального, уникаючи несприятливих погодних зон і використовуючи найкоротші шляхи.

Застосування таких технологій зменшує гідродинамічний опір, а також скорочує тривалість переходу, що в підсумку знижує загальне споживання пального. Наприклад, сучасні системи прогнозування і маршрутизації дають змогу скоротити витрати пального на 10–15 %, що значно зменшує операційні витрати компанії.

Технічні інновації, зокрема двигуни нового покоління з підвищеним коефіцієнтом корисної дії, також сприяють економії пального. Такі двигуни мають вдосконалені характеристики згоряння й можуть працювати на альтернативних і менш шкідливих видах пального, зокрема на LNG або метанолі.

Крім того, впровадження рішень для оптимізації роботи суднових систем, наприклад, модернізація гребного комплексу або редукторів дозволяє зменшити енерговитрати на рух судна. Це також стосується регулярного технічного обслуговування, що забезпечує стабільну ефективність роботи двигунів та інших бортових систем.

Зокрема, впровадження нового типу парових турбін на деяких великих контейнеровозах дозволило підвищити їхній ККД на 15 % і зменшити споживання пального під час рейсу, що сприяло економії витрат і зниженню екологічного сліду. В Таблиці 3 представлено порівняння витрат на впровадження різних екологічних технологій в судноплавстві та їх потенційні вигоди в довгостроковій перспективі.

Наприклад, встановлення системи скрубберів для очищення газових викидів, зокрема від серних сполук, на початковому етапі коштує близько $2,000,000. Це висока початкова інвестиція, оскільки такі системи потребують складного обладнання та налаштування. Щорічна економія на експлуатаційних витратах полягає в тому що використання скрубберів дозволяє значно знизити викиди забруднюючих речовин, що сприяє зниженню штрафів за порушення екологічних норм. Тому щорічна економія складає близько $300,000.

Таблиця 3

Оцінка витрат і економії від впровадження екологічних технологій

Технологія	Початкові витрати	Щорічна економія на експлуатаційних витратах	Довгострокова вигода
Скруббери для очищення газових викидів	$2,000,000	$300,000	Зниження штрафів за забруднення
Системи очищення баластних вод	$500,000	$50,000	Поліпшення репутації компанії
Альтернативне паливо (LNG)	$1,000,000	$400,000	Зниження витрат на топливо

А в довгостроковій перспективі судноплавні компанії можуть отримати додаткові вигоди, зокрема у вигляді зниження штрафів за порушення екологічних стандартів, що дозволяє значно знизити фінансові витрати на компенсації за забруднення навколишнього середовища.

Що стосується систем очищення баластних вод то початкові витрати на вартість встановлення систем очищення баластних вод становить близько $500,000, що є середніми витратами на технологію, яка забезпечує очищення води від інвазивних видів та мікроорганізмів. Щорічна економія на експлуатаційних витратах є безумовною незважаючи на значні початкові витрати, впровадження таких систем дозволяє заощадити до $50,000 щорічно завдяки зниженню витрат на екологічні санкції та підтримку відповідності міжнародним стандартам. Крім економії на штрафах, компанії отримують вигоду в довгостроковій перспективі через покращення своєї репутації в галузі екологічної стійкості, що є важливим фактором у залученні нових контрактів і клієнтів.

Інвестиції в систему альтернативних палив, дозволяють використовувати сжижений природний газ (LNG) замість традиційного пального, складають приблизно $1,000,000. LNG є більш дорогим у порівнянні з традиційним паливом, але має суттєві переваги в зниженні екологічних впливів. Заміна традиційного пального на LNG дозволяє судноплавним компаніям заощаджувати до $400,000 на щорічних витратах на топливо завдяки його вищій енергоефективності та меншій вартості викидів CO_2, NO_x та SO_x. А в довгостроковій перспективі LNG дозволяє значно зменшити викиди забруднюючих речовин, що не тільки знижує штрафи, а й покращує імідж компанії на міжнародному рівні. Крім того, це дає можливість відповідати новим екологічним стандартам, таким як IMO 2020, що стає важливим конкурентною перевагою.

Результати досліджень показують, що впровадження зазначених технологій у судноплавній галузі може призвести до економії до 15 % на витратах пального, що в довгостроковій перспективі становить мільйони доларів для великих судноплавних компаній. Окрім зменшення витрат на паливо, компанії отримують додаткові переваги завдяки дотриманню міжнародних екологічних стандартів, таких як IMO 2020, який передбачає зниження викидів сірки та інших забруднюючих речовин.

Таким чином, впровадження енергоефективних технологій не лише сприяє дотриманню екологічних вимог, але й забезпечує відчутні економічні вигоди для судноплавних компаній, знижуючи їхні операційні витрати та підвищуючи конкурентоспроможність на світовому ринку.

Компаніям, які активно впроваджують екологічно чисті технології та дотримуються міжнародних стандартів, вдається покращити свою репутацію, що, своєю чергою, підвищує їхню конкурентоспроможність. Екологічно відповідальні компанії часто отримують більше контрактів від клієнтів, зацікавлених у принципах сталого розвитку. Отже, дотримання екологічних норм може приносити фінансові переваги завдяки збільшенню кількості замовлень і нових партнерств [15].

Висновки. Екологічні ризики, пов'язані з морським транспортом, становлять серйозну загрозу для морського середовища та вимагають комплексного підходу до їх запобігання. Міжнародне законодавство та стандарти, зокрема Конвенція МАРПОЛ та програма IMO 2020, відіграють ключову роль у зменшенні негативного впливу судноплавства на довкілля. Сучасні технології такі як системи очищення баластних вод, скруберні установки та використання альтернативних видів палива істотно сприяють зниженню екологічного навантаження на морське середовище.

Водночас, як уже зазначалося, економічна доцільність екологічних технологій може стати потужним стимулом для сталого розвитку морської галузі. Попри високі початкові витрати, довгострокові переваги – у вигляді зменшення штрафів, підвищення паливної ефективності та покращення іміджу компаній – роблять інвестиції в екологічні рішення економічно виправданими. Основні вигоди включають скорочення експлуатаційних витрат, таких як витрати на паливо та штрафи за недотримання екологічних норм, а також підвищення репутації компаній, що дотримуються глобальних екологічних стандартів.

Інвестування в ці технології не лише сприяє охороні довкілля, а й забезпечує стратегічну перевагу для суднобудівних та судноплавних компаній у конкурентній боротьбі на світовому ринку. Таким чином, сукупний вплив новітніх технологій, міжнародних стандартів і фінансових стимулів може призвести до формування більш чистої та стійкої судноплавної галузі у найближчі роки.

Список літератури:

1. HELCOM. Baltic Sea Environmental Proceedings No. 163: Maritime Activities and Pressures on the Baltic Sea. HELCOM, 2020. URL: https://helcom.fi/wp-content/uploads/2020/03/BSEP163.pdf (дата звернення: 15.12.2024).

2. GESAMP. Sources, Fate and Effects of Microplastics in the Marine Environment: Part 2 of a Global Assessment. IMO/FAO/UNESCO-IOC/UNIDO/WMO/IAEA/UN/UN Environment/UNDP, 2019. URL: https://surl.li/rafqhh (дата звернення: 15.12.2024).

3. David M., Gollasch S. Ballast Water Management and Marine Invasive Species: A Global Overview. Marine Policy. 2019. Vol. 103. P. 60–69. DOI: 10.1016/j.marpol.2019.02.005

4. Andersson K., Brynolf S., Lindgren J.F. Shipping and the Environment: Improving Environmental Performance in Marine Transportation. Springer, 2020. DOI: 10.1007/978-3-030-04330-8

5. Merchant N. D., Pirotta E., Barton T. R. Monitoring Ship Noise to Assess the Impact of Coastal Developments. Environmental Impact Assessment Review. 2019. Vol. 78. Article 106291. DOI: 10.1016/j.eiar.2019.106291

6. International Maritime Organization. Guidelines for the Reduction of Underwater Noise from Commercial Shipping to Address Adverse Impacts on Marine Life. IMO, 2014. URL: https://surl.li/oznetq (дата звернення: 15.12.2024).

7. United Nations Environment Programme. Marine Pollution. UNEP, 2016. URL: https://www.unep.org/resources/report/marine-pollution (дата звернення: 15.12.2024).

8. International Maritime Organization. Greenhouse Gas Emissions from Ships.IMO, 2020. URL: https://surl.lu/bnqbqj (дата звернення: 15.12.2024).

9. International Maritime Organization. IMO 2020: Lowering Sulfur Limits. IMO, 2020. URL: https://surl.li/crdejt (дата звернення: 10.01.2024).

10. United Nations Environment Programme. Marine Litter and Its Impact. UNEP, 2020. URL: https://surl.li/rwphwr (дата звернення: 22.04.2024).

11. World Health Organization. Environmental Noise and Its Effects on Health. WHO, 2019. URL: https://www.who.int/health-topics/environmental-noise (дата звернення: 05.07.2024).

12. United States Environmental Protection Agency. Ballast Water Management: Technologies. EPA, 2020. URL: https://www.epa.gov/npdes/ballast-water-management (дата звернення: 18.09.2024).

13. International Maritime Organization. MARPOL Convention. IMO, 2020. URL: https://www.imo.org/en/OurWork/Environment/Pages/MARPOL.aspx (дата звернення: 03.11.2024).

14. International Maritime Organization. Exhaust Gas Cleaning Systems (Scrubbers). IMO, 2020. URL: https://surl.lu/cmmtkc (дата звернення: 14.06.2024).

15. International Maritime Organization. LNG as a Fuel for Shipping. IMO, 2021. URL: https://surl.li/wblnui (дата звернення: 29.08.2024).

16. Onishchenko O., Bulgakov M., Melnyk O., Volianska Y., Storchak O., Kovalchuk M. Environmental sustainability in maritime transportation through the development of strategies to reduce emissions from marine internal combustion engines. Studies in Systems, Decision and Control. 2024. Vol. 561. P. 509–534. DOI: 10.1007/978-3-031-68372-5_28

17. Bulgakov M., Melnyk O., Kuznichenko S., Zaporozhets A., Sagaydak O., Shcheniavskyi G. Assessing the effectiveness of deoxygenation methods in ballast water treatment. Studies in Systems, Decision and Control. 2025. Vol. 580. P. 107–119. DOI: 10.1007/978-3-031-82027-4_7

18. Булгаков М.П., Бурлаченко Д.А., Никитюк П.В., Щенявський Г.С., Кучеренко В.П. Інноваційні підходи до управління баластними водами на суднах шляхом дистанційного моніторингу та контролю за їх якістю. Водний транспорт. 2023. № 2(38). С. 198–206. DOI: 10.33298/2226-8553.2023.2.38.21

Bulgakov M. P., Melnyk O. M., Puliaiev I. O., Voloshyn D. A. OVERVIEW OF CURRENT CHALLENGES AND WAYS TO MINIMISE ENVIRONMENTAL RISKS IN SHIPPING

Maritime shipping plays a vital role in the global economy, as it handles the majority of international trade by volume. However, the rapid growth of the industry has led to a range of serious environmental risks. These include pollution of water and air, underwater noise, and the spread of invasive species through ballast water discharge. In many cases, these effects are long-lasting and can significantly harm marine ecosystems. Moreover, they pose economic and reputational risks to shipping companies due to stricter environmental regulations and rising public concern. This study analyzes the main environmental threats posed by commercial shipping and evaluates the existing international efforts aimed at reducing them. A key regulatory framework is the MARPOL Convention, which addresses pollution caused by oil spills, hazardous chemicals, garbage, sewage, and exhaust emissions. MARPOL's standards are widely recognized and form the foundation for environmental compliance in global shipping operations. Modern technologies are essential for meeting these

standards. Ballast water treatment systems help prevent the spread of non-native organisms, reducing ecological disruption. Scrubber systems are used to limit sulfur oxide emissions from ship exhausts. Additionally, the use of liquefied natural gas (LNG) is gaining popularity as a cleaner alternative to conventional fuels, offering reductions in CO_2, NO_x, *and* SO_x *emissions. The article also explores how shipping contributes to climate change and biodiversity loss, and emphasizes the need for stronger international cooperation. Collaboration between governments, shipping companies, and environmental organizations is crucial to ensure sustainable maritime operations. By adopting innovative technologies and adhering to global standards, the shipping industry can reduce its environmental footprint and support the protection of marine ecosystems.*

Key words: *shipping, environmental risks, water pollution, air pollution, ballast water, MARPOL, cleaning technologies, alternative fuels, noise pollution, marine ecosystems, international standards, environmental sustainability.*

Відомості про авторів

Скуріхін Д. І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Аніщенко Г. О. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Баранов Є. О. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Барило Г. І. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Безпальченко В. М. – кандидат хімічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Берестенко В. В. – доктор філософії, президент Асоціації міжнародних експедиторів України

Бех П. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Бех Я. П. – аспірант кафедри автоматики та телекомунікації Українського державного університету науки і технологій

Бєлікова К. Г. – доктор державного управління, кандидат технічних наук, професор, старший науковий співробітник, провідний науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Білоног О. В. – аспірант кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Бобик Ю. В. – аспірант Інституту інформаційно-комунікаційних технологій та електронної інженерії

Бойкачов Г. В. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Бойко О. В. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Бойко О. С. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Бойко С. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Бортнічук О. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри готельно-ресторанної справи Національного університету харчових технологій

Боряк Б. Р. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ботяков А. В. – аспірант кафедри управління комерційною діяльністю залізниць Державного університету інфраструктури та технологій

Брич М. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-комп'ютерних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Будник Н. В. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету

Булгаков М. П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри «Судноводіння і морська безпека» Одеського національного морського університету

Бурлуцький О. В. – кандидат технічних наук, асистент кафедри механіки і проектування машин Українського державного університету залізничного транспорту

Василишин В. І. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри радіоелектронних систем пунктів управління повітряних сил Харківського національного університету повітряних сил імені Івана Кожедуба

Васін І. І. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Венгер О. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Вишневський Д. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень Одеського національного морського університету

Волобуєва Т. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри машинобудування Одеської державної академії будівництва та архітектури

Волошин В. О. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Волошин Д. А. – здобувач наукового ступеня доктора філософії кафедри «Судноводіння і морська безпека» Одеського національного морського університету

Ву Джимінг – директор заводу спеціальних електродвигунів (місто Шенчжоу, провінція Чжецзян) Zhejiang Special Motor Co., Ltd

Гаврилів Т. М. – аспірант кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Гаврилюк А. О. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Гармаш Д. В. – доктор філософії, старший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Гетьман А. В. – старший науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Голощапов С. С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Грибанова С. А. – викладач кафедри управління, соціально-гуманітарних та фундаментальних дисциплін Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Грицай С. В. – старший викладач кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Губський С. О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Гунько Є. В. – аспірант Державного університету інфраструктури та технологій

Демидюков О. В. – аспірант кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Дєрябіна І. О. – викладачка кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Дощенко Г. Г. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Дубицький О. С. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету

Єніна І. І. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри льотної експлуатації та безпеки польотів Української державної льотної академії

Живицький І. Б. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Журід В. І. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Зеленський О. В. – асистент кафедри «Транспортні технології» Національного університету «Запорізька політехніка»

Зінченко М. О. – начальник науково-дослідного управління Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Іванов А. А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Івкіна Є. С. – студентка Херсонського національного технічного університету

Кайнаш А. П. – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету

Калашник О. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету

Карнаух Д. М. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного технічного університету «Запорізька політехніка»

Кириллова О. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Киричек Г. Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного технічного університету «Запорізька політехніка»

Кисіль Т. М. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерної інженерії та інформаційних систем Хмельницького національного університету

Козинка О. С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Колодійчук Л. В. – старший викладач кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Комаров В. О. – кандидат технічних наук, провідний науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Конохов В. І. – доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Корбут Є. В. – кандидат технічних наук, доцент кафедри конструювання машин Національного технічного університету України ««Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Котова С. О. – старший викладач кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Кочмала В. Б. – студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Кравчук С. О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікацій Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Красулін О. С. – старший викладач кафедри «Транспортні технології підприємств» ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»

Криволапов Г. Я. – студент факультету інформаційних технологій та математики Київського столичного університету імені Бориса Грінченка

Криволапов Я. В. – асистент кафедри прикладних інформаційних технологій Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Криницький П. К. – магістрант Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Кузнєцов С. І. – кандидат технічних наук, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Курдюк С. В. – доктор філософії, старший науковий співробітник Національного університету «Одеська морська академія»

Курилко О. Б. – кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Куць Н. Г. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету

Кучерук О. Я. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій Хмельницького національного університету

Лісничий В. С. – аспірант кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Лавінський Д. В. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри теоретичної механіки та опору матеріалів Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Лактіонов О.І. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Ларіна І.М. – викладач кафедри експлуатації портів і технології вантажних робіт Навчально-наукового інституту морського бізнесу Одеського національного морського університету

Лашков О.В. – старший викладач кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Лебідь Г.О. – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Левченко Д.С. – аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Ловська А.О. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Лук'янюк С.В. – старший науковий співробітник Українського науково-дослідного інституту спеціальної техніки та судових експертиз Служби безпеки України

Мадінов М.Л. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Макогон В.І. – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Макогон О.С. – аспірант кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Малий О.Ю. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри інформаційних технологій електронних засобів Національного університету «Запорізька політехніка»

Маринін А.І. – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник, завідувач Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Маслій О.М. – доктор педагогічних наук, професор Військової академії (м. Одеса)

Мацкевич В.Л. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Мельник О.М. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

Михайліченко О.В. – аспірант кафедри автоматики, електроніки та телекомунікацій спеціальності 172 «Електронні комунікації та радіотехніка» Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Михалевський Д.В. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інфокомунікаційних систем і технологій Вінницького національного технічного університету

Мороз С.Е. – кандидат педагогічних наук, доцент кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету

Мурад'ян А.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Експлуатація портів і технологія вантажних робіт» Одеського національного морського університету

Мусієнко В.А. – старший науковий співробітник Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Наговський Д.А. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Назаренко В.О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри харчових технологій Полтавського державного аграрного університету

Окороков А.М. – кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортного сервісу та логістики Українського державного університету науки і технологій

Онищенко О.А. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри управління судном Національного університету «Одеська морська академія»

Онищенко С.П. – доктор економічних наук, професор кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Осадчук М.В. – науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та

випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Павлова І. О. – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобілів і транспортних технологій Луцького національного технічного університету

Павлюченков М. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Теоретична і будівельна механіка» Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Паламарчук В. О. – аспірант кафедри мобільних та відеоінформаційних технологій Державного університету інформаційно-комунікаційних технологій

Пасічний В. М. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів Національного університету харчових технологій

Петров О. Д. – аспірант кафедри конструювання машин Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Пивовар О. С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри телекомунікацій, медійних та інтелектуальних технологій Хмельницького національного університету

Пінаєв Б. О. – старший викладач, доктор філософії Вінницького національного технічного університету

Постранський Т. М. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Приймак С. О. – аспірант 1-го курсу кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Присяжнюк В. В. – кандидат технічних наук, старший дослідник, начальник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Пришляк С. О. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Пуляєв І. О. – старший викладач кафедри «Судноводіння і морська безпека» Одеського національного морського університету

Равлюк В. Г. – доктор технічних наук, доцент, професор кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Радіонов О. В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри технічного сервісу та галузевого машинобудування Сумського національного аграрного університету, завод спеціальних електродвигунів (місто Шенчжоу, провінція Чжецзян) Zhejiang Special Motor Co., Ltd

Ремізова Н. Л. – начальник науково-дослідного центру харчової продукції Державного підприємства «Полтавастандартметрологія»

Реута А. В. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Рибін А. В. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Саєнко О. Ф. – студент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Сайко В. Г. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Самохліб О. О. – викладач кафедри авіаційного транспорту Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ

Свірський В. В. – молодший науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Святненко Р. С. – кандидат технічних наук, старший дослідник, старший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії Національного університету харчових технологій

Семенов А.О. – доктор технічних наук, професор кафедри інформаційних радіоелектронних технологій та систем Вінницького національного технічного університету

Семенченко О.О. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри хімічних технологій, експертизи та безпеки харчової продукції Херсонського національного технічного університету

Семичаєвський С.В. – старший науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Сидоренко В.Л. – доктор технічних наук, професор, провідний науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Сколець С.С. – аспірант кафедри телекомунікацій Навчально-наукового інституту телекомунікаційних систем Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Солодовник В.І. – доктор філософії, доцент кафедри телекомунікаційних систем та мереж Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Софронов А.І. – аспірант кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Станілога О.О. – ад'юнкт науково-організаційного відділу Військового інституту телекомунікацій та інформатизації імені Героїв Крут

Степанов О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри тракторів і автомобілів Національного університету біоресурсів і природокористування України

Судник Н.В. – кандидат економічних наук, доцент кафедри «Експлуатація флоту і технологія морських перевезень» Одеського національного морського університету

Тарасенко О.В. – старший викладач кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка»

Тарельник Н.В. – кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри проектування технічних систем Сумського національного аграрного університету

Тюрдьо Н.О. – аспірант кафедри транспортних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Тягунова М.Ю. – кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж Національного технічного університету «Запорізька політехніка»

Федоришин В.С. – магістрант кафедри інженерії вагонів та якості продукції Українського державного університету залізничного транспорту

Фомін О.В. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри «Вагони та вагонне господарство» Державного університету інфраструктури та технологій

Хебда А.С. – заступник директора з навчально-методичної роботи Фахового коледжу інженерії, управління та землевпорядкування Державного некомерційного підприємства «Державний університет «Київський авіаційний інститут»

Хлоба А.А. – аспірант кафедри інформаційних радіоелектронних технологій та систем Вінницького національного технічного університету

Хлопенко М.Я. – доктор технічних наук, професор, професор кафедри електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії

Чеча О.П. – старший викладач кафедри судноводіння і морської безпеки Одеського національного морського університету

Чєркашин Д.В. – студент кафедри «Комп'ютерне моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Чорногор Н.О. – кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри конструкції повітряних суден, авіаційних двигунів та підтримання льотної придатності Української державної льотної академії

Чухліб В.Л. – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Комп'ютерного моделювання та інтегровані технології обробки тиском» Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»

Шапенко Є. М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри транспортних систем та безпеки дорожнього руху Національного транспортного університету

Шевченко О. Ю. – доктор технічних наук, професор, ректор Національного університету харчових технологій

Шлюсар Ю. А. – аспірант кафедри електронної інженерії Національного університету «Львівська політехніка»

Шпирко О. А. – студент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем Вінницького національного технічного університету

Шпур О. М. – кандидат технічних наук, доцент кафедри інформаційно-комунікаційних технологій Національного університету «Львівська політехніка»

Юсипів Т. В. – доктор філософії, асистент кафедри інтегральних та диференціальних рівнянь механіко-математичного факультету Київського національного університету імені Тараса Шевченка

Якіменко М. Л. – науковий співробітник науково-випробувального відділу дослідження пожежно-рятувальної техніки, оснащення та засобів захисту науково-дослідного центру досліджень та випробувань Інституту наукових досліджень з цивільного захисту Національного університету цивільного захисту

Янко А. С. – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій і систем Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

НОТАТКИ

Науковий журнал

ВЧЕНІ ЗАПИСКИ
ТАВРІЙСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ ІМЕНІ В.І. ВЕРНАДСЬКОГО

Серія: Технічні науки

Том 36 (75) № 2 2025

Частина 1

Коректура • *Н. Славогородська*

Комп'ютерна верстка • *Т. Клименко*

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. 30,96. Ум. друк. арк. 41,15. Зам. № 0525/382
Підписано до друку 19.05.2025. 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.