

Системи та технології

(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України.
Серія: “Технічні науки”)

№ 1 (69)

Науковий журнал включено до Переліку наукових фахових видань України категорії “Б”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів з галузі “Технічні науки”, спеціальності D3 Менеджмент; F1 Прикладна математика; F3 Комп'ютерні науки; F5 Кібербезпека та захист інформації; F7 Комп'ютерна інженерія; G5 Електроніка, електронні комунікації, приладобудування та радіотехніка; G11 Машинобудування (за спеціалізаціями); J2 Готельно-ресторанна справа та кейтеринг; J5 Морський та внутрішній водний транспорт; J6 Авіаційний транспорт; J7 Залізничний транспорт; J8 Автомобільний транспорт.



Видавничий дім
«Гельветика»
2025

Системи та технології
(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”)
Науковий журнал. Видається двічі на рік. Заснований у травні 1999 р.
Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою
Університету митної справи та фінансів (протокол № 10 від 09.06.2025 р.)

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

Редакційна колегія:

Кузьменко А. І. – к.т.н., доц.
(головний редактор);
Халіпова Н. В. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Прокопович-Ткаченко Д. І. – к.т.н., доц.
(заступник головного редактора);
Йозеф Костольни – PhD;
Ян Рабчан – PhD;
Бакіров Мюшфік Панах огли – к.т.н.;
Балацька Н. Ю. – д.е.н., доц.;
Бондаренко І. О. – д.т.н., доц.;
Боярчук А. В. – к.т.н., доц.;
Брежнєв Є. В. – д.т.н., с.н.с.;
Вишнікіна О. В. – к.х.н., доц.;
Власов А. В. – к.т.н., ст. досл.;
Волосова Н. М. – к.т.н.;
Гарт Е. Л. – д.ф.-м.н., проф.;
Гордєєв О. О. – к.т.н., доц.;
Джинджоян В. В. – д.е.н., доц.;
Доценко С. І. – д.т.н., доц.;
Защолкін К. В. – к.т.н., доц.;
Котух Є. В. – к.т.н.;

Кузін М. О. – д.т.н., доц.;
Кучер М. М. – к.е.н., доц.;
Мартинюк О. М. – к.т.н., доц.;
Музикін М. І. – к.т.н.;
Нестеренко Г. І. – к.т.н., доц.;
Огар О. М. – д.т.н., проф.;
Охріменко Т. О. – к.т.н.;
Поночовний Ю. Л. – д.т.н., проф.;
Примаченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Прохорченко Г. О. – к.т.н., доц.;
Сабіров О. В. – к.т.н., доц.;
Сохацький А. В. – д.т.н., проф.;
Стеблюк Н. Ф. – к.е.н., доц.;
Стеблянко П. О. – д.ф.-м.н.;
Чопоров С. В. – д.т.н., проф.;
Шапорін Р. О. – к.т.н., доц.;
Щербовських С. В. – д.т.н., с.н.с.;
Юдіна О. І. – д.е.н., доц.;
Язіна В. А. – к.е.н.;
Яремчук С. О. – к.т.н.

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2025-1-69>
ISSN 2521-6643

Коректори: Н. В. Славогородська, Н. С. Ігнатова
Комп'ютерна верстка: А. О. Філатов

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа: Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 1136 від 11.04.2024 року. Ідентифікатор медіа: R30-03967.

Суб'єкт у сфері друкованих медіа – Університет митної справи та фінансів (вул. Володимира Вернадського, 2/4, 49000,
м. Дніпро, e-mail: university.msf@gmail.com, umsf.ua@gmail.com, Тел.: (056) 745-55-96).
Періодичність видання: 2 рази на рік.

Мови розповсюдження: українська, англійська, польська, німецька, французька, італійська, литовська.

Адреса: м. Дніпро, вул. Володимира Вернадського, 2/4, 49000
Тел.: +38 (099) 729 63 79
E-mail: editor@st.umsf.in.ua
Сайт видання: st.umsf.in.ua

Видавництво і друкарня – Видавничий дім «Гельветика»
65101, Україна, 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.

Підписано до друку 10.06.2025. Формат 60×84/8. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 35,57. Обл.-вид. арк. 29,63.
Наклад 100 прим. Замовлення № 0625/481.

Засновник: Університет митної справи та фінансів

ЗМІСТ

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

Зайцева Т. А., Жир С. І., Жушман В. В., Сафронова І. А., Лисиця Н. М. Деякі аспекти викладання дисциплін професійного циклу для студентів прикладної математики з використанням імітаційного моделювання.....	7
Мотайло А. П. Визначення метрик якості скінченного елемента в формі біпіраміди.....	15
Пасічник А. М., Худа Ж. В. Алгоритм оптимізації маршрутів автомобільних перевезень вантажів на основі динамічної модифікації методу гілок і границь.....	23
Сохацький А. В. Деякі питання математичного моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів та їх елементів.....	33

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

Aloshyn S. P. Intelligent vehicle condition analyzer based on parameter dynamics trends	45
Безверхий О. І., Луц В. Є. Порівняльний аналіз API для розпізнавання мовлення за допомогою Python.....	51
Haitan O. M., Snytko I. V. Integrated platforms for automating personal financial accounting based on chatbots and cloud technologies	58
Івасечко А. В., Ліп'яніна-Гончаренко Х. В. Архітектура напівавтоматизованої системи анотації багатомовних архівних рукописних текстів.....	71
Кошова О. П., Черненко О.О., Комар І.І. Розробка платформи для ведення блогу викладача.....	77
Поперешняк С. В., Чорнобривець Д. В. Підхід до виявлення доступності паркувальних місць на основі комп'ютерного зору	83
Трофименко О. Г., Манаков С. Ю., Корнійчук М. М., Лобода Ю. Г., Чикунів П. О. Модальні вікна в інтерфейсі користувача засобами React/Next.js.....	92
Ульяновська Ю. В., Рудянова Т. М., Рябоволенко Е. А., Фесенко А. Р. Аналіз та реалізація алгоритмів пошуку оптимального шляху для програмованих об'єктів у цифрових ігрових просторах.....	103

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

Naborets O. A., Rybalchenko L. V. Types, characteristics and execution methods of cyber fraud.....	112
Прокопович-Ткаченко Д. І., Хрушков Б. С., Деркач Я. О. Постквантові загрози для інформаційної безпеки: виклики глобального та національного рівня.....	118
Прокопович-Ткаченко Д. І., Ульяновська Ю. В., Рудянова Т. М., Хрушков Б. С. Інтеграція автоматизованих методів збору веб-даних у стратегії кібербезпеки держави.....	124
Розломий І. О., Науменко С. В. Архітектура та функціональні особливості захищених систем керування базами даних нового покоління з підтримкою serverless та edge-обчислень.....	130

МЕНЕДЖМЕНТ

Merinova S. V., Romanuke V. V. Perspectives of blockchain technology in business and management: advantages and challenges.....	138
Огліх В. В., Шаповалов О. В., Разгонов С. А., Леснікова І. Ю. Управління транспортними системами інтермодальних та мультимодальних перевезень.....	145
Халіпова Н. В., Кузьменко А. І., Черчата А. О., Гаврилюк В. В. Логістичне управління формуванням параметрів маршрутів міжнародних пасажирських перевезень.....	154
Яковлєва-Мельник Н. Г. Самоменеджмент та командування як ключ до успішного управління та зростання інвестиційно-інноваційного потенціалу підприємства.....	167

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

Пашенко О. В., Перкун І. В., Погребняк В. Г. Підвищення безпеки праці при проведенні гідроструминної водополімерної перфорації свердловин.....	176
Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Shymanskyi V. Ya. Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems.....	187
Рагулін С.В. Розробка методу класифікації функціональних відмов радіоелектронних навігаційних систем, що базується на теорії нечітких множин.....	194

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

Дрожжин О. Л. Інтермодальні перевезення: варіанти композиції і участь морського транспорту.....	205
--	-----

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

Бех П. В., Кузьменко А. І., Рубан О. А., Лашков О. В. Розрахунок режимів управління автомобілями для зменшення числа дорожньо-транспортних пригод	213
Майбородіна Н. В., Герасименко В. П. Модель залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин А-95.....	222
Продан Д. Є., Рибальченко Л. В., Чубенко О. І., Бібік М. В. Цифровізація логістичних процесів, управління ресурсами та оперативне планування в державній спеціальній службі транспорту.....	230
Разгонов С. А., Леснікова І. Ю., Огліх В. В., Шаповалов О. В. Про модель функціональної безпеки керованих одноканальних транспортних пристроїв.....	237

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

Альперт С. І. Новітні методи обробки неточних даних для вирішення задач у сфері радіолокаційного спостереження та дистанційного зондування землі.....	245
Бобирь Д. С., Тягунова М. Ю. Вимоги до автоматизованої системи підбору олив	253
Воловик А. Ю., Кичак В. М., Савицький А. Ю., Макогон В. І. Оцінювання даних в телеметричному каналі, враженому хаотично-імпульсними перешкодами.....	259
Semenov A. O., Khloba A. A. Control devices for projection reflections in the phase space of strange attractors of dynamic chaos generators.....	269

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА ТА КЕЙТЕРИНГ

Горб К. М., Корнєєв М. В., Горожанкіна Н. А., Кучер М. М. Технології екскурсійного та супровідного обслуговування у сфері туризму та гостинності.....	278
Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Shchokolova H. V., Dovhopolyi D. Ye. Consumer loyalty programs in the world's largest hotel chains.....	288
Погребняк А. В., Кучер М. М., Сабіров О. В., Гриценко А. В. Енергоефективність у проектуванні та будівництві готельних та ресторанних об'єктів.....	294
Yudina O. I., Nebaba N. O., Saihak Ye. L., Tatarenko D. K. Peculiarities and modern trends in the organization of hotel services.....	300

CONTENTS

APPLIED MATHEMATICS

Zaytseva T. A., Zhyr S. I., Zhushman V. V., Safronova I. A., Lysytsia N. M. Some aspects of teaching professional cycle disciplines for students of applied mathematics using simulation modeling.....	7
Motailo A. P. Determining the quality metrics of a finite element in the shape of a bipyramid.....	15
Pasichnyk A. M., Khuda Zh. V. Algorithm for optimization of road transportation cargo routes based on dynamic modification of the twig and boundary method.....	23
Sokhatskyi A. V. Some issues of mathematical modeling of turbulent flows around transport vehicles and their elements.....	33

COMPUTER SCIENCES

Aloshyn S. P. Intelligent vehicle condition analyzer based on parameter dynamics trends	45
Bezverkhyi O. I., Luts V. E. Python speech recognition API comparison.....	51
Haitan O. M., Snytko I. V. Integrated platforms for automating personal financial accounting based on chatbots and cloud technologies	58
Ivasechko A. V., Lipianina-Honcharenko Kh. V. Architecture of a semi-automated annotation system for multilingual archival handwritten texts.....	71
Koshova O. P., Chernenko O. O., Komar I. I. Developing a platform for teacher blogging.....	77
Popereshnyak S. V., Chornobryvets D. V. A Computer Vision-Based Approach to Parking Space Availability Detection.....	83
Trofymenko O. G., Manakov S. Yu., Korniiichuk M. M., Loboda Yu. V., Chykunov P. O. Modal Windows in the in UI with React/Next.js.....	92
Ulianovska Yu. V., Rudianova T. M., Riabovolenko E. A., Fesenko A. R. Analysis and implementation of algorithms for finding the optimal path for programmable objects in digital game spaces.....	103

CYBERSECURITY AND DATA PROTECTION

Haborets O. A., Rybalchenko L. V. Types, characteristics and execution methods of cyber fraud.....	112
Prokopovych-Tkachenko D. I., Khrushkov B. S., Derkach Y. O. Post-quantum threats to information security: challenges at the global and national levels.....	118
Prokopovych-Tkachenko D. I., Ulianovska Yu. V., Rudianova T. M., Khrushkov B. S. Integration of automated methods of web data collection into state cybersecurity strategies.....	124
Rozlomii I. O., Naumenko S. V. Architecture and functional features of the next-generation secure database management systems with support for serverless and edge computing.....	130

MANAGEMENT

Merinova S. V., Romanuke V. V. Perspectives of blockchain technology in business and management: advantages and challenges.....	138
Ohlikh V. V., Shapovalov A. V., Razghonov S. A., Lesnikova I. Yu. Management of intermodal and multimodal transportation systems.....	145
Khalipova N. V., Kuzmenko A. I., Cherchata A. O., Havryliuk V. V. Logistics management of international passenger transportation routes parameters forming	154
Yakovlieva-Melnyk N. H. Self-management and team building as keys to successful enterprise management.....	167

MECHANICAL ENGINEERING (WITH SPECIALIZATIONS)

Pashchenko A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G. Enhancing occupational safety in hydrojet water-polymer perforation of wells.....	176
Pogrebnyak A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G., Shymanskyi V. Ya. Improvement of labour safety and safety of life activities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems.....	187
Rahulin S. V. Development of the method of classification of functional failures of radio electronic navigation systems based on the theory of fuzzy sets.....	194

MARITIME AND INLAND WATER TRANSPORT

Drozhzhyn O. L. Intermodal transportation: composition options and the importance of maritime transport.....	205
---	-----

ROAD TRANSPORT

Bekh P. V., Kuzmenko A.I., Ruban O.A., Lashkov A.V. Calculation of vehicle driving modes to reduce the number of road accidents.....	213
Maiborodina N. V., Gerasymenko V. P. Dependence model of freight turnover in road transport on the price of A-95 gasoline.....	222
Prodan D. Ye., Rybalchenko L. V., Chubenko O. I., Bibik M. V. Digitalization of logistics processes, resource management and operational planning in the State Special Transport Service	230
Razghonov S. A., Lesnikova I. Yu., Oglih V. V., Shapovalov O. V. About the controlled single-channel transport devices functional safety model.....	237

ELECTRONICS, ELECTRONIC COMMUNICATIONS, INSTRUMENT ENGINEERING AND RADIO ENGINEERING

Alpert S. I. The novel methods of processing imprecise data for solution of radar surveillance and remote sensing tasks.....	245
Bobur D. S., Tiahunova M. Yu. Requirements for the automated oil selection system.....	253
Volovyk A. Yu., Kychak V. M., Savytskyi A. Yu., Makohon V. I. Telemetry channel data estimation exposed to chaotic impulse-pulse disturbances.....	259
Semenov A. O., Khloba A. A. Control devices for projection reflections in the phase space of strange attractors of dynamic chaos generators.....	269

HOTEL AND RESTAURANT BUSINESS AND CATERING

Horb K. M., Korneyev M. V., Horozhankina N. A., Kucher M. M. Technologies of excursion and accompanying service in the sphere of tourism and hospitality.....	278
Horozhankina N. A., Korneyev M. V., Shcholokova H. V., Dovhopolyi D. Ye. Consumer loyalty programs in the world's largest hotel chains.....	288
Pogrebnyak A. V., Kucher M. M., Sabirov O. V., Grytsenko A. V. Energy efficiency in the design and construction of hotel and restaurant facilities.....	294
Yudina O. I., Nebaba N. O., Saihak Ye. L., Tatarenko D. K. Peculiarities and modern trends in the organization of hotel services.....	300

ПРИКЛАДНА МАТЕМАТИКА

УДК 378, 519.876.5

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.1>

Зайцева Т. А., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0000-0002-6346-3390

Жир С. І., кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент
кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0006-2410-6792

Жушман В. В., доктор філософії, доцент кафедри
комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0009-0000-7292-5879

Сафронова І. А., кандидат фізико-математичних наук,
доцент кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0000-0003-0242-3798

Лисиця Н. М., асистент кафедри комп'ютерних технологій
Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
ORCID: 0000-0001-9838-9533

ДЕЯКІ АСПЕКТИ ВИКЛАДАННЯ ДИСЦИПЛІН ПРОФЕСІЙНОГО ЦИКЛУ ДЛЯ СТУДЕНТІВ ПРИКЛАДНОЇ МАТЕМАТИКИ З ВИКОРИСТАННЯМ ІМІТАЦІЙНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

У статті досліджено аспекти застосування засобів імітаційного моделювання у процесі викладання дисциплін професійного циклу для студентів спеціальності «Прикладна математика». Особливу увагу приділено демонстрації повного циклу розв'язання фахових задач – від постановки та деталізації до побудови моделі й застосування специфічних методів і відповідних програмних пакетів. Такий підхід сприяє формуванню цілісного розуміння принципів моделювання та їх практичного застосування у майбутній професійній діяльності. Також, слід зазначити його ключову роль і в науково-дослідницькій діяльності студентів, сприяючи розвитку аналітичного мислення та практичних навичок побудови, верифікації та застосування імітаційних моделей складних систем. Воно формує основу для проведення фундаментальних та прикладних досліджень, дозволяючи студентам розробляти власні моделі та методики аналізу, що є важливим для вирішення сучасних технічних та управлінських завдань.

Імітаційне моделювання, у контексті підготовки фахівців з прикладної математики, виступає одним із ключових інструментів, що забезпечує не лише глибоке розуміння теоретичних основ, але й розвиток практичних навичок аналізу складних систем. Його застосування в навчальному процесі сприяє активізації аналітичного мислення студентів та формуванню важливих професійних компетентностей, необхідних для успішної діяльності в галузі комп'ютерного моделювання та суміжних сферах.

У статті наведено приклади інтеграції імітаційного моделювання в різні фахові дисципліни для студентів прикладної математики, що дозволяє наочно продемонструвати можливості всебічного аналізу складних стохастичних і детермінованих процесів з урахуванням багатотакторних взаємодій. Показано, як використання методів моделювання сприяє дослідженню нелінійної динаміки систем, застосуванню багатокритеріальної оптимізації та розробці алгоритмів прогнозування реальних процесів безпосередньо в навчальному середовищі. Особливу увагу приділено впровадженню агентно-орієнтованого, дискретно-подієвого та гібридного моделювання, що спрямовано на формування ключових компетентностей у математичному аналізі, алгоритмічному проектуванні та цифровому прогнозуванні.

© Т. А. Зайцева, С. І. Жир, В. В. Жушман, І. А. Сафронова, Н. М. Лисиця, 2025

У статті розглянуто інтеграція в навчальний процес таких інструментів моделювання, як метод скінченних елементів, стохастичне моделювання, фрактальна геометрія та моделі на основі диференціальних рівнянь, що є ключовими для розв'язання складних технічних задач. Проілюстровано можливості використання сучасних інструментів симуляційного аналізу, зокрема Aimsun, Ansys, AnyLogic, GPSS, NetLogo та Simulink, для структурного та поведінкового моделювання в межах освітньої програми з прикладної математики. Зазначено, що таке комплексне застосування методів та інструментів імітаційного моделювання суттєво впливає на формування у студентів глибоких компетентностей в алгоритмічному мисленні, чисельному моделюванні та інженерних обчисленнях, готуючи їх до успішної професійної діяльності. Запропоновано оновлення освітніх компонент через розширення практичного застосування симуляційного аналізу, посилення аналітичного компонента та впровадження міждисциплінарного підходу.

Ключові слова: прикладна математика, компетентності, імітаційне моделювання, вища освіта, професійно орієнтовані завдання, інструменти симуляційного аналізу.

Zaytseva T. A., Zhyr S. I., Zhushman V. V., Safronova I. A., Lysytsia N. M. Some aspects of teaching professional cycle disciplines for students of applied mathematics using simulation modeling

The article investigates the aspects of using simulation modeling tools in the process of teaching professional cycle disciplines for students majoring in Applied Mathematics. Particular attention is paid to demonstrating the full cycle of solving professional problems – from formulation and detailing to model construction and application of specific methods and appropriate software packages. This approach contributes to the formation of a holistic understanding of modeling principles and their practical application in future professional activities. It should also be noted that it plays a key role in students' research activities, contributing to the development of analytical thinking and practical skills in building, verifying and applying simulation models of complex systems. It forms the basis for fundamental and applied research, allowing students to develop their own models and analysis methods, which is important for solving modern technical and managerial problems.

Simulation modeling, in the context of training specialists in applied mathematics, is one of the key tools that provides not only a deep understanding of theoretical foundations but also the development of practical skills in analyzing complex systems. Its use in the educational process helps to activate students' analytical thinking and form important professional competencies necessary for successful activities in the field of computer modeling and related fields.

The article presents examples of the integration of simulation modeling into various professional disciplines for students of applied mathematics, which allows to demonstrate the possibilities of a comprehensive analysis of complex stochastic and deterministic processes with regard to multifactorial interactions. It is shown how the use of modeling methods contributes to the study of nonlinear system dynamics, the application of multicriteria optimization, and the development of algorithms for predicting real processes directly in the learning environment. Particular attention is paid to the introduction of agent-based, discrete-event and hybrid modeling, which is aimed at forming key competencies in mathematical analysis, algorithmic design and digital forecasting.

The article discusses the integration of such modeling tools as the finite element method, stochastic modeling, fractal geometry, and models based on differential equations into the educational process, which are key to solving complex technical problems. The possibilities of using modern software packages, such as Aimsun, Ansys, AnyLogic, GPSS, NetLogo, and Simulink, for structural and behavioral modeling within the framework of the applied mathematics curriculum are illustrated. It is noted that such an integrated use of simulation modeling methods and tools significantly affects the formation of students' deep competencies in algorithmic thinking, numerical modeling and engineering computing, preparing them for successful professional activities. It is proposed to update the educational components by expanding the practical application of simulation analysis, strengthening the analytical component and introducing an interdisciplinary approach.

Key words: applied mathematics, competencies, simulation modeling, higher education, professionally oriented tasks, simulation analysis tools.

Постановка проблеми. Імітаційне моделювання є незамінним інструментом, що дозволяє оцінювати складні процеси без ризику, який може виникнути при реальних експериментах. Завдяки використанню імітаційних моделей, можна оцінювати поведінку об'єктів у різних сценаріях, прогнозувати можливі наслідки рішень та шукати оптимальні шляхи їх реалізації.

Окрім технічних розрахунків та економічних прогнозів, цей метод можна застосовувати в логістиці, військовій справі, біології, медицині, авіації, ракетобудуванні, урбаністиці, а також у сфері штучного інтелекту для тестування нових алгоритмів. Особливу роль імітаційне моделювання відіграє у розробці нових систем, коли потрібно ще на етапі проектування оцінити їх характеристики, функціональність та потенційні сценарії поведінки. Це дозволяє значно зменшити ризики та знизити витрати, оскільки виявлення недоліків відбувається до початку реального впровадження.

Як визначено у [10] оволодіння методами імітаційного моделювання є ключовим етапом професійної підготовки для студентів спеціальності F1 Прикладна математика. Це зумовлено тим, що в процесі навчання вони отримують здатність:

- будувати математичні і комп'ютерні моделі реальних систем;
- програмувати алгоритми, що відтворюють складні процеси;
- проводити експериментальне моделювання та аналізувати результати;
- застосовувати методи і засоби моделювання для оптимізації та прогнозування.

Інтеграція цього методу в навчальний процес дозволяє студентам краще засвоювати теоретичні концепції і знаходити практичні рішення. Треба відзначити, що традиційне навчання, засноване лише на теоретичних матеріалах і традиційних підходах до комп'ютерного моделювання не завжди дає повне уявлення. Тому важливо, щоб саме імітаційне моделювання було не тільки окремою дисципліною, а і частиною інших цілісних дисциплін, що охоплюють як обов'язкові так і вибіркові освітні компоненти.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Відповідно до Закону України «Про освіту» [7], інтеграція сучасних методів моделювання в навчальні програми забезпечує практичну складову освітнього процесу та підготовку фахівців, спроможних до здійснення наукової та інженерної діяльності.

Імітаційне моделювання активно використовується в рамках наукових досліджень, що проводяться здобувачами першого (бакалаврського), другого (магістерського) та третього (освітньо-наукового) рівня вищої освіти, відповідно до вимог [8]. Використання імітаційних моделей у кваліфікаційних роботах дозволяє не лише розширити теоретичну базу досліджень, а й розробляти прикладні рішення для оптимізації процесів у галузях транспорту, логістики, економіки та технічних наук.

Згідно з стандартами вищої освіти [10], впровадження імітаційного моделювання в навчальні програми сприяє формуванню міждисциплінарних компетентностей та інтеграції знань з різних наукових напрямів. Цей підхід є актуальним у контексті цифровізації освітнього процесу та відповідності міжнародним практикам.

Навички традиційних комп'ютерного і математичного моделювання відіграють важливу роль у підготовці студентів спеціальності «Прикладна математика». Вони належать до загальних освітніх результатів, охоплюють особистісні характеристики, метапредметні компетенції та професійні знання, необхідні для ефективного застосування сучасних методів у практичній діяльності [1 – 4].

Завдяки стрімкому розвитку обчислювальних технологій, імітаційне моделювання стає одним із найважливіших інструментів для аналізу складних реальних процесів [5, 6]. У зв'язку з цим зростає потреба у модернізації інженерно-технічної і математичної освіти. Сьогодні навчання має бути спрямоване не лише на засвоєння теоретичних знань, а й на розвиток логічного мислення, освоєння методів математичного аналізу та формування навичок перетворення прикладних задач у комп'ютерні і математичні моделі.

Сучасна трансформація освіти, зумовлена суспільно-економічними запитами, робить пріоритетним розвиток практичних компетенцій студентів. Це передбачає не лише засвоєння знань, а й формування здатності ефективно застосовувати математичні методи у професійній діяльності.

Компетентність випускника – це його готовність використовувати здобуті знання для розв'язання реальних проблем. Освіта має бути побудована таким чином, щоб уже з першого року навчання студенти розуміли зв'язок дисциплін із майбутньою професією та перспективами розвитку суспільства.

Для досягнення вищого рівня компетентності необхідно систематично переглядати зміст освітніх програм, інтегруючи прикладні аспекти моделювання в навчальний процес. Це сприятиме підвищенню мотивації студентів та підготовці конкурентоспроможних фахівців.

Метою статті є:

- дослідження методологічних особливостей викладання імітаційного моделювання у вищій освіті, через впровадження у освітні компоненти, спрямовані на професійну підготовку студентів спеціальності F1 «Прикладна математика»;

- проведення аналізу структури та підходів до викладання імітаційного моделювання як у обов'язкових компонентах навчального плану, так і у вибіркових дисциплінах, інтегрованих для розширення професійних практичних навичок студентів;

- надання пропозицій рекомендаційного характеру щодо оптимізації навчального процесу із врахуванням специфіки дисципліни, рівня підготовки здобувачів освіти та сучасних тенденцій у сфері моделювання.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо освітню програму «Комп'ютерне моделювання та технології програмування» за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти спеціальності «Прикладна математика» [9]. Згідно зі стандартом вищої освіти спеціальності «Прикладна математика» [10] у табл. 1 наведемо перелік загальних (ЗК) і фахових (ФК) компетентностей, що пов'язані з комп'ютерним, математичним, а також і з імітаційним моделюванням.

Ці компетентності охоплюють теоретичні засади, методи математичного аналізу, використання спеціалізованих програмних засобів та проведення експериментальних розрахунків. Вони створюють фундамент для успішного освоєння імітаційного моделювання, сприяючи розвитку аналітичного мислення, здатності формалізувати задачі та застосовувати математичні методи у практичних дослідженнях.

Навчальний план за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти спеціальності «Прикладна математика» освітньої програми «Комп'ютерне моделювання та технології програмування», включає широкий набір дисциплін, які формують фундаментальні та прикладні навички моделювання взагалі.

До обов'язкових компонентів професійної підготовки входять *Комп'ютерне моделювання систем та процесів* та *Комп'ютерні моделі динамічних процесів*.

Перелік загальних (ЗК) і фахових(ФК) компетентностей, що пов'язані з комп'ютерним, математичним та імітаційним моделюванням

Код компетентності	Компетентності, визначені стандартом вищої освіти
ЗК02	Здатність застосовувати знання у практичних ситуаціях, що включає роботу з математичними моделями та їхнє використання для аналізу реальних процесів.
ЗК06	Абстрактне мислення, аналіз та синтез, що є ключовими навичками для розробки імітаційних моделей та математичного прогнозування.
ЗК07	Здатність до пошуку, оброблення та аналізу інформації з різних джерел, що допомагає знаходити дані для побудови моделей та перевіряти їхню достовірність
ЗК05	Здатність проведення досліджень на відповідному рівні, що включає експериментальне та аналітичне моделювання у наукових розробках
ЗК10	Навички у використанні інформаційних і комунікаційних технологій, оскільки моделювання часто здійснюється за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення та комп'ютерних симуляцій.
Діяльність із застосування математичних методів	
ФК03	Здатність обирати та застосовувати математичні методи для моделювання, аналізу, прогнозування та прийняття рішень.
Технологічна діяльність	
ФК09	Здатність до проведення математичного та комп'ютерного моделювання, аналізу та обробки даних, обчислювального експерименту.
Науково-дослідна діяльність	
ФК12	Здатність до пошуку, систематичного вивчення та аналізу науково-технічної інформації, пов'язаної із математичним моделюванням.
ФК14	Здатність формувати математичну постановку задачі, обираючи методи її розв'язання, що забезпечують необхідну точність і надійність результату.

Вибірковий блок охоплює дуже широкий спектр дисциплін, зокрема є група таких, що пов'язані з моделюванням безпосередньо: *Моделювання природничих процесів, Основи комп'ютерного моделювання, Основи теорії стійкості нейромережеских моделей, Моделювання природничих та техногенних процесів, Моделювання, аналіз та оптимізацію систем різної природи, Реконструювання математичних моделей процесів методом SINDy, Прийняття рішень в умовах невизначеності в бізнес-системах, Моделювання економетричних процесів, Моделювання бізнес-процесів в умовах конкуренції, Моделі багатокритеріальної оптимізації в бізнесі, Моделювання соціально-економічних процесів, а також Методи computer modeling and simulation.*

Опанування цих дисциплін потребує ґрунтовної математичної та програмної підготовки. Необхідною базою для їхнього освоєння є такі ключові предмети, як *Математичний аналіз, Дискретна математика, Математична статистика, Теорія ймовірності, Математична логіка, Математичні основи програмування, Методи оптимізації, Логістика, Програмування та Об'єктно-орієнтоване програмування*, які входять до блоку обов'язкових компонент циклу професійної підготовки.

Ці дисципліни забезпечують студентам глибоке розуміння математичних методів, аналітичних підходів та алгоритмів, які є основою моделювання складних систем, розробки програмного забезпечення та аналізу великих обсягів даних.

Такий набір дисциплін забезпечує студентам вільний вибір з одного боку, а з іншого – ґрунтовну математичну підготовку, спрямовану на практичне використання сучасних методів аналізу, прогнозування та оптимізації в різних галузях. Безперечно, імітаційне моделювання є невід'ємною складовою навчального процесу, впроваджуючись у робочі програми цих дисциплін. Викладання охоплює теоретичні засади, практичне опрацювання методів та детальний аналіз реальних процесів, що сприяє глибшому засвоєнню матеріалу та розвитку прикладних навичок.

В умовах воєнного часу навчальний процес організований у змішаному форматі, де основна частина занять проводиться дистанційно. Викладання як обов'язкових, так і вибірових дисциплін передбачає такі форми навчання як лекції, лабораторні та практичні заняття.

Теоретичний матеріал представлений у форматі комп'ютерних презентацій, що допомагає візуалізувати ключові концепції, сприяє кращому засвоєнню знань та підтримує зацікавленість студентів [2]. Під час лекцій застосовується контекстний та проблемний підхід, що дозволяє краще зрозуміти зміст дисциплін та їх практичне значення.

Для закріплення матеріалу після кожного розділу доцільно проводити тестування або контрольні роботи, які часто включають практичні завдання, що потребують розробки імітаційної моделі та проведення

відповідного комп'ютерного експерименту. Саме онлайн-формат створює комфортні умови для виконання таких експериментів.

Регулярна перевірка засвоєння здобувачами знань дозволяє налагодити зворотний зв'язок, своєчасно виявляти прогалини у засвоєнні матеріалу та коригувати зміст і методи навчання для підвищення ефективності освітнього процесу.

Треба відзначити, що сучасні системи моделювання майже звільняють дослідників від необхідності програмування, автоматично створюючи моделі на основі формалізованих схем [11 – 13, 15]. Ці схеми враховують параметри системи, зовнішні впливи та особливості її функціонування, що робить такий підхід перспективним для розвитку інструментів імітаційного моделювання.

Досвід світових і українських досліджень підтверджує ефективність спеціалізованих імітаційних мов [1], які використовуються в різних сферах. Сьогодні, майже жоден масштабний проєкт не обходиться без попереднього моделювання, адже це дозволяє мінімізувати ризики та підвищити точність прогнозування [6].

На сьогодні відомо дуже багато мов моделювання, що обумовлено різноманітністю класів моделюваних систем, цілей та методів моделювання. Саме прагнення спростити та прискорити процес створення моделей сприяло розвитку автоматизації програмування імітаційних моделей.

У навчальному процесі нами використовуються різні програмні засоби. Список їх систематично оновлюється. Ось найбільш застосовувані Aimsun [11], Ansys [12], AnyLogic [13], GPSS, NetLogo [14], Simulink [15],

Aimsun Next – програмний продукт, що забезпечує можливості багаторівневого моделювання: від мікроскопічного моделювання поведінки окремих транспортних засобів до макроскопічного аналізу мобільності в масштабі міста чи регіону. У навчальному процесі Aimsun Next активно застосовано для проведення симуляцій дорожнього руху, аналізу ефективності транспортної інфраструктури та оцінки наслідків впровадження різних транспортних стратегій. Це дозволяє інтегрувати теоретичні знання з практичним моделюванням, сприяючи глибшому розумінню принципів управління мобільністю.

Крім того, Aimsun може бути корисним у проведенні наукових досліджень і курсових робіт, де студенти аналізують реальні транспортні дані та розробляють оптимізаційні рішення для дорожніх мереж. Використання цього програмного забезпечення в навчальних програмах допомагає майбутнім фахівцям опанувати сучасні методи аналізу та прогнозування транспортних потоків, що є критично важливим у сфері інфраструктурного розвитку.

Імітаційне моделювання в Ansys використовується для аналізу складних фізичних процесів, дозволяючи інженерам прогнозувати поведінку систем у реальних умовах. Ansys підтримує дискретно-подієве моделювання, метод скінчених елементів (МСЕ) та мультифізичне моделювання, що дає змогу враховувати взаємодію різних фізичних явищ, таких як механічні навантаження, теплопередача та електромагнітні поля.

Ця технологія широко застосовується у автомобільній, аерокосмічній, медичній та електронній промисловості, допомагаючи оптимізувати конструкції, зменшувати витрати на розробку та підвищувати ефективність продуктів. Ansys дозволяє проводити віртуальні експерименти, що значно скорочує потребу у фізичних тестах, а також підтримує параметричне моделювання, що дає змогу швидко змінювати характеристики моделі та аналізувати їхній вплив на систему.

AnyLogic – програмне забезпечення для імітаційного моделювання, яке дозволяє створювати складні моделі бізнес-процесів, виробничих систем, логістики та соціальних явищ. Його головна особливість – підтримка трьох основних методів моделювання: системної динаміки, дискретно-подієвого моделювання та агентного моделювання, що дає можливість комбінувати різні підходи в межах однієї моделі, і робить AnyLogic універсальним інструментом для аналізу складних систем.

AnyLogic широко використовується у таких сферах, як виробництво, логістика, ринок та конкуренція, охорона здоров'я, телекомунікації та соціальні системи.

AnyLogic має інтуїтивно зрозумілий графічний інтерфейс, який дозволяє створювати моделі за допомогою drag-and-drop елементів, а також підтримує візуалізацію та анімацію процесів у 2D та 3D. Це робить його зручним для презентацій та аналізу результатів моделювання. Крім того, програмне забезпечення містить галузеві бібліотеки, які допомагають моделювати специфічні процеси, такі як транспортні потоки, виробничі лінії та поведінку пішоходів.

GPSS (General Purpose Simulation System) – це одна з перших і найвідоміших дискретно-подієвих імітаційних мов, розроблена IBM. Вона працює на основі подій, які відбуваються у визначені моменти часу, і використовує блокову структуру, де кожен блок представляє певну операцію або зміну стану системи. GPSS дозволяє моделювати складні процеси, такі як виробничі лінії, транспортні системи та логістичні мережі.

Сучасна версія GPSS – *GPSS World*, яка була створена у 1993 році, підтримує розширені можливості статистичного аналізу, автоматичне проведення експериментів та візуалізацію результатів моделювання. Вона використовується у різних галузях, включаючи виробництво, телекомунікації та транспорт, допомагаючи дослідникам та інженерам оптимізувати процеси та прогнозувати їхню поведінку.

NetLogo – це потужне середовище для багатоагентного моделювання, яке дозволяє створювати складні симуляції природних, соціальних та економічних процесів. Розроблене в Northwestern University, NetLogo використовує простий синтаксис, заснований на мові Logo, що робить його доступним для дослідників,

студентів та викладачів. Основна особливість NetLogo – можливість моделювати тисячі незалежних агентів, які взаємодіють між собою та з навколишнім середовищем, що дозволяє аналізувати складні системи та їхню еволюцію. Програмне забезпечення підтримує візуалізацію в реальному часі, що допомагає користувачам спостерігати за динамікою моделі та змінювати параметри для тестування різних сценаріїв. NetLogo широко використовується у біології, соціології, економіці, екології та освіті, а його бібліотека готових моделей дозволяє швидко розпочати роботу. Додатково, NetLogo підтримує HubNet, що дає змогу проводити інтерактивні симуляції для груп користувачів.

Simulink – це середовище для моделювання, симуляції та аналізу динамічних систем, яке інтегровано з MATLAB. Воно дозволяє інженерам і дослідникам створювати графічні блокові діаграми для проектування складних систем, тестувати алгоритми управління, проводити симуляцію в реальному часі та генерувати код для вбудованих пристроїв. Завдяки інтуїтивному графічному інтерфейсу користувачі можуть швидко розробляти та аналізувати математичні моделі, перевіряти їхню працездатність без необхідності у фізичному прототипі, що значно скорочує час та витрати. Simulink широко використовується в автомобільній промисловості, аерокосмічних технологіях, автоматизації, цифровій обробці сигналів та управлінні складними процесами, забезпечуючи ефективний інструмент для інженерних рішень.

У навчальному процесі Simulink використовується для викладання основ моделювання та симуляції динамічних систем, допомагаючи студентам візуалізувати математичні концепції та експериментувати з параметрами моделей. Він дозволяє легко налаштовувати й тестувати алгоритми управління, а також аналізувати поведінку систем у різних умовах. Крім того, завдяки можливості інтеграції з MATLAB, студенти можуть розробляти складні моделі та автоматизувати процеси, що робить Simulink важливим інструментом у технічній освіті.

Імітаційне моделювання відіграє ключову роль не лише в освітньому процесі, а й у науково-дослідницькій діяльності студентів, сприяючи розвитку аналітичного мислення та навичок моделювання складних систем. Воно формує основу для проведення фундаментальних та прикладних досліджень, дозволяючи студентам розробляти власні моделі та методики аналізу, що є важливим для вирішення сучасних технічних та управлінських завдань.

Багато випускників обирають імітаційне моделювання як напрям своїх кваліфікаційних робіт, адже воно надає можливість проводити глибокі дослідження та генерувати практичні рішення, які можуть бути застосовані в різних галузях науки і техніки. Використання цього підходу сприяє інтеграції математичного аналізу, комп'ютерних технологій і наукових методів, що є необхідним для підготовки фахівців, здатних до вирішення складних технічних завдань та оптимізації процесів у реальних умовах.

Застосування імітаційного моделювання також має вагоме значення у міждисциплінарних дослідженнях, де воно допомагає об'єднати знання з різних наукових сфер, таких як інженерія, економіка, міське планування та медична аналітика. Завдяки цьому студенти не лише здобувають теоретичні знання, а й розвивають практичні навички моделювання складних систем, що підвищує їхню конкурентоспроможність на ринку праці.

Висновки. Системний розвиток освітніх стандартів вищої освіти вимагає оновлення підходів до викладання дисциплін професійного циклу. У цьому контексті особливого значення набуває саме імітаційне моделювання як один із ключових інструментів аналізу та прогнозування. Також виправдане зростання значення прикладної математики у науці та технологіях зумовлює потребу в її подальшій інтеграції в навчальні програми університетів, що сприяє формуванню практично орієнтованих навичок у студентів. Тому пропонується:

- збільшити мотивацію студентів, поєднуючи теоретичні аспекти з реальними завданнями;
- розширити практичну складову теоретичних математичних дисциплін, інтегруючи реальні прикладні задачі;
- поглибити розуміння математичних принципів, демонструючи їхнє застосування у різних наукових та інженерних сферах.

Саме використання математичного моделювання як універсального методу дослідження надає студентам змогу розширити аналітичні навички, підвищити рівень математичної культури та навчитися ефективно працювати з інформаційними даними. Такий формат навчання є інноваційним, оскільки не лише модернізує зміст дисциплін, але й змінює методологію викладання, роблячи її більш практично спрямованою.

У якості висновків, можна сказати, що імітаційне моделювання відіграє ключову роль у сучасній освіті, забезпечуючи студентам необхідні професійні компетенції. Компетентнісний підхід дозволяє підготувати фахівців, які здатні працювати з математичними моделями у наукових та технічних сферах, а модернізація математичних дисциплін, заснована на прикладному використанні моделей, сприяє підвищенню мотивації та практичної підготовки студентів.

Таким чином, інтеграція імітаційного моделювання у навчальний процес є важливим кроком у підготовці кваліфікованих спеціалістів, які мають аналітичне мислення та здатність розв'язувати складні прикладні задачі, та готових до адаптації в умовах технологічних змін, виконання комплексних аналітичних завдань у різних галузях науки і техніки.

Список використаних джерел:

1. Прус А. В. Підходи, перспективи та траєкторії математичного моделювання в освіті / Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. 2024. Вип. 71. С. 216–225. URL: <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/39591>
2. Сердюк М. Є., Сафронова І. А., Зайцева Т. А. Особливості організації теоретичних онлайн-занять / Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій: збірник наукових праць. – Т. 26, 2022. – С. 87-95 DOI: <http://dx.doi.org/10.15421/432211>
3. Собчук В. В., Любченко В. О. Особливості викладання математичного моделювання в курсі вищої математики закладу вищої освіти для студентів технічних спеціальностей / Науковий вісник Кременецької обласної гуманітарно-педагогічної академії ім. Тараса Шевченка. – 2023. – № 16. – DOI: <https://doi.org/10.32782/2410-2075-2023-16.15>
4. Собчук В. В. та ін. Методологічні аспекти інтегрованості математичного моделювання в системі математичних дисциплін вищої школи // Теоретико-практичні проблеми використання математичних методів та комп'ютерно-орієнтованих технологій в освіті та науці: матеріали III Всеукр. конф. (Київ, 28 квіт. 2021 р.). – Київ, 2021. – С. 164–167.
5. Собчук В. В. та ін. Методологічні аспекти навчання математичного моделювання в системі університетської освіти / Interdisciplinary Studies of Complex Systems. 2022. № 21. С. 59–87. DOI: <https://doi.org/10.31392/iscs.2022.21.059>
6. Теоретичні та практичні аспекти використання математичних методів та інформаційних технологій в освіті і науці : монографія / за заг. ред. О. Литвин. – Київ : Київ. ун-т ім. Б. Грінченка, 2021. – 332 с.
7. Закон України «Про освіту» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>
8. Закон України «Про наукову і науково-технічну діяльність» [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/inynvk>
9. Освітньо-професійна програма «Комп'ютерне моделювання та технології програмування», рівень вищої освіти бакалавр, спеціальність 113 Прикладна математика URL: <https://surl.li/iktawz> (дата звернення: 18.04.2025)
10. Стандарт вищої освіти України, перший (бакалаврський) рівень, 11 Математика і статистика, 113 Прикладна математика [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://surl.li/donpig>
11. Aimsun: Mobility intelligence for decisions that count [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.aimsun.com/> (дата звернення: 21.04.2025).
12. Ansys Free student software downloads [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.ansys.com/academic/students> (дата звернення: 21.04.2025).
13. AnyLogic: Simulation modeling software tools & solutions [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.anylogic.com/> (дата звернення: 21.04.2025).
14. NetLogo home page [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/> (дата звернення: 21.04.2025).
15. Simulink – Simulation and model-based design – MATLAB [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mathworks.com/products/simulink.html> (дата звернення: 21.04.2025).

References:

1. Prus, A. V. (2024). Pidkhody, perspektyvy ta traiektorii matematychnoho modeliuvannia v osviti. Suchasni informatsiini tekhnolohii ta innovatsiini metodyky navchannia v pidhotovtsi fakhivtsiv: metodolohiia, teoriia, dosvid, problemy, (71), 216–225. <http://eprints.zu.edu.ua/id/eprint/39591>
2. Serdiuk, M. Ye., Safronova, I. A., & Zaytseva, T. A. (2022). Osoblyvosti orhanizatsii teoretichnykh onlain-zaniat. Aktualni problemy avtomatyzatsii ta informatsiinykh tekhnolohii, 26, 87–95. <https://doi.org/10.15421/432211>
3. Sobchuk, V. V., & Liubchenko, V. O. (2023). Osoblyvosti vykladannia matematychnoho modeliuvannia v kursy vyshchoi matematyky zakladu vyshchoi osvity dlia studentiv tekhnichnykh spetsialnostei. Naukovyi visnyk Kremenetskoï oblasnoï humanitarno-pedahohichnoï akademii im. T. Shevchenka, (16). <https://doi.org/10.32782/2410-2075-2023-16.15>
4. Sobchuk, V. V., et al. (2021). Metodolohichni aspekty intehrovannosti matematychnoho modeliuvannia v systemi matematychnykh dystsyplin vyshchoi shkoly. In Teoretyko-praktychni problemy vykorystannia matematychnykh metodiv ta kompiuterno-oriietovanykh tekhnolohii v osviti ta nautsi: Materialy III Vseukr. konf. (Kyiv, April 28, 2021) (pp. 164–167).
5. Sobchuk, V. V., et al. (2022). Metodolohichni aspekty navchannia matematychnoho modeliuvannia v systemi universytetskoï osvity. Interdisciplinary Studies of Complex Systems, (21), 59–87. <https://doi.org/10.31392/iscs.2022.21.059>
6. Lytvyn, O. (Ed.). (2021). Teoretychni ta praktychni aspekty vykorystannia matematychnykh metodiv ta informatsiinykh tekhnolohii v osviti i nautsi: Monohrafiia (p. 332). Kyiv: Kyivskiy natsionalnyi universytet im. B. Hrinchenka.

-
7. Verkhovna Rada of Ukraine. (2017). Zakon Ukrainy «Pro osvitu». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2145-19>
 8. Verkhovna Rada of Ukraine. (2018). Zakon Ukrainy «Pro naukovu i naukovo-tekhnichnu diialnist». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/848-19/ed20180307#Text>
 9. Dnipro National University. (2020–2024). Osvitno-profesiina prohrama «Kompiuterne modeliuvannia ta tekhnolohii prohramuvannia», rivень vyshchoi osvity bakalavr, spetsialnist 113 Prykladna matematyka. <https://surl.li/funden>
 10. Ministry of Education and Science of Ukraine. (n.d.). Standart vyshchoi osvity Ukrainy, pershyi (bakalavrskyi) riven, 11 Matematika i statystyka, 113 Prykladna matematyka. <https://surl.li/fjavmv>
 11. Aimsun. Mobility intelligence for decisions that count. <https://www.aimsun.com/>
 12. Ansys. Free student software downloads. <https://www.ansys.com/academic/students>
 13. AnyLogic. Simulation modeling software tools & solutions. <https://www.anylogic.com/>
 14. NetLogo home page. <https://ccl.northwestern.edu/netlogo/>
 15. Simulink – Simulation and model-based design – MATLAB. <https://www.mathworks.com/products/simulink.html>

Мотайло А. П., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри природничо-наукової підготовки
Херсонської державної морської академії
ORCID: 0000-0002-6775-5788

ВИЗНАЧЕННЯ МЕТРИК ЯКОСТІ СКІНЧЕННОГО ЕЛЕМЕНТА В ФОРМІ БІПІРАМІДИ

У статті розглянуто метричні властивості скінченного елемента в формі біпіраміди, яка має один/два/три рухомих вузли. Основною задачею даного дослідження є визначення умов використання біпіраміди, яка не є правильним багатогранником, при побудові скінченно-елементної сітки.

У роботі знайдено чотири основні показники якості біпіраміди: якість елемента, співвідношення сторін, асиметрія та якість ортогональності. Усі обчислення виконано за правилами, які використовують у ANSYS.

За формулою для 3D-елементів знайдено інтервальну оцінку метрики якості елемента, яка визначає межі застосування біпірамід при дискретизації області методом скінченних елементів у задачах лінійної механіки, теорії пружності та теплопровідності.

На основі аналізу співвідношення сторін граней біпіраміди отримано формулу для обчислення показника якості біпіраміди, яка має один/два/три рухомих вузли. Межі застосування даної формули визначаються правилами, які діють для показника співвідношення сторін в ANSYS Mechanical, Elecromagnetics та CFX.

У роботі знайдено інтервальні оцінки для показника асиметрії біпіраміди з одним/двома/трьма рухомими вузлами, які дозволяють задовольнити вимоги ANSYS до якості сітки на рівні good та excellent. Отримані оцінки є обмеженнями для величин внутрішніх кутів граней біпіраміди, які є функціями параметрів видовження/стиснення півосей багатогранника. Виявлені залежності між відмінними від нуля координатами вершин грані біпіраміди та величинами її кутів спрощують алгоритм перевірки показника якості асиметрії.

У роботі визначено метрику якості ортогональності в вигляді функції параметрів видовження/стиснення біпіраміди. На основі аналізу множини значень даної функції встановлено, що незалежно від параметрів біпіраміди показник якості ортогональності приймає додатні значення. Згідно з вимогами, що висуваються в ANSYS, додатна визначеність якості ортогональності є достатньою умовою для використання елементів неправильної геометричної форми при генерації скінченно-елементних сіток.

Отримані результати містять формули та інтервальні оцінки, які можуть бути застосовані при алгоритмізації метода скінченних елементів.

Перспективою подальших досліджень є розробка алгоритму дискретизації 3D-областей сіткою тетраедрально-октаедральної структури та проведення обчислювальних експериментів методом скінченних елементів.

Ключові слова: скінченний елемент, біпіраміда, метрики якості, якість елемента, співвідношення сторін, асиметрія, якість ортогональності.

Motailo A. P. Determining the quality metrics of a finite element in the shape of a bipyramid

The article deals with the metric properties of a finite element in the shape of a bipyramid with one/two/three moving nodes. The main task of this study is to determine the conditions for using the bipyramid, which is not a regular polyhedron, in the constructing of a finite element mesh.

Four main indices of bipyramid quality were obtained in this paper: Element Quality, Aspect Ratio, Skewness, and Orthogonal Quality. All calculations were made according to the rules used in ANSYS.

Using the formula for 3D elements, an interval estimate of the element quality metric is found, which determines the limits of bipyramids application in the discretization of the domain by the Finite Element Method in problems of linear mechanics, elasticity and thermal conductivity.

Based on the analysis of the Aspect Ratio of the bipyramid faces, a formula for calculating the quality index of a bipyramid with one/two/three moving nodes is obtained. The limits of application of this formula are determined by the rules that apply to the Aspect Ratio in ANSYS Mechanical, Elecromagnetics and CFX.

In this paper, interval estimates are found for the asymmetry index of the bipyramid with one/two/three moving nodes, which allow satisfying the ANSYS mesh quality requirements at the good and excellent levels. The obtained estimates are constraints on the values of the internal angles of the bipyramid faces, which are functions of the parameters of elongation/compression of the polyhedron semi-axes. The identified dependencies between the coordinates of the bipyramid vertices and the values of its angles, which are different from zero, simplify the algorithm for checking the asymmetry quality indicator.

In this paper, Orthogonal Quality metric is found in the form of a function of the bipyramid elongation/compression parameters. Based on the analysis of the function's set of values, it is established that, regardless of the bipyramid parameters, Orthogonal Quality indicator takes positive values. According to the requirements set forth in ANSYS, positive- definite Orthogonal Quality is a sufficient condition for the use of irregular geometric shape elements in the Finite Element Mesh Generation.

The obtained results contain formulas and interval estimates that can be used in the finite element method algorithmization.

The prospect of further research is to develop an algorithm for 3D-discretizing with a tetrahedral-octahedral mesh and carry out computational experiments using the Finite Element Method.

Key words: finite element, bipyramid, quality metrics, Element Quality, Aspect Ratio, Skewness, Orthogonal Quality.

Постановка проблеми. Генерація скінченно-елементних сіток є важливим етапом розв'язання граничних задач методом скінченних елементів (МСЕ). Даний етап супроводжується перевіркою вимог, які висуваються до неструктурованих початкових сіток скінченних елементів (СЕ). Ці вимоги стосуються визначення метрик СЕ, які дозволяють встановити, чи має згенерована сітка достатню якість для проведення обчислювального аналізу. Це є особливо актуальним для сіток, які містять СЕ, що не представлені в бібліотеках систем скінченно-елементного аналізу (СЕА) ANSYS, ABAQUS тощо.

При генерації сітки тетраедрально-октаедральної структури необхідно враховувати геометрію СЕ, які утворюються шляхом винесення деяких вузлів на границю розрахункової області. Комірки, які є результатом видовження/стиснення півосей октаедрів, мають форму біпіраміди. Відомо, що СЕ неправильної геометричної форми негативно впливають на апроксимаційні властивості скінченно-елементної сітки. Тому для отримання якісної сітки доводиться виконувати перевірку умов, яким мають задовольняти метричні показники СЕ. Вказані умови визначають небажані елементи, які можна видалити або замінити іншими СЕ, що покращує якість сітки на кожному кроці дискретизації. При цьому біпіраміди не використовуються відомими системами СЕА, отже, актуальною є задача визначення умов їх використання в МСЕ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] вивчено апроксимаційні властивості СЕ в формі біпіраміди, яка має один/два/три рухомих вузли. Аналіз виконано на основі дослідження на мінімум сліду матриці жорсткості біпіраміди з шістьма та сімома вузлами інтерполяції. При цьому мінімальний слід матриці жорсткості вважається найкращою характеристикою апроксимації в області біпіраміди. У вказаній роботі знайдено інтервальні оцінки, яким мають задовольняти параметри видовження/стиснення біпіраміди, що відповідають межах відхилення об'єму біпіраміди від об'єму октаедра на 10% та 25%. У роботі прогнозується, що такі відхилення мають задовольнити відповідно високі та достатні вимоги до якості сітки, яка містить комірки в формі біпіраміди. Але дане припущення потребує перевірки обчислювальним експериментом.

У роботі [2] визначено показники якості Aspect Ratio та Jacobian Ratio для біпіраміди, яка має один/два/три рухомих вузли. Дані метричні характеристики знайдено за правилами, які використовуються розв'язувачами Altair HyperMesh та ANSYS. При цьому показник Aspect Ratio отримано як максимальне співвідношення найдовшого ребра СЕ до найкоротшого. Для біпіраміди, яка має один/два/три рухомих вузли, Aspect Ratio є функцією параметрів видовження/стиснення біпіраміди, яка задовольняє системі нерівностей за умови, що значення Aspect Ratio не перевищує п'яти. Дане обмеження, яке прийнято в Altair HyperMesh, дозволяє отримати геометричну інтерпретацію розв'язків побудованих систем нерівностей в залежності від співвідношень довжин ребер біпіраміди. При цьому залишається невизначеним питання про метрику якості Aspect Ratio, яка є максимальним значенням співвідношень сторін або радіусів описаного та вписаного кіл граней біпіраміди, що використовують в ANSYS.

На основі обмежень, які прийнято для показника Jacobian Ratio в Altair HyperMesh та ANSYS, отримано інтервальну оцінку для значень параметрів видовження/стиснення біпіраміди. При цьому залишається невизначеним питання про відповідність СЕ в формі біпіраміди іншим показникам якості, які використовують системи СЕА.

Метою статті є визначення чотирьох основних показників якості СЕ в формі біпіраміди за правилами, які використовують в ANSYS для 3D-елементів.

Виклад основного матеріалу. Розглядається СЕ у формі біпіраміди, яка має шість вузлів інтерполяції, що розташовані в її вершинах (рис. 1). Точки K_1, K_2, K_3 знаходяться на відстанях r, p, q від центра багатогранника K_0 . Решта вершин біпіраміди є рівновіддаленими від точки K_0 на відстань, яка дорівнює одиниці.

Якість елемента [Element Quality]. Визначення Element Quality (EQ) надає комбіновану метрику якості в ANSYS, значення якої коливаються в межах від нуля до одиниці. Дана метрика є відношенням об'єму до квадратного кореня з куба суми квадратів довжин ребер 3D-елементів [3]. Для біпіраміди з трьома рухомими вузлами (рис. 1) значення EQ є функцією параметрів r, p, q :

$$EQ = \frac{1}{48} \frac{(r+1)(p+1)(q+1)}{\sqrt{(3+r^2+p^2+q^2)^3}}, \quad (1)$$

де $r, p, q > 0$.

Дослідження на екстремум функції $EQ(r, p, q)$ показало, що в стаціонарній точці $(1, 1, 1)$ яка є точкою перетину поверхонь $\partial EQ / \partial r = 0$, $\partial EQ / \partial p = 0$, $\partial EQ / \partial q = 0$ (рис. 2а, 2б), досягається максимум $EQ(r, p, q)$, що дорівнює 0.01134023029.

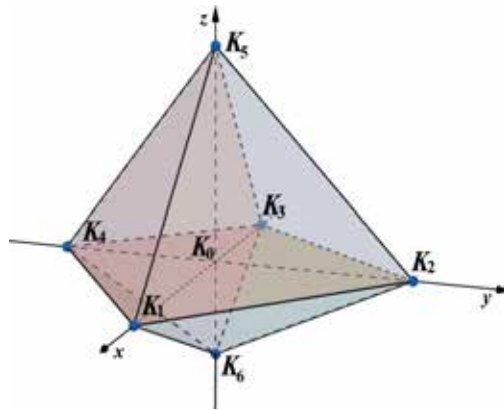


Рис. 1. Біпіраміда як скінченний елемент

Джерело: побудовано автором в СКА GeoGebra

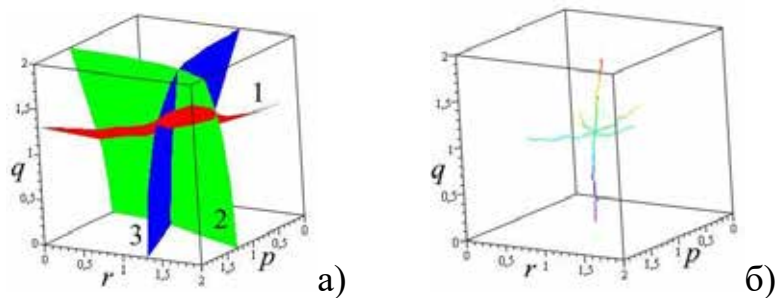


Рис. 2. Стационарна точка функції $EQ(r, p, q)$:

а) поверхні нульового рівня функцій $1 - \partial EQ / \partial r$, $2 - \partial EQ / \partial p$, $3 - \partial EQ / \partial q$; б) перетин поверхонь 1, 2, 3

Джерело: побудовано автором в СКА Maple

Мінімальне значення $EQ(r, p, q)$ залежить від верхніх меж допустимих значень r, p, q та може виявитись близьким до нуля. Згідно з критеріями якості сітки, які рекомендовано в ANSYS, мінімальною границею похибки для 3D-елементів є значення $EQ = 5 \cdot 10^{-4}$. Дане обмеження якості СЕ використовується розв'язувачами Standard Mechanical, Aggressive Mechanical та Nonlinear Mechanical для отримання валідних сіток, які не містять небажаних елементів [4]. Застосовуючи критерій мінімальної границі до біпіраміди з одним/двома/трьома рухомими вузлами, можна отримати інтервальну оцінку для значень функції $EQ(r, p, q)$:

$$0.0005 \leq EQ(r, p, q) \leq 0.01134023029. \quad (2)$$

На рис. 3 зображено поверхні рівня функції $EQ(r, p, q)$, які задовольняють умові (2).

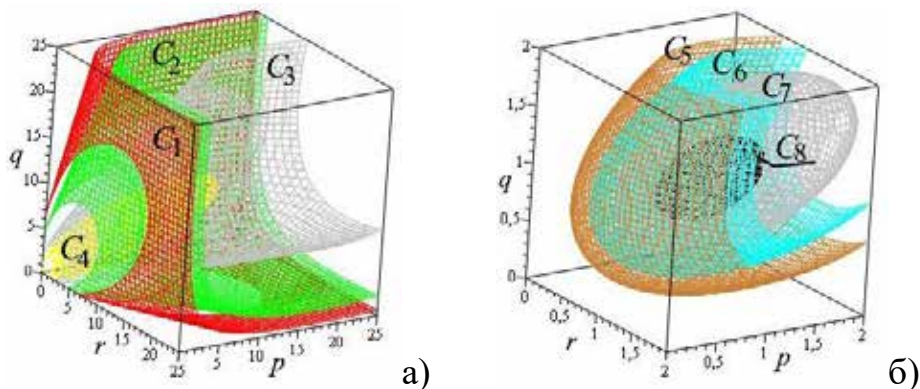


Рис. 3. Поверхні рівня $EQ(r, p, q) = C_i$:

а) $C_1=0.0005$, $C_2=0.001$, $C_3=0.003$, $C_4=0.005$; б) $C_5=0.008$, $C_6=0.009$, $C_7=0.01$, $C_8=0.011$

Джерело: побудовано автором у СКА Maple

Аналізуючи геометричне представлення функції $EQ(r,p,q)$, слід зауважити, що найменше для біпіраміди значення $EQ=0.0005$ досягається за умови, що один з її параметрів r, p, q є більшим за 6.589.

Співвідношення сторін [Aspect Ratio]. Визначення Aspect Ratio (AR) в ANSYS для 3D-елементів виконується для кожної грані окремо. При цьому для трикутників та прямокутників застосовуються різні методи обчислення. Загальним значенням AR вважається співвідношення сторін найгіршої грані поліедра [5].

За правилом [6], яке застосовується для трикутників, необхідно:

- 1) побудувати медіану до однієї з сторін трикутника та середню лінію, що перетинає дві інших сторони (рис. 4а);
- 2) побудувати прямокутники, що проходять через середини сторін (рис. 4б);
- 3) повторити побудови для інших двох медіан та середніх ліній трикутника;
- 4) вважати значенням AR найбільше з шести відношень довгої сторони прямокутника до коротшої, яке поділене на квадратний корінь з трьох.

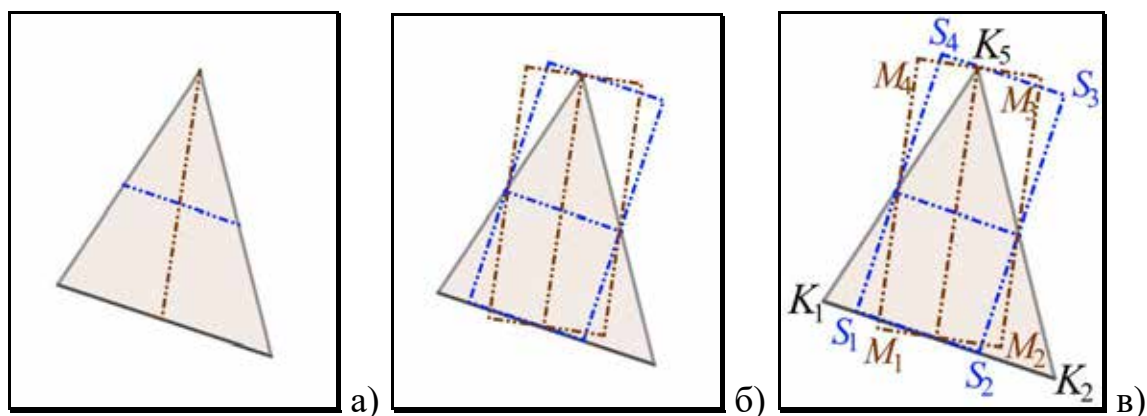


Рис. 4. Додаткові побудови для обчислення AR

Джерело: побудовано автором в СКА GeoGebra

Згідно з правилом [6] показник якості AR приймає значення, що не менше одиниці. При цьому значення одиниця відповідає СЕ правильної геометричної форми (октаєдр для біпіраміди).

Для визначення AR біпіраміди (рис. 1) достатньо знайти співвідношення сторін для грані $K_1K_2K_3$, яке є функцією параметрів r, p, q . Тоді AR для решти граней біпіраміди можна отримати при фіксованих значеннях $r=1$ або $p=1$ або $q=1$.

У прямокутниках $M_1M_2M_3M_4$ та $S_1S_2S_3S_4$, які побудовано для вершини K_5 (рис. 4в), співвідношення сторін є функціями:

$$k_1 = \frac{M_1M_4}{M_1M_2} = \frac{2\sqrt{r^2p^2 + p^2q^2 + q^2r^2}}{r^2 + p^2 + 4q^2}, k_2 = \frac{M_1M_2}{M_1M_4} = \frac{r^2 + p^2 + 4q^2}{2\sqrt{r^2p^2 + p^2q^2 + q^2r^2}}, \quad (3)$$

$$k_3 = \frac{S_1S_4}{S_1S_2} = \frac{2\sqrt{r^2p^2 + p^2q^2 + q^2r^2}}{r^2 + p^2}, k_4 = \frac{S_1S_2}{S_1S_4} = \frac{r^2 + p^2}{2\sqrt{r^2p^2 + p^2q^2 + q^2r^2}}, \quad (4)$$

де $r, p, q > 0$.

Для дослідження на максимум функцій $k_i(r,p,q)$, де $i=1,4$, знайдено залежності параметра q від інших двох параметрів r, p та сталої C_p , яку асоційовано з рівняннями поверхонь рівня $k_i(r,p,q)=C_i$ ($C_i > 0$). Додатково, на основі аналізу геометричного представлення функцій k_i поверхнями рівня, визначено умови, за яких $q(r,p,C_i) > 0$ в області, де $r,p > 0$ (табл. 1).

За результатами дослідження в табл. 1 можна зробити висновок, що відношення $k_1 = \frac{M_1M_4}{M_1M_2} < 0.5$,

тобто відрізок M_1M_2 є довшим за M_1M_4 для будь-яких допустимих значень r, p, q . Отже, найбільшим значенням співвідношення сторін прямокутників на рис. 4в є $\max_{i=\{2,3,4\}} \max_{r,p,q>0} k_i(r,p,q)$, де функції $k_i(r,p,q)$ визначаються формулами (3), (4).

Таблиця 1

Аналіз залежностей параметра q

k_i	$q=f_i(r, p, C_i), C_i=const$	Умови додатної визначеності q
k_1	$q = \frac{\sqrt{(1-2C_1^2)(r^2+p^2)} + \sqrt{(1-4C_1^2)(r^2+p^2)^2 - 16C_1^2 r^2 p^2}}{2\sqrt{2}C_1}$	$0 < C_1 < 0.5$
k_2	$q = \frac{\sqrt{(C_2^2-2)(r^2+p^2)} + C_2\sqrt{(C_2^2-4)(r^2+p^2)^2 + 16r^2 p^2}}{2\sqrt{2}}$	$C_2 > 1$
k_3	$q = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{C_3^2(r^2+p^2)^2 - 4r^2 p^2}{r^2+p^2}}$	$C_3 > 0$
k_4	$q = \sqrt{\frac{(r^2+p^2)^2 - 4C_4^2 r^2 p^2}{C_4^2(r^2+p^2)}}$	$0 < C_4 < 16.9$

Аналогічні результати можна отримати для співвідношення сторін прямокутників відносно вершин K_2 та K_1 грані $K_1K_2K_3$ (рис. 4в) шляхом циклічної перестановки параметрів r, p, q в формулах (3), (4). Вказані перетворення не змінюють максимального значення співвідношення сторін грані $K_1K_2K_3$ та умов додатної визначеності одного з параметрів як функції двох інших параметрів (табл. 1).

Отримані співвідношення сторін для грані $K_1K_2K_3$ залишаються справедливими для граней біпіраміди, де один, два або три параметри дорівнюють одиниці.

Слід зауважити, що коли $r=p=q=1$, виконуються умови $\frac{1}{\sqrt{3}}k_2(1,1,1)=1$ та $\frac{1}{\sqrt{3}}k_3(1,1,1)=1$, які є справедливими для правильного трикутника. Одночасно $\frac{1}{\sqrt{3}}k_4(1,1,1) \neq 1$, що протирічить властивостям метрики AR.

Тому значення функції $k_4(r,p,q)$ далі не враховуються при визначенні показника якості AR.

Таким чином, метрична характеристика Aspect Ratio біпіраміди з одним/двома/трьома рухомими вузлами визначається формулою:

$$AR = \frac{\max_{i=\{2,3\}} \max_{r,p,q>0} k_i(r,p,q)}{\sqrt{3}}, \quad (5)$$

де $k_i(r,p,q)$ задовольняють рівностям (3), (4).

Згідно з рекомендаціями ANSYS [7] найбільше значення AR у формулі (5) залежить від розв'язувача ANSYS, а саме: AR<10.100 (**Mechanical, Nonlinear Mechanical, Electromagnetics**) та AR<1000 (CFX).

Асиметрія [Skewness]. Skewness є однією з основних мір якості сітки, які використовують в ANSYS. Цей показник визначає, наскільки близькою до ідеальної є грань або комірка скінченно-елементної сітки. В загальному випадку асиметрія визначається методом нормалізованого кутового відхилення, яке для граней 3D-елементів може бути знайдене за формулою [8]:

$$Skewness = \max \left\{ \frac{\theta_{\max} - \theta_e}{180^\circ - \theta_e}, \frac{\theta_e - \theta_{\min}}{\theta_e} \right\}, \quad (6)$$

де $\theta_{\max}$ – найбільший кут грані CE; $\theta_{\min}$ – найменший кут грані CE; θ_e – кут рівносторонньої грані CE.

Згідно з означенням показник асиметрії *Skewness* приймає значення в інтервалі від нуля до одиниці, де нуль відповідає грані правильної геометричної форми (рівносторонній трикутнику для біпіраміди), а значення одиниця вказує на виродження грані (трикутника для біпіраміди) у відрізок.

Для біпіраміди метрика якості *Skewness* визначається як максимальний серед показників асиметрії, що відповідають граням CE. Очевидно, що найбільше значення *Skewness* досягається на грані $K_1K_2K_3$ (рис. 1), яка в загальному випадку є гострокутним трикутником. При цьому для найбільшого та найменшого кутів, які є функціями параметрів r, p, q , справедливі оцінки:

$$\theta_e \leq \theta_{\max}(r,p,q) < 90^\circ, 0^\circ < \theta_{\min}(r,p,q) \leq \theta_e, \quad (7)$$

де $\theta_e=60^\circ$.

Аналізуючи нерівності (7), слід зазначити, що величини внутрішніх кутів $\theta_{\min}$ та $\theta_{\max}$ грані $K_1K_2K_5$ можуть виявитись близькими до 0° та 90° відповідно. Для таких кутів показник асиметрії біпіраміди є близьким до одиниці, що небажано при обчисленнях МСЕ. Тому згідно з рекомендаціями ANSYS [8], необхідно визначити область допустимих значень параметрів r, p, q біпіраміди, в якій показник асиметрії *Skewness* відповідає якості комірки *good* ($0.25 < \text{Skewness} < 0.5$) або *excellent* ($0 < \text{Skewness} \leq 0.25$).

На основі аналізу рівності (6), умов (7) та властивостей внутрішніх кутів трикутника виявлено, що нерівність $0.25 < \text{Skewness} \leq 0.5$ є справедливою, коли значення функцій $\theta_{\max}(r, p, q)$ та $\theta_{\min}(r, p, q)$ задовольняють системі нерівностей:

$$\begin{cases} \theta_{\max}(r, p, q) < 90^\circ; \\ 45^\circ \leq \theta_{\min}(r, p, q) \leq 60^\circ; \\ \theta_{\max}(r, p, q) + 2\theta_{\min}(r, p, q) < 180^\circ. \end{cases} \quad (8)$$

Умова $0 < \text{Skewness} \leq 0.25$ виконується, коли

$$\begin{cases} 60^\circ \leq \theta_{\max}(r, p, q) < 90^\circ; \\ 45^\circ \leq \theta_{\min}(r, p, q) \leq 60^\circ; \\ \theta_{\max}(r, p, q) + 2\theta_{\min}(r, p, q) \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (9)$$

Кожна з систем нерівностей може бути доповнена інтервальною оцінкою для величини третього кута θ грані $K_1K_2K_5$, а саме: $30^\circ \leq \theta(r, p, q) \leq 60^\circ$ для (8) та $45^\circ \leq \theta(r, p, q) \leq 75^\circ$ для (9). При цьому внутрішні кути при вершинах трикутника $K_1K_2K_5$ є функціями параметрів r, p, q біпіраміди:

$$\begin{aligned} \text{AngleK1} &= \arccos\left(\frac{r^2}{\sqrt{r^2 + q^2} \sqrt{r^2 + p^2}}\right); \\ \text{AngleK2} &= \arccos\left(\frac{p^2}{\sqrt{r^2 + p^2} \sqrt{p^2 + q^2}}\right); \\ \text{AngleK5} &= \arccos\left(\frac{q^2}{\sqrt{r^2 + q^2} \sqrt{p^2 + q^2}}\right). \end{aligned} \quad (10)$$

На рис. 5а,б представлено області допустимих значень r, p, q розв'язків систем (8), (9) відповідно, коли $\theta_{\max}$ є кутом при вершині K_5 , $\theta_{\min}$ – кутом при вершині K_1 (рис. 1). Кожна з областей обмежена тригранним кутом $OABC$, гранями якого є поверхні рівня 1, 2, 3 функцій $\theta_{\max}(r, p, q)$, $\theta_{\min}(r, p, q)$ та $\theta(r, p, q)$.

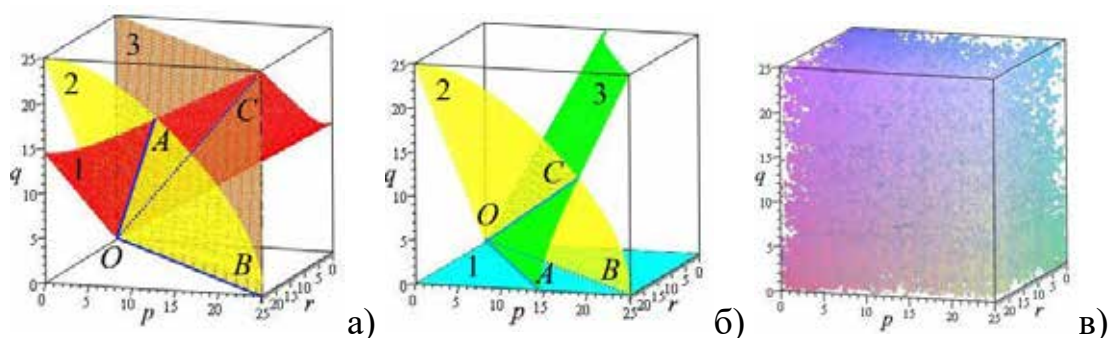


Рис. 5. $OABC$ – область допустимих значень r, p, q , обмежена поверхнями рівня:

- а) $1 - \theta_{\max}(r, p, q) = 60^\circ$, $2 - \theta_{\min}(r, p, q) = 45^\circ$, $3 - \theta_{\max}(r, p, q) + 2\theta_{\min}(r, p, q) = 180^\circ$; б) $1 - \theta_{\max}(r, p, q) = 0^\circ$, $2 - \theta_{\min}(r, p, q) = 45^\circ$, $3 - \theta(r, p, q) = 60^\circ$; в) $\theta_{\max}(r, p, q) + \theta_{\min}(r, p, q) + \theta(r, p, q) = 180^\circ$.

Джерело: побудовано автором в СКА Maple

Будь-яка точка (r, p, q) , яка належить області $OABC$ в перетині з дискретним набором точок (рис. 5в), забезпечує вимоги до якості комірки скінченно-елементної решітки *good* (рис. 5а) або *excellent* (рис. 5б), коли $\theta_{\max}$, $\theta_{\min}$ асоційовано з кутами грані $K_1K_2K_5$ при вершинах K_5 , K_1 відповідно.

Очевидно, що розв'язки систем нерівностей (8), (9) можна представити геометрично, змінюючи відповідність $\theta_{\max}, \theta_{\min}$ іншим кутам грані $K_1K_2K_5$. За таких перетворень змінюється лише порядок аргументів функцій $\theta_{\max}(r,p,q), \theta_{\min}(r,p,q)$ та $\theta(r,p,q)$, що не впливає на оцінку асиметрії досліджуваного СЕ.

Якість ортогональності [Orthogonal Quality]. Показник Orthogonal Quality (OQ) є мірою якості сітки, що обчислюється для 3D-елементів за формулою [9]:

$$OQ = \min_i \frac{\bar{A}_i \cdot \bar{f}_i}{|\bar{A}_i| |\bar{f}_i|}, \quad (11)$$

де $\bar{A}_i$ – нормальний вектор грані i , $\bar{f}_i$ – вектор, спрямований від центру ваги комірки до центру ваги грані i , а мінімум визначається по всіх гранях СЕ.

Формула (11) використовується для СЕ, які знаходяться в приграничному шарі скінченно-елементної решітки.

Значення показника OQ коливається в межах від нуля до одиниці, де нуль є найгіршою характеристикою СЕ, а одиниця свідчить про те, що СЕ має форму правильного багатогранника (октаедр для біпіраміди).

Для граней біпіраміди косинуси кутів між векторами $\bar{A}_i$ та $\bar{f}_i$, де $i=1,8$, є функціями параметрів r, p, q . При дослідженні поверхонь рівня вказаних функцій виявлено, що мінімальне значення, яке визначається по i , досягається на гранях $K_1K_2K_6, K_2K_3K_5, K_1K_4K_5$ (рис. 1) та наближено дорівнює 0.09. Функція, яка відповідає грані $K_1K_2K_6$, визначається рівністю:

$$CSI_{126} = \frac{\frac{r+3}{r} + \frac{p+3}{p} + 3q+1}{\sqrt{\frac{1}{r^2} + \frac{1}{p^2} + 1} \sqrt{(r+3)^2 + (p+3)^2 + (3q+1)^2}}, \quad (12)$$

де $r, p, q > 0$.

При цьому координати центра ваги $((r-1)/4, (p-1)/4, (q-1)/4)$ комірки в формі біпіраміди, які використовуються для визначення координат вектора $\bar{f}_i$, знайдено за формулами [10].

Функції CSI_{235} та CSI_{145} , які асоційовано з гранями $K_2K_3K_5, K_1K_4K_5$, легко отримати циклічною перестановкою параметрів r, p, q у формулі (12).

На рис. 6а представлено три різних області значень параметрів r, p, q , при яких показник якості біпіраміди $OQ=0.09$. На рис. 6б одна з цих областей зображена в збільшеному масштабі.

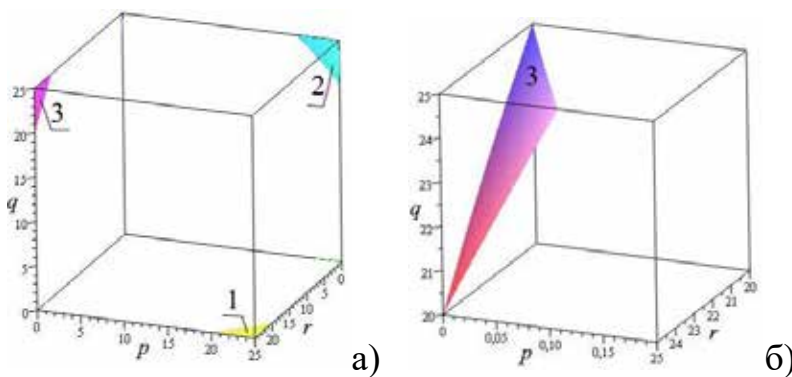


Рис. 6. Поверхні рівня функцій:

а) 1 – $CSI_{126}=0.09$, 2 – $CSI_{235}=0.09$, 3 – $CSI_{145}=0.09$, коли $0 \leq r, p, q \leq 25$; б) 3 – $CSI_{145}=0.09$, коли $20 \leq q \leq 25$, $0 \leq p \leq 0.2$.

Джерело: побудовано автором в СКА Maple

Аналізуючи рис. 6, слід відмітити, що показник якості OQ біпіраміди наближено дорівнює 0.09 за умови, що два параметри приймають значення більше 20, а третій є меншим 0.2. При зменшенні верхньої межі проміжку, якому належать параметри r, p, q , значення OQ збільшується. Але відповідно до таблиці помилок та попереджень, які прийняті в ANSYS [4], для побудови скінченно-елементної сітки достатньо виконання умови $OQ > 0$. Для функцій косинусів кутів, які знайдено за формулою (11), умова $OQ > 0$ виконується для кожної грані біпіраміди.

Висновки. У роботі досліджено метричні показники якості біпіраміди з одним/двома/трьома рухомими вузлами, які визначають умови застосування комірок неправильної геометричної форми

в скінченно-елементних розрахунках. На основі правил та методів обчислення основних метрик якості СЕ, які прийнято в ANSYS, отримано такі результати.

1. Знайдено інтервальну оцінку для показника Element Quality, який є функцією параметрів видовження/стиснення біпіраміди. Найменше значення Element Quality визначено згідно з вимогами до 3D-елементів, які застосовують у розв'язувачі ANSYS Mechanical. Межі визначення Element Quality дозволяють використовувати СЕ в формі біпіраміди при розв'язанні задач лінійної механіки, теорії пружності та теплопровідності.

2. Отримано формулу для обчислення показника Aspect Ratio як функцію параметрів біпіраміди, що дозволяє виконувати розрахунки на основі пошуку максимального значення двох функцій, вигляд яких визначає максимальне значення параметрів біпіраміди. Дана формула може бути застосована при алгоритмізації MCE для перевірки умов, яким має задовольняти верхня межа показника Aspect Ratio у розв'язувачах ANSYS Mechanical, Electromagnetics та CFX.

3. Отримано обмеження в вигляді систем нерівностей для величин внутрішніх кутів граней біпіраміди, що задовольняють вимоги на рівні good та excellent для показника якості Skewness, які рекомендовано в ANSYS. Дані обмеження легко адаптувати до будь-якої грані біпіраміди, оскільки найбільший та найменший кути визначаються лише координатами вершин трикутників, що зменшує часову складність алгоритму MCE при визначенні показника асиметрії комірок сітки.

4. Встановлено додатну визначеність показника якості Orthogonal Quality біпіраміди з одним/двома/трьома рухомими вузлами. Аналіз значень Orthogonal Quality біпіраміди виконано за формулою для СЕ, які знаходяться в приграничному шарі скінченно-елементної сітки. Згідно з рекомендаціями ANSYS умова додатної визначеності метрики Orthogonal Quality є достатньою для використання біпіраміди при дискретизації областей у MCE.

5. Отримані результати свідчать про позитивні умови для створення алгоритмів на основі MCE з використанням біпірамід. Подальші дослідження вимагають отримання кубатурних формул для біпіраміди з двома/трьома рухомими вузлами, які є необхідними для проведення обчислювальних експериментів.

Список використаних джерел:

1. Мотайло А.П. Базиси біпіраміди. *Наукові праці Вінницького національного технічного університету*. № 2. Вінниця, 2024. С. 1–10. DOI: 10.31649/2307-5376-2024-2-76-85 (дата звернення: 18.04.2025).
2. Мотайло А.П. Показники якості скінченного елемента в формі біпіраміди. *Importance of Soft Skills for Life and Scientific Success*: матеріали IV-ої міжнародної науково-практичної інтернет-конференції (м. Дніпро, 6–7 березня 2025). Дніпро, 2025. С. 144–147. URL: <https://surli.cc/yjgueq> (дата звернення: 18.04.2025).
3. ANSYS Mesh Metrics Explained – FEA Tips. URL: <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/> (date of access: 18.04.2025).
4. Error and Warning Limits. ANSYS. URL: <https://surli.li/sjkvue> (date of access: 18.04.2025).
5. How Element Quality is Calculated. Altair HyperMesh. URL: <https://surli.li/yqotqn> (date of access: 18.04.2025).
6. Aspect Ratio. ANSYS. URL: <https://surli.li/nfvdfc> (date of access: 18.04.2025).
7. Lecture7: Mesh Quality & Advanced Topics – FEA Tips. URL: <https://surli.li/uzjqjb> (date of access: 18.04.2025).
8. Skewness. ANSYS. URL: <https://surli.cc/qoatho> (date of access: 18.04.2025).
9. Orthogonal Quality. ANSYS. URL: <https://surli.lu/upmcqh> (date of access: 18.04.2025).
10. Centroids of Areas via Integration. Engineering: LibreTexts. URL: <https://surli.li/snkoyz> (date of access: 18.04.2025).

References:

1. Motailo, A. P. (2024). Bazysy bipiramidy [Bipyramid bases]. *Naukovi pratsi Vinnytskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu*, (2). 1-10. <https://doi.org/10.31649/2307-5376-2024-2-76-85>
2. Motailo, A. (2025). Pokaznyky yakosti skinchennoho elementa v formi bipiramidy. *Importance of Soft Skills For Life And Scientific Success*: Proceedings of the 4th International Scientific and Practical Internet Conference (s. 144–147). March 6-7, 2025. Dnipro, Ukraine. [Ukrainian]. Retrieved from <https://surli.li/ewjtn>
3. *ANSYS Mesh Metrics Explained*. Retrieved from <https://featips.com/2022/11/21/ansys-mesh-metrics-explained/>
4. Error and Warning Limits. ANSYS. Retrieved from <https://surli.li/gvxiis>
5. How Element Quality is Calculated. *Altair HyperMesh*. Retrieved from <https://surli.li/qlaclh>
6. Aspect Ratio. ANSYS. Retrieved from <https://surli.cc/sgcbks>
7. *Lecture7: Mesh Quality & Advanced Topics – FEA Tips*. Retrieved from <https://surli.li/kwljjb>
8. Skewness. ANSYS. Retrieved from <https://surli.li/jwraat>
9. Orthogonal Quality. ANSYS. Retrieved from <https://surli.lu/tqewpr>
10. *Centroids of Areas via Integration. Engineering: LibreTexts*. Retrieved from <https://surli.li/dmwoga>

Пасічник А. М., доктор фізико-математичних наук, професор, професор кафедри математичного моделювання та системного аналізу
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0000-0002-8561-1374

Худа Ж. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри математичного моделювання та системного аналізу
Дніпровського державного технічного університету
ORCID: 0000-0002-3451-5825

АЛГОРИТМ ОПТИМІЗАЦІЇ МАРШРУТІВ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ ВАНТАЖІВ НА ОСНОВІ ДИНАМІЧНОЇ МОДИФІКАЦІЇ МЕТОДУ ГІЛОК І ГРАНИЦЬ

В статті на основі методу гілок і границь запропоновано алгоритм оптимізації маршрутів автомобільних перевезень вантажів за критерієм мінімізації транспортної роботи з їх доставки, коли відстані та обсяги доставки для кожного пункту і між пунктами є заданими. В даному дослідженні в якості критерія оптимізації застосовується мінімізація транспортної роботи перевезення вантажів із відповідного транспортно-логістичного центру до визначених пунктів доставки та одноразовість проходження місць їх розташування. Особливість запропонованого підходу полягає в тому, що вся множина можливих варіантів перевезення вантажу описується матрицею транспортної роботи доставки елементи якої обчислюються динамічно на кожному кроці алгоритму, на відміну від класичного застосування методу гілок і границь при мінімізації довжини маршруту перевезень, коли елементи матриці відстаней перевезень є сталими. Для підвищення ефективності пошуку оптимального маршруту проведено модифікацію методу гілок і границь (ТВМ) на випадок динамічного визначення елементів матриці транспортної роботи доставки вантажів.

В роботі наведено алгоритм застосування запропонованого варіанту методу ТВМ для побудови оптимального автомобільного маршруту з мінімізацією транспортної роботи перевезення вантажів із логістичного центру в мережі із n пунктів доставки. Аналіз результатів проведених розрахунків підтверджує ефективність запропонованого підходу і показує, що його застосування дозволяє зменшити обчислювальну складність завдяки використанню покращених стратегій відсікання нерелевантних рішень та адаптивного розгалуження можливих варіантів доставки вантажів. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність результатів розрахунків та зменшити час пошуку оптимального маршруту за критерієм мінімізації транспортної роботи доставки вантажів до пунктів призначення. Отримані результати можуть бути використані для оптимізації логістичних процесів та зниження витрат на транспортні перевезення.

Ключові слова: метод гілок і границь, оптимізація маршрутів, транспортна логістика, автомобільні перевезення.

Pasichnyk A. M., Khuda Zh. V. Algorithm for optimization of road transportation cargo routes based on dynamic modification of the twig and boundary method

In the article, based on the twig and boundary method, an algorithm for optimizing routes for road freight transportation is proposed based on the criterion of minimizing the transport work for their delivery, when the distances and volumes of delivery for each point and between points are given. In this study, the optimization criterion used is the minimization of the transport work of transporting goods from the corresponding transport and logistics center to the specified delivery points and the uniqueness of passing through their locations. The main idea of the method is that the branching of the set of possible freight transportation options into subsets is carried out according to an algorithm based on constructing estimates from above for the objective function on a certain set of solutions, which allows organizing a complete procedure for searching for possible route options for this problem. In accordance with the proposed approach, the set of all possible route options is divided into several non-intersecting subsets, from which the subset is determined on which the objective function of transport work reaches its smallest value.

The paper shows that transport work is a complex indicator that takes into account the volume and distance of cargo transportation and is determined by their product. Unlike the classical application of the twig and boundary method when minimizing the length of the transportation route, when the elements of the transportation distance matrix are constant, the peculiarity of the proposed approach is that the entire set of possible cargo transportation options is described by the transport work matrix of delivery, the elements of which are calculated dynamically at each step of the algorithm, since their value depends on the volume of shipment that occurred at the previous stage. To increase the efficiency of searching for the optimal route, a modification of the twig and boundary method (TBM) was carried out for the case of dynamic determination of the elements of the

transport work matrix of delivery. An algorithm for applying the proposed variant of the TBM method to construct an optimal road route by minimizing the transport work of transporting goods from a logistics center and a network of five delivery points is also presented.

Analysis of the results of the calculations confirms the effectiveness of the proposed approach and shows that its application allows to reduce the computational complexity due to the use of improved strategies for cutting off irrelevant solutions and adaptive branching of possible cargo delivery options. The proposed approach allows to increase the accuracy of the calculation results and reduce the time of searching for the optimal route according to the criterion of minimizing the transport work of delivering cargo to the destination points. The results obtained can be used to optimize logistics processes and reduce the cost of transportation.

Key words: twig and boundary method, route optimization, transport logistics, road transportation.

Постановка проблеми. Автомобільні перевезення вантажів є ключовим елементом логістичних процесів, що забезпечують ефективний рух товарів між постачальниками і споживачами. В умовах ринкової конкуренції, транспортні компанії мають постійно вирішувати завдання мінімізації витрат на перевезення при забезпеченні високої якості логістичних послуг. Зростання обсягів вантажних перевезень і ускладнення логістичних ланцюгів вимагає використання ефективних методів оптимізації транспортних процесів. Тому, для підвищення ефективності логістичних систем проблема розробки та удосконалення методів і алгоритмів оптимізації маршрутів автомобільних вантажних перевезень має достатньо актуальне значення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На даний час для підвищення ефективності управління перевезеннями за рахунок визначення оптимального маршруту з урахуванням заданих обмежень достатньо ефективно застосовується метод гілок і границь (TBM). В основі цього методу лежить ідея послідовного розбиття множини допустимих розв'язків на підмножини. На кожному кроці розбиття, кожна підмножина перевіряється на наявність в ній оптимального розв'язку. Вперше метод гілок і границь був запропонований в 1960 р. для вирішення загальної задачі цілочисельного лінійного програмування [1]. В подальшому було проведено узагальнення даного методу для задачі комівояжера в роботі [2]. Починаючи з цього моменту, з'явилась велика кількість робіт, присвячених методу гілок і границь та різних його модифікацій, що пояснюється достатньо широким спектром можливостей цього методу.

Застосування методу гілок і границь до задачі комівояжера (TSP) є предметом багатьох досліджень, які сприяли розвитку ефективних алгоритмів для розв'язання цієї NP-складної задачі. Так у статті [3] запропоновано мережевий підхід до методу гілок і границь для розв'язання задачі комівояжера, що дозволяє ефективно розбивати задачу на підзадачі, кожна з яких розв'язується як задача мінімального остовного дерева. У роботі [4] автори розглянули варіацію TSP, де необхідно відвідати не конкретні точки, а певні області. Вони запропонували ефективний алгоритм, заснований на TBM, який дозволив знаходити оптимальні рішення для задач з великою кількістю вершин. У роботі [5] дослідники представили модифікований алгоритм методу гілок і границь для TSP, демонструючи його ефективність на прикладах з невеликою кількістю міст. У доповіді [6] автори проаналізували застосування методу гілок і границь для розв'язання TSP, підкреслюючи його ефективність для задач середнього розміру. У статті [7] дослідники запропонували квантовий варіант TBM, який надає певні переваги порівняно з класичними алгоритмами. Аналіз можливого застосування методу гілок і границь для задачі комівояжера наведено в роботі [8]. Моделі та алгоритми розгалуження та відсікання для задач збору та доставки з часовими вікнами представлені в статті [9]. Можливі варіанти реалізації методу гілок і границь як алгоритму цілочисельного лінійного програмування розглянуто в роботах [10, 11]. Аналіз особливостей застосування методу гілок і границь в задачах побудови оптимальних регресійних моделей проведено в роботі [12]. Можливі варіанти застосування методу TBM для оптимізації логістичних транспортних задач розглянуті в роботах [13, 14].

Аналіз результатів проведених досліджень показує динамічну еволюцію TBM, широкий спектр застосувань та модифікацій, які відображають специфіку різних варіацій задачі комівояжера, включаючи адаптацію класичних підходів до нових умов та застосування сучасних обчислювальних технологій.

Постановка завдання. Мета статті: розробка алгоритму оптимізації маршрутів автомобільних перевезень вантажів за критерієм мінімізації транспортної роботи з їх доставки, коли відстані та обсяги доставки для кожного пункту і між пунктами є заданими. У даному дослідженні в якості критерія оптимізації обирається мінімізація транспортної роботи перевезення вантажів із відповідного транспортно-логістичного центру до визначених пунктів доставки та одноразовість проходження місць їх розташування. Для підвищення ефективності пошуку оптимального маршруту пропонується застосувати варіант модифікації методу гілок і границь на випадок динамічного визначення елементів матриці транспортної роботи з доставки вантажів.

Виклад основного матеріалу. Особливості застосування методу TBM для побудови оптимального маршруту перевезення. Розглядається проблема оптимізації маршрутів автомобільних перевезень для мінімізації сумарної транспортної роботи перевезення вантажів від транспортно-логістичного центру до заданих пунктів доставки. Тобто, необхідно знайти такий замкнутий маршрут, який проходить через кожне

місто один і лише один раз, при якому мінімізується сумарна транспортна робота з доставки вантажів до місць призначення.

Відстані між відповідними пунктами перевезень є відомими і задані матрицею відстаней:

$$C = \|c_{ij}\| \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n), \quad (1)$$

c_{ij} – відстань між місцями розміщення пункту відправлення і пунктів доставки.

Обсяги доставки вантажів із транспортно-логістичного центру до кожного пункту призначення також є заданими і визначаються матрицею доставки:

$$P = \|p_i\| \quad (i = 2, 3, \dots, n), \quad (2)$$

де: p_i – обсяг доставки вантажу в i -й пункт доставки; n – кількість пунктів призначення.

Загальна вага перевезень всіх вантажів q_1 із транспортно-логістичного центру до пунктів призначення визначається формулою:

$$q_1 = \sum_{i=2}^n p_i. \quad (3)$$

Поточний обсяг перевезення вантажу q_i на кожному кроці визначається рекурентною формулою:

$$q_i = q_{i-1} - p_{k_{i-1}}, \quad (4)$$

де q_{i-1} – обсяг вантажу на попередньому етапі, $p_{k_{i-1}}$ – обсяг, відвантажений в попередньому пункті доставки.

Зазначимо, що транспортна робота є комплексним показником, що враховує обсяг і відстань перевезення вантажів та визначається їх добутком і вимірюється у т·км. В даному випадку вся множина можливих варіантів перевезення вантажу описується динамічною матрицею транспортної роботи доставки

$$A = \|a_{ij}\| \quad (i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, n). \quad (5)$$

Особливість запропонованого методу полягає в тому, що на відміну від класичного підходу оптимізації відстані перевезення [14, 15], елементи матриці транспортної роботи визначаються на кожному кроці динамічно, оскільки їх значення залежить від обсягу відвантаження, яке відбулося на попередньому кроці.

Для n пунктів доставки існує $n \cdot (n-1)$ альтернативних маршрутів доставки, використання одного з яких забезпечує мінімізацію транспортної роботи, а відповідно і витрат з доставки вантажів, тобто є оптимальним [1]. Математичну модель такої задачі можна сформулювати наступним чином: цільова функція оптимізації транспортної задачі, що визначає сумарну транспортну роботу з доставки вантажів до пунктів призначення, запишеться у вигляді:

$$F = \sum_{i=1}^n q_i \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot x_{ij} \rightarrow \min. \quad (6)$$

У формулі (6) x_{ij} – коефіцієнт переходу із пункту з номером i в пункт із номером j . Кожна змінна x_{ij} дорівнює 0, якщо перехід від i до j не входить у розглянутий маршрут, і дорівнює 1, у випадку включення такого переходу в маршрут. Тоді умова того, щоб кожне місто розміщення пункту доставки було відвідане і залишене лише один раз, описується наступними рівняннями:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1; \quad (j = \overline{1, n}); \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1; \quad (i = \overline{1, n}). \quad (8)$$

Алгоритм побудови оптимального маршруту перевезення. В даній роботі для побудови розв'язку оптимізаційної задачі (6) – (8) запропоновано застосувати алгоритм побудований на модифікації методу ТВМ. Основна ідея методу полягає в тому, що розгалуження множини припустимих значень на дерево підмножин проводиться за алгоритмом, що базується на побудові оцінок зверху для цільової функції на деякій множині розв'язків. Такий підхід дозволяє організувати повну процедуру перебору можливих варіантів маршрутів для даної задачі.

У відповідності із запропонованим підходом множина M (множина можливих варіантів маршрутів) розбивається на ряд підмножин, що не перетинаються, із яких визначається така підмножина M_r , на якій цільова функція F досягає свого найменшого значення. З урахуванням особливості застосування маршруту розв'язного типу, необхідна умова мінімізації цільової функції (6) забезпечується пріоритетним виконанням заявок із доставки вантажів, що продукують найбільший рівень транспортної роботи. Потім підмножина M_r знову розбивається на ряд підмножин M_{lk} , що не перетинаються, із яких визначається підмножина M_j на якій функція F також досягає свого найменшого значення. Такий процес розгалуження

продовжується до отримання одно елементної множини m , яка в теорії методу гілок і границь називається *рекордом*.

Розглянемо послідовність застосування запропонованого алгоритму на основі модифікації методу гілок і границь для побудови оптимального маршруту доставки вантажів за критерієм мінімізації відповідної транспортної роботи. На першому етапі проводимо аналіз вихідної множини M . Для цього спочатку будуюмо матрицю транспортної роботи. Перший рядок цієї матриці складається з елементів $a_{1j} = q_1 \cdot c_{1j}$. Перший стовпчик цієї матриці фізично означає повернення в пункт постачання після повного розвантаження. І оскільки в пункт постачання транспорт повертається порожнім, то відповідно виконана робота дорівнює нулю. Тобто всі елементи $a_{i1} = 0$. Відповідно надалі будемо розглядати прямокутну матрицю $A = \|a_{ij}\|$ ($i=1, 2, \dots, n; j=2, \dots, n$).

Серед всіх елементів першого рядка $a_{1j} = q_1 \cdot c_{1j}$ ($j=2, \dots, n$) обираємо найменший. Нехай a_{1k_1} – це найменший елемент рядка. Таким чином ми визначаємо, що першою ланкою ланцюга доставки буде перевезення із першого пункту (транспортно-логістичного центру) в k_1 пункт постачання. В цьому пункті буде відвантажено p_{k_1} обсягу вантажу. Тоді для подальшої доставки залишається $q_2 = q_1 - p_{k_1}$. Таким чином всі наступні рядки матриці складаються з елементів $a_{ij}^{k_1} = q_2 \cdot c_{ij}$ ($i=2, \dots, n; j=2, \dots, n$). Матрицю транспортної роботи, побудовану таким чином, позначимо – A_{1k_1} .

Знайдемо оцінку знизу функції якості для підмножини M_{1k_1} . Для матриці транспортної роботи $A_{1k_1} = \|a_{ij}^{k_1}\|$ ($i=1, 2, \dots, n; j=2, \dots, n$) визначимо додаткову матрицю X' мінімальних значень транспортної роботи по рядках (1 в кожному рядку розташована на тому місці, де знаходиться мінімальний елемент цього рядка в матриці A_{1k_1}):

$$X' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \dots 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \dots 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \dots 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \dots 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

По цій матриці знаходимо значення функції цілі F' . Для цього додаємо між собою ті значення $a_{ij}^{k_1}$ з матриці A_{1k_1} , які розташовані на тих же місцях, що і $x_{ij} = 1$ в матриці X' .

$$F'_{k_1} = f(A_{1k_1} X') = a_{1r_1}^{k_1} + a_{2r_2}^{k_1} + a_{3r_3}^{k_1} + \dots + a_{nr_n}^{k_1}, \quad (10)$$

де r_i ($i = \overline{1;n}$) – це номер мінімального елемента в i -тому рядку.

Аналогічно визначаємо додаткову матрицю X'' мінімальних значень транспортної роботи по стовпцях (1 в кожному стовпці розташована на тому місці, де знаходиться мінімальний елемент цього стовбця в матриці A_{1k_1}). При цьому фіксуємо елемент x_{1k_1} , який дорівнюватиме 1.

$$X'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \dots 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 \dots 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \dots 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 \dots 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \dots 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (11)$$

За значеннями елементів матриці (11) знаходимо значення цільової функції F'' . Для цього додаємо між собою ті значення $a_{ij}^{k_1}$ із матриці A_{1k_1} , які розташовані на тих же місцях, що і $x_{ij} = 1$ в матриці X'' .

$$F''_{k_1} = f(A_{1k_1} X'') = a_{s_2}^{k_1} + a_{s_3}^{k_1} + a_{s_4}^{k_1} + \dots + a_{s_n}^{k_1}, \quad (12)$$

де s_j ($j = \overline{2;n}$) – це номер мінімального елемента в j -тому стовбці.

Нижня оцінка функції якості цільової функції на основі матриць мінімальних значень транспортної роботи за рядками та за стовпцями визначається із співвідношення:

$$F_{k_1}^N = \max(F'_{k_1}; F''_{k_1}). \quad (13)$$

Підмножина M_{1k_1} містить в собі підмножини: $M_{1k_1 2}, M_{1k_1 3}, \dots, M_{1k_1 k_1-1}, M_{1k_1 k_1+1}, \dots, M_{1k_1 n}$.

Далі проводимо аналіз цих підмножин. Для кожної підмножини $M_{1k_1 j} (j = \overline{2, n}; j \neq k_1)$ обчислюємо верхню $F_{1k_1 j}^V$ оцінку функції якості цільової функції.

$$F_{1k_1 j}^V = a_{1k_1}^{k_1} + a_{k_1 j}^{k_1} + a_{j j+1}^{k_1} + \dots + a_{n-1 n}^{k_1} \quad (j = \overline{2, n}; j \neq k_1). \quad (14)$$

Після того, як було обчислено всі значення $F_{1k_1 j}^V (j = \overline{2, n}; j \neq k_1)$ проводимо відсікання безперспективних підмножин. Перспективною для подальшого аналізу буде підмножина, у якій верхнє значення функції якості задовольняє умови

$$Record = \min \left\{ F_{1k_1 j}^V, (j = \overline{2, n}; j \neq k_1) \right\}. \quad (15)$$

Якщо декілька підмножин мають однакове найменше значення, то для цих підмножин обчислюємо нижню оцінку функції якості цільової функції. Для цього для кожної підмножини складаємо додаткові матриці X_j' і X_j'' мінімальних значень транспортної роботи по рядках і по стовпцях. Попередньо в кожній матриці фіксуємо перший рядок і k_1 стовпчик, а також k_1 рядок і j стовпчик. Це означає, що елементи $x_{1k_1}^{k_1}$ і $x_{k_1 j}^{k_1}$ в цих матрицях дорівнюватимуть одиниці. По цих матрицях знаходимо значення функцій цілі $F_{k_1 j}'$ і $F_{k_1 j}''$. Для цього додаємо між собою ті значення $a_{ij}^{k_1}$ з матриці A_{1k_1} , які розташовані на тих же місцях, що і $x_{ij}^{k_1} = 1$ в матрицях X_j' і X_j'' .

$$F_{k_1 j}' = f(A_{1k_1} X_j') = a_{1k_1}^{k_1} + a_{k_1 j}^{k_1} + a_{2r_2}^{k_1} + \dots + a_{nr_n}^{k_1}, \quad (16)$$

де $r_i (i = \overline{1, n})$ – це номер мінімального елемента в i -тому рядку.

$$F_{k_1 j}'' = f(A_{1k_1} X_j'') = a_{1k_1}^{k_1} + a_{k_1 j}^{k_1} + a_{s_2 2}^{k_1} + a_{s_3 3}^{k_1} + \dots + a_{s_n n}^{k_1}, \quad (17)$$

де $s_j (j = \overline{2, n})$ – це номер мінімального елемента в j -тому стовбці.

Нижня оцінка функції якості цільової функції на основі матриць мінімальних значень транспортної роботи за рядками та за стовпцями визначається із співвідношення:

$$F_{k_1 j}^N = \max(F_{k_1 j}', F_{k_1 j}''). \quad (18)$$

Серед підмножин, які мають однакове найменше значення верхньої оцінки, обираємо ту, в якій $F_{k_1 j}^N$ найменше.

Нехай мінімум $F_{1k_1 j}^V$ досягається при $j = k_2$ і $F_{k_1 j}^N$ – найменше при $j = k_2$. Тобто найперспективнішою вважаємо підмножину $M_{1k_1 k_2}$. Оскільки з пункту k_1 вантаж потрапляє в пункт k_2 , в ньому буде відвантажено p_{k_2} об'єм вантажу. Тоді для подальшої доставки залишається $q_3 = q_2 - p_{k_2}$. Таким чином всі наступні рядки матриці складаються з елементів $a_{ij}^{k_2} = q_3 \cdot c_{ij} (i = 2, \dots, n; j = 2, \dots, n)$. Матрицю, побудовану таким чином, назовемо $A_{1k_1 k_2}$.

Підмножина $M_{1k_1 k_2}$ містить в собі підмножини: $M_{1k_1 k_2 2}, M_{1k_1 k_2 3}, \dots, M_{1k_1 k_2 k_1-1}, M_{1k_1 k_2 k_1+1}, \dots, M_{1k_1 k_2 k_2-1}, M_{1k_1 k_2 k_2+1}, \dots, M_{1k_1 k_2 n}$.

Далі проводимо аналіз кожної з цих підмножин обчислюємо верхню $F_{1k_1 k_2 j}^V$ і нижню $F_{k_1 k_2 j}^N$ оцінку функції якості цільової функції, виконуючі аналогічні дії, як для підмножин $M_{1k_1 2}, M_{1k_1 3}, \dots, M_{1k_1 k_1-1}, M_{1k_1 k_1+1}, \dots, M_{1k_1 n}$, за формулами (14)–(18). Після цього визначаємо найперспективнішу підмножину.

Цей процес розгалуження продовжується до отримання підмножини $M_{1k_1 k_2 \dots k_n}$, яка складається з одного елемента. Таким чином визначається оптимальний маршрут: $1 \rightarrow k_1 \rightarrow k_2 \rightarrow \dots \rightarrow k_n \rightarrow 1$, з поверненням в початковий пункт. При цьому оптимальне значення цільової функції визначається так:

$$F^* = q_1 c_{1k_1} + q_2 c_{k_1 k_2} + q_3 c_{k_2 k_3} + \dots + q_n c_{k_{n-1} k_n}. \quad (19)$$

Схема побудови дерева розв'язків за наведеним алгоритмом має вигляд наведений на рис. 1.

Приклад застосування запропонованого підходу. Розглянемо алгоритм застосування запропонованого методу для побудови оптимального маршруту доставки готової продукції із транспортно-логістичного центру розташованого в місті Дніпро до п'яти районних баз збуту розташованих на території області: ПП₁, ПП₂, ПП₃, ПП₄, ПП₅, ПП₆. Матриця відстаней від центру до пунктів призначення та між ними визначена даними наведеними в табл. 1, а обсяги відправлення та доставки вантажів задані у відповідності з даними табл. 2.

Вихідна область планів M допускає розгалуження на непересічні підмножини: $M_{12}, M_{13}, M_{14}, M_{15}, M_{16}$.

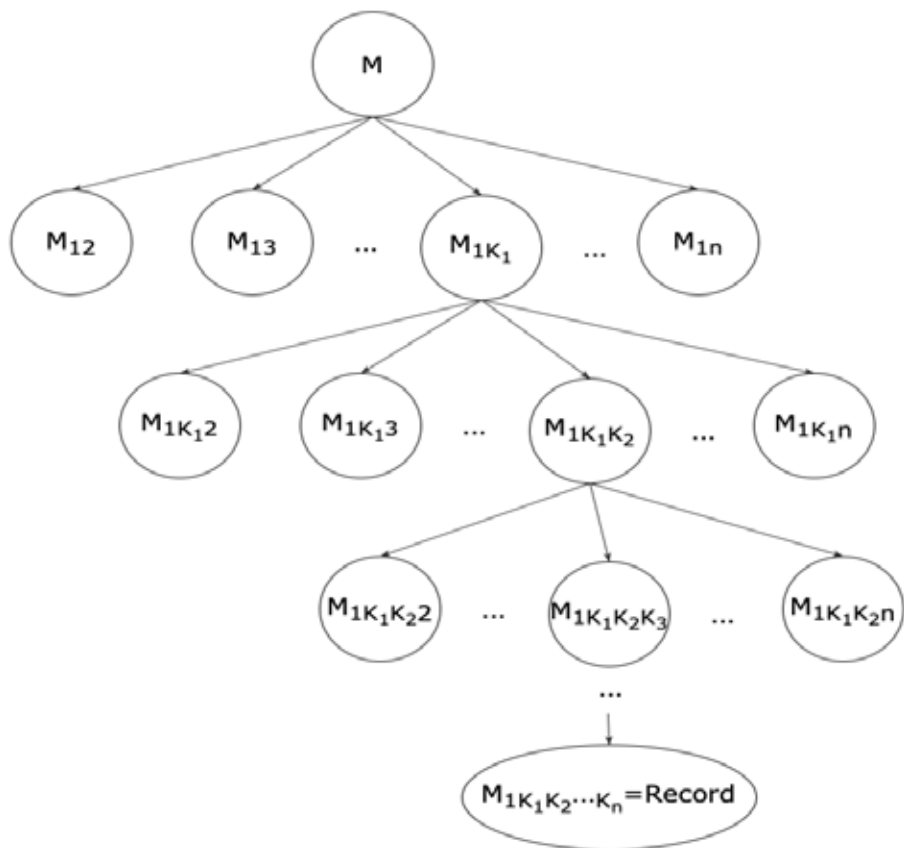


Рис. 1. Схема побудови розв'язку методом гілок та границь

Таблиця 1

Матриця відстаней доставки вантажів

№ з/п	Пункт призначення	Відстані					
		1	2	3	4	5	6
1	Дніпро	0	101	45	31	77	80
2	ПП ₂	101	0	155	100	50	140
3	ПП ₃	45	155	0	63	45	130
4	ПП ₄	31	100	63	0	58	50
5	ПП ₅	77	50	45	58	0	101
6	ПП ₆	80	140	130	50	101	0

Таблиця 2

Матриця обсягів перевезення вантажів

№ з/п	Характеристика вантажу	Пункт призначення					
		Дніпро	ПП ₂	ПП ₃	ПП ₄	ПП ₅	ПП ₆
1	Обсяг перевезення	3	0,7	0,4	0,8	0,6	0,5

Проаналізуємо значення функцій якості та відповідну величину транспортної роботи за маршрутами для кожної підмножини окремо. Перший стовпчик цієї матриці фізично означає повернення в пункт постачання після повного розвантаження. Оскільки в пункт постачання транспорт повертається порожнім, то відповідно виконана робота дорівнює нулю, тобто всі елементи $a_{i1} = 0$. Так як відправний пункт розміщення ТЛЦ – Дніпро, то для визначення транспортної роботи із доставки вантажу в перший пункт призначення перший рядок необхідно помножити на $a_1 = 3$ – обсяг всього вантажу:

0	303	135	93	231	240
0	0	155	100	50	140
0	155	0	63	45	130
0	100	63	0	58	50
0	50	45	58	0	101
0	140	130	50	101	0

Вибираємо найменше значення у першому рядку, це і буде перша ланка шуканого маршруту: $1 \rightarrow 4$.

Далі, будемо нову матрицю з урахуванням того, що було доставлено вантаж до ПП₄ (0,8 т). Перший рядок обираємо із попереднього кроку, усі інші елементи матриці визначаємо як добуток значень вихідної матриці і об'єму вантажу, який залишився $q_2 = q_1 - p_4 = 3 - 0,8 = 2,2$ т:

$$A_{14} = \begin{bmatrix} 303 & 135 & 93 & 231 & 240 \\ 0 & 341 & 220 & 110 & 308 \\ 341 & 0 & 138,6 & 99 & 286 \\ 220 & 138,6 & 0 & 127,6 & 110 \\ 110 & 99 & 127,6 & 0 & 222,2 \\ 308 & 286 & 110 & 222,2 & 0 \end{bmatrix}$$

Знайдемо оцінку знизу функції якості для підмножини M_{14} . Для матриці транспортної роботи A_{14} визначимо додаткову матрицю X' мінімальних значень транспортної роботи по рядках

$$X' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

По цій матриці знаходимо значення функції цілі F'_4

$$F'_4 = 93 + 110 + 99 + 110 + 99 + 110 = 621. \quad (20)$$

Аналогічно визначаємо додаткову матрицю X'' мінімальних значень транспортної роботи по стовпцях. Фіксуємо елемент x_{14} , який дорівнюватиме 1, а всі інші елементи в першому рядку і 4 стовпчику дорівнюватимуть 0.

$$X'' = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

По цій матриці знаходимо значення функції цілі F'' .

$$F''_4 = 93 + 110 + 99 + 110 + 99 = 511. \quad (21)$$

Нижня оцінка функції якості цільової функції на основі матриць мінімальних значень транспортної роботи за рядками та за стовпцями дорівнює:

$$F_4^N = \max(F'_4; F''_4) = 621. \quad (22)$$

Визначимося з подальшим розгалуженням. Підмножина M_{14} містить в собі підмножини: M_{142} , M_{143} , M_{145} , M_{146} . Далі проводимо аналіз цих підмножин. Для кожної підмножини M_{14j} ($j = \overline{2;6}$, $j \neq 4$)

обчислюємо верхню F_{14j}^V оцінку функції якості цільової функції. Розпочинаємо з M_{142} із початковим планом $I_{142} = (1, 4, 2, 3, 5, 6)$. За цим планом величина транспортної роботи має значення:

$$F_{142}^V = 93 + 220 + 341 + 99 + 222,2 = 975,2. \quad (23)$$

Аналогічно обчислюємо верхні границі функції якості для кожної підмножини M_{14j} ($j = \overline{2;6}, j \neq 4$). Отримаємо наступні значення.

$$F_{143}^V = 93 + 138,6 + 99 + 222,2 + 308 = 860,8; \quad (24)$$

$$F_{145}^V = 93 + 127,6 + 110 + 341 + 286 = 957,6; \quad (25)$$

$$F_{146}^V = 93 + 110 + 222,2 + 110 + 341 = 876,2. \quad (26)$$

Оскільки всі верхні границі різні не має сенсу обчислювати нижні границі, а відповідно безперспективні підмножини відсікаються:

$$Record = \min \{ F_{142}^V, F_{143}^V, F_{145}^V, F_{146}^V \} = 860,8. \quad (27)$$

Перспективною для подальшого аналізу буде підмножина M_{143} , у якій верхнє значення функції якості виявилось найменшим. Вихідна область планів даної підмножини допускає розгалуження на непересічні підмножини: M_{1432} , M_{1435} , M_{1436} .

Будуємо нову матрицю транспортної роботи A_{143} . Враховуючи те, що було доставлено вантаж до ППЗ (0,4 т), кількість вантажу, який необхідно доставити, складає 1,8 т. Оскільки відбулося перевезення $1 \rightarrow 4 \rightarrow 3$, то перший і четвертий рядки та четвертий і третій стовпчики фіксуємо з попередньої матриці (значення в стовпцях розраховуємо з другого тому, що перший стовпчик повністю складений з нулів), а всі інші елементи матриці обчислюємо як $1,8 \cdot c_{ij}$ (c_{ij} – коефіцієнти матриці відстаней). Отже, нова матриця матиме вигляд

$$A_{143} = \begin{bmatrix} -303 & -135 & -93 & -231 & -240 \\ 0 & 341 & 220 & 90 & 252 \\ 279 & 0 & 138,6 & 81 & 234 \\ -220 & -138,6 & 0 & -127,6 & -110 \\ 90 & 99 & 127,6 & 0 & 181,8 \\ 252 & 286 & 90 & 181,8 & 0 \end{bmatrix}$$

Проаналізуємо значення функції якості та відповідних величин транспортної роботи за маршрутом для кожної підмножини окремо. Всі дії виконуємо аналогічно як при аналізі підмножин M_{14j} . Значення верхньої границі функції якості наведено в табл. 3.

Таблиця 3

Значення верхньої границі функції якості підмножин M_{143j}

j	2	5	6
F_{143j}^V	782,4	654,6	737,4

За даними табл. 3 проводимо відсікання безперспективних підмножин, обираємо найменшу з верхніх границь

$$Record = \min \{ F_{1432}^V, F_{1435}^V, F_{1436}^V \} = 654,6. \quad (28)$$

Підмножина M_{1435} має найменшу верхню границю функції якості. Отже, надалі будемо розглядати цю підмножину, яка допускає розгалуження на M_{14352} , M_{14356} . Будуємо нову матрицю транспортної роботи A_{1435} . Враховуючи те, що було доставлено вантаж до ППЗ (0,6 т), кількість вантажу, який необхідно доставити, складає 1,2 т. Фіксуємо з попередньої матриці третій рядок і п'ятий стовпчик, а всі інші елементи матриці обчислюємо як $1,2 \cdot c_{ij}$ (c_{ij} – коефіцієнти матриці відстаней). Отже, нова матриця матиме вигляд

$$A_{1435} = \begin{bmatrix} -303 & -135 & -93 & -231 & -240 \\ 0 & 341 & 220 & 90 & 168 \\ -279 & 0 & -138,6 & 81 & -234 \\ -220 & -138,6 & 0 & -127,6 & -110 \\ 60 & 99 & 127,6 & 0 & 121,2 \\ 168 & 286 & 90 & 181,8 & 0 \end{bmatrix}$$

Аналогічно до аналізу попередніх підмножин, наведемо значення верхньої границі функції якості для розглянутих підмножин M_{14352} , M_{14356} :

$$F_{14352}^V = 93 + 138,6 + 81 + 60 + 168 = 540,6; \quad (29)$$

$$F_{14356}^V = 93 + 138,6 + 81 + 121,2 + 168 = 601,8; \quad (30)$$

$$Record = \min \{ F_{14352}^V, F_{14356}^V \} = 540,6. \quad (31)$$

Аналіз значень побудованих підмножини (29) – (31) дозволяє визначити оптимальне значення цільової функції F^* , яке становить:

$$F^* = 93 + 138,6 + 81 + 60 + 168 = 540,6 \text{ т·км}. \quad (32)$$

Таким чином, відповідна схема оптимального маршруту за критерієм мінімізації транспортної роботи з доставки вантажів у п'ять пунктів призначення визначається так:

$$\text{Дніпро} \rightarrow \text{ПП}_4 \rightarrow \text{ПП}_3 \rightarrow \text{ПП}_5 \rightarrow \text{ПП}_2 \rightarrow \text{ПП}_6 \rightarrow \text{Дніпро}.$$

Висновки. Аналіз результатів проведеного дослідження показує, що запропонований на основі методу гілок і границь алгоритм дозволяє визначити оптимальний розв'язок задачі зі значним скороченням аналізу можливих варіантів мінімальних маршрутів доставки за рахунок відсікання неперспективних гілок (множин). Зазначимо, що такий підхід допускає узагальнення для побудови оптимальних маршрутів доставки вантажів до пунктів призначення з мінімізацією відповідних логістичних ланцюгів. Цей метод дозволяє знаходити оптимальні маршрути для автомобільних перевезень вантажів, забезпечуючи мінімізацію витрат і підвищення ефективності транспортної логістики. Застосування запропонованого підходу для вирішення практичних задач дозволить транспортним компаніям значно покращити якість перевезень та скоротити логістичні витрати. Подальші дослідження можуть бути зосереджені на розробці гібридних алгоритмів, що поєднують застосування методу гілок і границь з елементами штучного інтелекту для підвищення швидкості обчислень та адаптивності з урахуванням динаміки транспортних потоків.

Список використаних джерел:

1. Land A.H., and Doig A.G. An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrics*. 1960. Vol 28. P.497–520.
2. Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C. An Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*. 1963. Vol. 11, № 6. P.972–989.
3. Munapo E. A Return to the traveling salesman model: a network branch and bound approach. *South African Journal of Economic and Management Sciences*. 2013. Vol 16, № 1. P.52–63.
4. Walton P. C., do Nascimento R. Q., Pessoa A.A., Subramanian A.A. Branch-and-Bound Algorithm for the Close-Enough Traveling Salesman Problem. *Inform Journal on Computing*. 2016. Vol 28, № 4. P.752–765.
5. Rastogi A., Shrivastava A. Kumar, Payal N., Singh R. A Proposed Solution to Travelling Salesman Problem using Branch and Bound. *International Journal of Computer Applications*. 2013. Vol 65, № 5. NY, USA. P.44–49.
6. Suyudi M., Sukono S., Mamat M., Bon A.T. Solving Traveling Salesman Problems Using Branch and Bound Methods. *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. Pilsen, Czech Republic. 2019. P.1606–1614.
7. Markevich E., Trushechkin A. Quantum Branch-and-Bound Algorithm and its Application to the Travelling Salesman Problem. *Mathematical Sciences. Springer Science and Business Media LLC*. 2019. № 2. P.168–184.
8. Wiener R. Branch and Bound Implementations for the Traveling Salesperson Problem. *Object Technology*. 2003. Vol. 2, № 2. P.65–86.
9. Ropke S., Cordeau J.-F., Laporte G. Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*. 2007. Vol 49, № 4. P.258–272.

10. Inayatullah S., Riaz W., Jafree H.A., Siddiqi T.A., Imtiaz M., Naz S., Hassan S.A. A Note on Branch and Bound Algorithm for Integer Linear Programming. *Current Journal of Applied Science and Technology*. 2019. Vol 34, № 6. P.1–6.

11. Крижанівський Б. Використання методу гілок і меж при розв'язанні задач лінійного цілочислового програмування. Матеріали науково-технічної конференції «Наука. Освіта. Молодь». Умань. 2016. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2016_1/85.pdf.

12. Мельник І.М., Піднебесна Г.А. Особливості застосування методу гілок і границь для розв'язання задачі вибору оптимальної регресійної моделі. *Індуктивне моделювання складних систем*. 2012. № 4. С. 128–135.

13. Козар Л. М., Романович Є. В., Афанасов Г. М. Методи транспортної логістики : навчальний посібник. Харків: УкрДАЗТ. 2015. 175 с.

14. Пасічник А.М., Худа Ж.В., Циба В.В. Метод оптимізації роботизованої транспортної системи портової переробки вантажопотоку. *Системи та технології*. 2023. В.66, № 2. С. 5–12.

15. Пасічник А.М., Худа Ж.В., Циба В.В. Оптимізація маршрутів автомобільних перевезень вантажів із застосуванням методу гілок і границь. Мат. III міжн. наук.-практ. конф. «Сучасні дослідження: транспортна інфраструктура та інноваційні технології». Київ: ДУІТ. 2024. Ч.2. С. 280–283.

References:

1. Land A.H., and Doig A.G. (1960). An automatic method of solving discrete programming problems. *Econometrics*, (28), 497–520.

2. Little J. D. C., Murty K. G., Sweeney D. W., Karel C. (1963). An Algorithm for the Traveling Salesman Problem. *Operations Research*, (11, 6), 972–989.

3. Munapo E. A (2013). Return to the traveling salesman model: a network branch and bound approach. *South African Journal of Economic and Management Sciences*, (16, 1), 52–63.

4. Walton P. C., do Nascimento R. Q., Pessoa A.A., Subramanian A. A (2016). Branch-and-Bound Algorithm for the Close-Enough Traveling Salesman Problem. *Inform Journal on Computing*, (28, 4), 752–765.

5. Rastogi A., Shrivastava A. Kumar, Payal N., Singh R. (2013). A Proposed Solution to Travelling Salesman Problem using Branch and Bound. *International Journal of Computer Applications*. NY, USA, (65, 5), 44–49.

6. Suyudi M., Sukono S., Mamat M., Bon A.T. (2019). Solving Traveling Salesman Problems Using Branch and Bound Methods. Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management. Pilsen, Czech Republic, 606–1614.

7. Markevich E., Trushechkin A. (2019). Quantum Branch-and-Bound Algorithm and its Application to the Travelling Salesman Problem. *Mathematical Sciences*. № 2, Springer Science and Business Media LLC, 168–184.

8. Wiener R. (2003). Branch and Bound Implementations for the Traveling Salesperson Problem. *Object Technology*, (2, 2), 65–86.

9. Ropke S., Cordeau J.-F., Laporte G. (2007). Models and branch-and-cut algorithms for pickup and delivery problems with time windows. *Networks*, (49, 4), 258–272.

10. Inayatullah S., Riaz W., Jafree H.A., Siddiqi T.A., Imtiaz M., Naz S., Hassan S.A. (2019). A Note on Branch and Bound Algorithm for Integer Linear Programming. *Current Journal of Applied Science and Technology*, (34), 6, 1–6.

11. Kryzhanivskyi B. (2016). Vykorystannia metodu hilok i mezh pry rozv'iazanni zadach liniinoho tsilochyslovoho prohramuvannia [Using the twig and boundary method when solving linear integer programming problems]. Materialy naukovo-tekhnichnoi konferentsii «Nauka. Osvita. Molod». Uman. URL: https://library.udpu.edu.ua/library_files/stud_konferenzia/2016_1/85.pdf [in Ukrainian].

12. Melnyk I.M., Pidnebesna H.A. (2012). Osoblyvosti zastosuvannia metodu hilok i hranyts dla rozv'iazannia zadachi vyboru optymalnoi rehresiinoi modeli [Features of using the twig and boundary method to solve the problem of choosing the optimal regression model]. *Induktyvne modeliuвання skladnykh system*, (4), 128–135 [in Ukrainian].

13. Kozar L. M., Romanovych Ye. V., Afanasov H. M. (2015). Metody transportnoi lohistyky [Transport logistics methods]: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: UkrDAZT [in Ukrainian].

14. Pasichnyk A.M., Khuda Zh.V., Tsyba V.V. (2023). Metod optymizatsii robotyzovanoi transportnoi systemy portovoi pererobky vantazhopotoku [Method for optimizing a robotic transport system for port cargo processing]. *Systemy ta tekhnolohii*. (66, 2), 5–12 [in Ukrainian].

15. Pasichnyk A.M., Khuda Zh.V., Tsyba V.V. (2024). Optymizatsiia marshrutiv avtomobilnykh perevezen vantazhiv iz zastosuvanniam metodu hilok i hranyts [Optimization of road freight routes using the twig and boundary method]. Мат. III mizhn. nauk.-prakt. конф. «Suchasni doslidzhennia: transportna infrastruktura ta innovatsiini tekhnolohii» (2), 280–283). Kyiv [in Ukrainian].

Сохацький А. В., доктор технічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Інституту транспортних систем та технологій Національної академії наук України
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3593-6517

ДЕЯКІ ПИТАННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ НАВКОЛО ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ ТА ЇХ ЕЛЕМЕНТІВ

Обтікання транспортних засобів турбулентним потоком уявляє собою складну нелінійну динамічну систему. Для дослідження цих складних нелінійних систем реалізують певні методологічні підходи. Ці підходи повинні ґрунтуватися на основі об'єктивних фізичних законів, що описують поведінку динамічної системи. В результаті аналізу досліджуваних процесів необхідно виявити їх закономірності та розробити їх опис.

Математичне моделювання таких нелінійних динамічних систем є міждисциплінарним інструментом дослідження різноманітних фізичних процесів. Проблеми моделювання розвинутої турбулентності залишаються відкритими. Єдиного механізму переходу до турбулентного хаосу в різних типах гідродинамічних течій наразі ще не знайдено. У розвинутому турбулентному потоці присутні пульсації з масштабами від найбільших до дуже малих. На сьогодні відомі чотири механізми переходу ламінарної течії до турбулентної при досягненні числом Рейнольдса критичного значення. Вважається, явище турбулентності в певній мірі пов'язано з хаосом.

Вичерпної теорії виникнення турбулентності в різноманітних аеродинамічних течіях на сьогодні взагалі немає. На сьогодні запропоновано ряд сценаріїв розвитку турбулентних течій, оснований на процесах хаотизації руху. Це наступні сценарії: оснований на уявленні про ієрархію квазіперіодичних рухів; процес хаотизації руху рідини Рюеля-Тakens; перехід до турбулентного хаосу через послідовність біфуркацій подвоєння періоду; перехід до турбулентності через переміжуваність. Ці підходи зародилися в результаті досліджень модельних систем турбулентних течій та їх аналізу з використанням диференціальних рівнянь. Їх математичний опис є надзвичайно складним і потребує подальшого розвитку.

Для числового розв'язування задачі з розрахунку характеристик турбулентної течії навколо наземного транспортного засобу обрано модель течії в'язкого стисливого газу, що описується осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса. Розрахункова область навколо транспортного апарата є складною, тому доцільно використовувати багатоблоковий підхід та криволінійну систему координат. Розроблено методіку, побудовано алгоритм та написано коди комплексу програмного забезпечення на мові Fortran-95.

Шляхом числового розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта – Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів, розраховано плоскопаралельне обтікання колового циліндру. Отримані результати розрахунків порівнюються з експериментальними даними.

Ключові слова: механізм турбулентності, аеродинаміка транспортних апаратів; числове моделювання; осереднені за Рейнольдсом рівняння Нав'є-Стокса; моделі турбулентності.

Sokhatskyi A. V. Some issues of mathematical modeling of turbulent flows around transport vehicles and their elements

The flow of vehicles in a turbulent flow is a complex nonlinear dynamic system. To study these complex nonlinear systems, certain methodological approaches are implemented. These approaches should be based on objective physical laws that describe the behavior of a dynamic system. As a result of the analysis of the processes under study, it is necessary to identify their regularities and develop their description.

Mathematical modeling of such nonlinear dynamical systems is an interdisciplinary tool for studying various physical processes. The problems of modeling advanced turbulence remain open. A single mechanism of transition to turbulent chaos in different types of hydrodynamic flows has not yet been found. In a developed turbulent flow, there are pulsations with scales ranging from the largest to very small. To date, four mechanisms are known for the transition of laminar flow to turbulent flow when the Reynolds number reaches a critical value. It is believed that the phenomenon of turbulence is to some extent related to chaos.

Today, there is no comprehensive theory of turbulence in various aerodynamic flows. To date, a number of scenarios for the development of turbulent flows based on the processes of motion chaos have been proposed. These are the following scenarios: based on the idea of the hierarchy of quasi-periodic motions; the process of chaoticization of fluid motion by Ruelle-Takens; transition to turbulent chaos through a sequence of doubling period bifurcations; transition to turbulence through intermittency. These approaches originated as a result of studies of model systems of turbulent flows and their analysis using differential equations. Their mathematical description is extremely complex and requires further development.

To numerically solve the problem of calculating the characteristics of turbulent flow around a ground vehicle, a model of viscous compressible gas flow described by the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations was chosen. The computational domain around the vehicle is complex, so it is advisable to use a multi-block approach and a curved coordinate system. The methodology was developed, the algorithm was constructed, and the codes of the software package were written in Fortran-95.

By numerically solving the Reynolds-averaged Navier-Stokes equations closed by the Spalart-Allmaras turbulence model in the realization of separated vortices, the plane-parallel flow of a circular cylinder is calculated. The obtained results are compared with experimental data.

Key words: mechanism of turbulence, aerodynamics of vehicles; numerical modeling; Reynolds-averaged Navier-Stokes equations; turbulence models.

Постановка проблеми. Фізичний процес обтікання транспортних засобів турбулентним потоком уявляє собою складну нелінійну динамічну систему. Математичне моделювання нелінійних динамічних систем є міждисциплінарним інструментом дослідження різноманітних фізичних процесів [1-4]. Для дослідження таких складних нелінійних систем реалізують певні методологічні підходи. Ці підходи повинні ґрунтуватися на основі об'єктивних фізичних законів, що описують поведінку динамічної системи. В результаті аналізу досліджуваних процесів необхідно виявити їх закономірності та розробити їх опис.

Розуміння турбулентності, як фізичного процесу, різниться у своєму визначенні. Так Бредшоу визначає турбулентність наступним чином: «Турбулентність – це тривимірний нестационарний рух, у якому внаслідок розтягування вихорів створюється безперервний розподіл пульсацій швидкості в інтервалі довжин хвиль від мінімальних, які визначаються в'язкими силами, до максимальних, які визначаються межовими умовами течії. Вона є звичайним станом рухомої рідини, за винятком течій за малих чисел Рейнольдса» [5]. В роботі [6] турбулентність визначається, як будь-який хаотичний розв'язок тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса, чутливий до початкових умов, який з'являється як результат послідовної низки нестійкостей ламінарного потоку, що виникають при поступовому збільшенні значення параметра біфуркації.

Чепмен і Тобак виділили три епохи в розвитку наших уявлень про турбулентність: статистичну, структурну та детерміністичну [6]. Проте вичерпної теорії виникнення турбулентності в різноманітних аерогідродинамічних течіях на сьогодні взагалі немає.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Турбулентність, як фізичне явище виникає за певних умов у нелінійному дисипативному рідкому або газоподібному середовищі з дуже великим числом ступенів свободи, яке може обмінюватися з навколишнім середовищем енергією. Внаслідок цього зміна в часі і просторі будь-якої гідродинамічної величини описується функціями, що містять величезне число компонент Фур'є, тобто мають дуже складний характер [7-10]. Саме з цієї причини кожна індивідуальна рідка частинка цього середовища такої динамічної системи рухається таким заплутаним чином, так що її координати і напрямки руху змінюються з часом за законами стохастичної механіки. Кореляції швидкості в будь-якій точці потоку обмежені при цьому малими часовими інтервалами, залежними від початкових умов, за межами яких неможливо встановити причинний зв'язок між полем швидкостей у різні моменти часу, зокрема кореляцію з попереднім рухом [9,10].

Усе це підкріплює уявлення про стохастичний характер пульсацій швидкості та інших фізичних параметрів у турбулентному потоці, що виникають як результат втрати стійкості ламінарного руху гідродинамічної системи під час зміни зовнішніх керуючих параметрів. З цього погляду турбулентний рух є більш хаотичним, ніж ламінарний, тобто турбулентність ототожнюється з хаосом. У більш загальному розумінні турбулізацію руху рідини або газу можна уявити як результат зміни топології фазових траєкторій, що призводить до перебудови атракторів і якісної зміни (біфуркації) стану руху у фазовому просторі. Відображенням стохастичної природи турбулентності слугує повне перемішування фазових траєкторій з різною асимптотичною поведінкою і структурою (топологією) областей тяжіння (атракторів), що їх оточують [1,7-10]. Ознакою перемішування є швидке загасання кореляційних функцій на протязі значного часу і безперервність частотних спектрів. Така поведінка траєкторій у фазовому просторі означає, що система має ергодичність, тобто майже для всіх реалізацій випадкового поля часові середні дорівнюють відповідним статистичним середнім [9,21]

$$\langle A(r) \rangle = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T A(r) dt \quad (1)$$

де кутовими дужками позначатимемо середнє за ансамблем реалізацій. Ергодична властивість, мабуть, є однією з характерних рис стаціонарного однорідного дрібномасштабного турбулентного поля [11].

Повний статистичний опис турбулентного руху зводиться до визначення ймовірнісної міри на його фазовому просторі, що складається з усіляких випадкових реалізацій, які характеризують стан гідродинамічних полів. Тому найбільш адекватним у теорії турбулентності видається статистичний опис, що спирається на вивчення специфічних статистичних закономірностей, властивих великим сукупностям однотипних гідродинамічних систем. Основою для опису турбулізованого середовища є статистична гідромеханіка, що вивчає статистичні властивості ансамблів течій рідин або газів, які перебувають у макроскопічно однакових

зовнішніх умовах [3,4]. Таким чином, проблема феноменологічного моделювання розвинутої турбулентності природних середовищ, полягає у виокремленні деяких середніх характеристик, що адекватно описують властивості системи з величезним числом ступенів свободи (рис. 1). Саме з цієї причини такий підхід пов'язаний з тим чи іншим способом обмеження числа ступенів свободи [3,4].

Отже, турбулентність є однією з форм прояву різноманітності рухів у відкритих механічних системах, що мають дуже велике число ступенів свободи та високим ступенем нелінійності (рис. 1). У системах такого роду зі зростанням деякого керуючого параметра виникають хаотично розподілені і хаотично осцилюючі структури найрізноманітнішого масштабу. Тому тривалий час турбулентність асоціювалася із втіленням чистого хаосу [9-12].

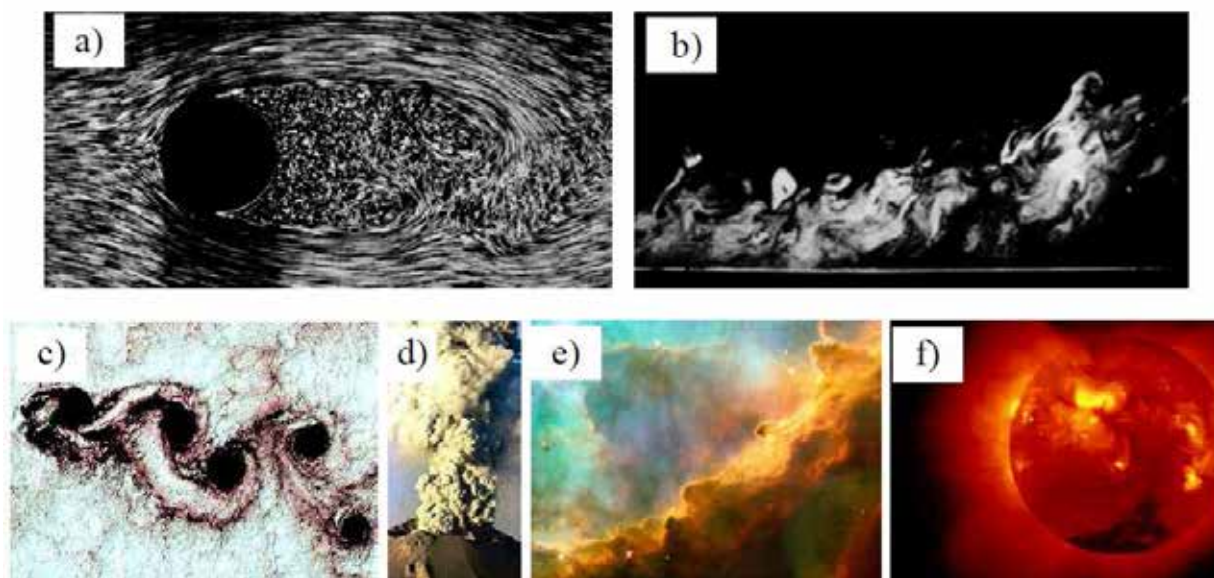


Рис. 1. Приклади когерентних вихрових структур [12-15]:

a – обтікання циліндра; b – турбулентний примежовий шар за наявності позитивного подовжнього градієнта тиску; c – «слід» острова в океані; d – виверження вулкану, e – галактичні хмари; f – Сонце

Проте у розвинутому турбулентному потоці існують елементи порядку, коли на тлі дрібномасштабного пульсуючого руху рідини можуть зароджуватися впорядковані просторово-часові утворення, так звані когерентні вихрові структури [1,11,12,16]. З цієї причини, якщо виникнення гідродинамічної турбулентності характеризує перехід від порядку до хаосу, то в розвинутому турбулентному потоці (коли $Re \gg Re_{cr}$) має місце також і зворотний процес – народження порядку з хаосу [9,10]. Проблеми моделювання розвинутої турбулентності, що виникає за досить великих чисел Рейнольдса Re залишаються відкритими. Слід зазначити, що єдиного механізму переходу до турбулентного хаосу в різних типах гідродинамічних течій наразі ще не знайдено. На сьогодні найбільш аргументованими є чотири найпоширеніші механізми переходу ламінарної течії до турбулентної при досягненні числом Рейнольдса критичного значення Re_{cr} [1,8,9,17-23]:

- сценарій переходу до турбулентності за Ландау і Хопфом;
- сценарій процесу хаотизації руху рідини Рюеля-Такенса.;
- перехід до турбулентного хаосу через послідовність біфуркацій подвоєння періоду;
- перехід до турбулентності через переміжуваність.

За винятком найбільш ранньої гіпотези Ландау [1], всі інші механізми пов'язані зі скінченно-вимірними моделями турбулентності. Слід зазначити, що наявні на сьогодні дослідження не дозволяють зробити остаточного вибору поміж ними, оскільки в експериментах, як правило, присутні риси різних механізмів.

Постановка завдання. Дослідження таких складних нелінійних систем, як турбулентні течії навколо транспортних апаратів необхідно проводити з використанням коректних математичних моделей. Вони повинні будуватися на основі об'єктивних фізичних законів, що описують поведінку динамічної системи. Це дозволить виявити їх закономірності та розробити їх опис. Метою роботи є розгляд проблеми феноменологічного моделювання розвинутої турбулентності природних середовищ, що адекватно описують властивості системи з певним числом ступенів свободи, і на основі цього провести аргументований вибір математичної моделі течії для подальших досліджень аеродинамічних процесів транспортних апаратів та їх елементів.

Виклад основного матеріалу. Сучасні підходи до опису турбулентної течії. У розвинутому турбулентному потоці присутні пульсації з масштабами від найбільших до дуже малих. Такі течії характеризуються наповненими спектрами Фур'є, причому не тільки часовими, а й просторовими. Основну роль

у турбулентному потоці відіграють великомасштабні пульсації, масштаб яких – порядку величини характеристичної довжини L , що визначає розмір області G , у якій відбувається турбулентний рух [1,9-14]. Цю величину називають зовнішнім масштабом турбулентності. Великомасштабні рухи, що мають найбільші амплітуди, мають певну швидкість, за порядком величини порівнянну зі змінами середньої швидкості вздовж відстані L . Дрібномасштабні ж пульсації, що мають значно менші амплітуди, можна розглядати як дрібну детальну структуру, що накладається на основні великомасштабні турбулентні рухи. У дрібномасштабних пульсаціях укладена лише порівняно мала частина всієї кінетичної енергії рідини. Розвинена дрібномасштабна турбулентність є локально однорідною та ізотропною

Згідно з теорією Колмогорова [24] дрібномасштабна структура розвиненої турбулентності для ізотермічної течії (коли $\rho = const$, $\nu = const$) визначається каскадним характером передавання енергії по спектру вихорів (турбулентних пульсацій) різних просторово-часових масштабів (рис. 2). Якісна схема каскаду Річардсона-Колмогорова полягає в наступному. Дрібні вихори отримують енергію в результаті послідовного подрібнення великих вихорів при зростанні числа Рейнольдса Re . Найбільші енергонесучі вихори утворюються внаслідок втрати стійкості вихідної ламінарної течії, і їхні розміри $\lambda_1 \equiv L_1$ (Прандтлівський шлях перемішування) значно менші за характерний масштаб L самої області течії G . Ці збурення першого порядку, через занадто велике число Рейнольдса великомасштабних пульсацій $Re_{\lambda_1} \sim \lambda_1 u'_1 / \nu$, відповідного їхньому масштабу λ_1 і відносної швидкості u'_1 ; виявляються нестійкими і, руйнуючись, породжують збурення другого порядку ($\lambda_2 u'_2$), які, зі свого боку, з тієї самої причини спричиняють появу ще більш дрібних вихорів і т. д [6-14].

Процес подрібнення вихорів зупиняється, коли сили молекулярної в'язкості в рідині починають відігравати істотну роль. Це відбувається для вихорів із числами Рейнольдса $Re_\eta \sim 1$. При цьому відбувається безперервний перерозподіл питомої кінетичної енергії $\sim U^3/L$ несучого потоку від великомасштабних вихорів до більш дрібних, аж до найдрібніших із характерним розміром порядку внутрішнього масштабу турбулентності $\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4}$, який характеризує вплив в'язких ефектів на структуру дрібномасштабної турбулентності [1,3,4,6-14]. У межах дуже великих чисел Re встановлюється квазістаціонарний режим інерційного перенесення кінетичної енергії від великих вихорів до менших, за якого енергія, врешті-решт через молекулярну в'язкість ν перетворюється на тепло в гідродинамічно стійких дрібних вихорів масштабу $\lambda_k \leq \eta$ (в'язкий інтервал) [1,6-14,19-21].

Колмогоров припустив, що існує так званий інерційний інтервал ($\eta < \lambda_k < L_1$) масштабів вихорів, у яких не відбувається помітного продукування й дисипації енергії, точніше, дисипація в них мала порівняно з тією енергією, що її вони отримують від більших вихорів і передають дрібнішим [1,9, 21,24,25].

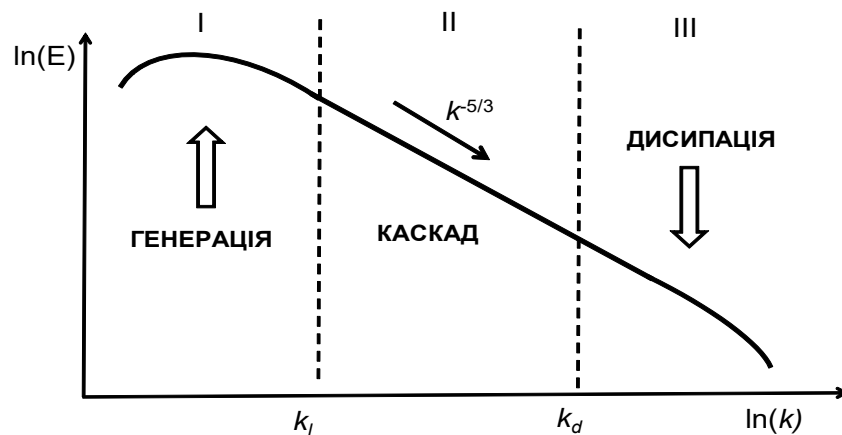


Рис. 2. Області енергетичного спектра турбулентності для високих значень числа Рейнольдса [1, 9, 21, 24, 25]

Важливо підкреслити, що якщо число Re велике, то, незважаючи на анізотропність, неоднорідність і нестационарність усередненої течії, випадковий характер подрібнення вихорів і хаотичність передавання їхньої енергії каскадом призводять до того, що статистичний режим дрібномасштабних пульсацій, які лежать у просторо-тимчасовій області G , є локально ізотропним. Тобто він є однорідним, ізотропним і квазістаціонарним (таким, що змінюється залежно лише від характеристик осередненого руху). Квазістаціонарний режим турбулентної течії, за якого реалізується потік енергії в область малих масштабів, передбачає, певні межові умови розглянутої області течії G , що створюють накачування і витік[1,9,21, 24,25].

Для дисипаційного масштабу довжина η , згідно першої гіпотези подібності Колмогорова, відповідно до якої статистичний режим дрібномасштабної локальної ізотропної турбулентності однозначно визначається двома розмірними параметрами – середньою швидкістю дисипації енергії $\varepsilon(r,t)$ і молекулярною в'язкістю ν [9,10,24]

$$\eta = (v^3/\varepsilon)^{1/4} \quad (2)$$

Величина $\varepsilon(r, t)$ представляє собою осереднену за ансамблем можливих реалізацій течії середовища дисипацію турбулентної енергії в одиниці маси рідини за одиницю часу. Одночасно вона характеризує швидкість передачі кінетичної енергії пульсаційного руху за ієрархією вихорів у каскадному процесі:

$$U^3/L \approx u_1^3/\lambda_1 \approx \dots \approx u_n^3/\eta \approx v u_n^2/\eta^2 \equiv \varepsilon = \text{const} \quad (3)$$

Це наслідок другої гіпотези подібності Колмогорова [24], згідно з якою в інерційному інтервалі ($\eta < \lambda_k < L_1$) статистичний режим турбулентності визначається єдиним параметром ε . Тут $u_k^3/\lambda_k \sim u_k^2/t_k$ – питома кінетична енергія, яку отримують за одиницю часу вихори k -го порядку від вихорів $k-1$ -го порядку та яку вони передають вихорам $(k+1)$ -го порядку; $u_n \approx (v\varepsilon)^{1/4}$, $t_n \approx \eta/u_n = \sqrt{v/\varepsilon}$ – відповідно порядок швидкості та часу пульсацій у вихорах Колмогоровського дисипативного масштабу η . У теорії Колмогорова передбачається також, що на кожному масштабі (кроці каскаду) вихори заповнюють усю область G безперервно [1,24].

Важливе співвідношення, що стосується обумовленого в'язкістю нижнього порогу – Колмогоровського дисипативного масштабу отримуємо з співвідношень (2) і (3)

$$L/\eta \propto (v^3/L^3 U^3)^{-1/4} \propto \text{Re}^{3/4} \quad (4)$$

Таким чином, у теорії Колмогорова інерційний інтервал охоплює діапазон масштабів, що зростає при збільшенні числа Рейнольдса як $\text{Re}^{3/4}$. У разі числового моделювання розвинутої турбулентної течії на рівномірній сітці, мінімальна кількість її вузлів у кубі зі стороною, що дорівнює довжині основного масштабу L , має бути $N \propto \text{Re}^{3/4}$, що дає змогу в загальному випадку досить скептично дивитися на перспективи чисельного моделювання [1]. Однак через наявність у реальній турбулентності тонких вихрових ниток та інших когерентних утворень, що пронизують значну частину області турбулентної течії, число ступенів свободи розвинутої турбулентності може бути набагато меншим, ніж $\text{Re}^{3/4}$ [1,9,10].

Кількісний опис дрібномасштабної локально ізотропної турбулентності в ділянці G за припущення $\Lambda \sim L_1$ ґрунтується на використанні структурних функцій [9]

$$D_{ij}(r) = \overline{(u'_i(x) - u'_i(x+r))(u'_j(x) - u'_j(x+r))} \quad (5)$$

та їхніх спектрів

$$E_{ij}(k) = \int D_{ij}(r) \exp(ik \cdot r) dr, \quad (6)$$

де $i = \sqrt{-1}$, k – хвильове число [24,26].

З першої гіпотези подібності та припущення про те, що параметри великомасштабної турбулентності слабо змінюються на відстанях порядку $r = |r|$, якщо $r < L_1 \ll L$, впливає [9], що

$$D_{ij}(r) = (\varepsilon r)^{2/3} [f(r/\eta) r_i r_j r^{-2} + g(r/\eta) \sigma_{ij}] \quad (7)$$

де f та g – довільні функції безрозмірного аргументу (r/η) .

Згідно з другою гіпотезою подібності, структурна функція в інерційному інтервалі $L_1 \gg r \gg \eta \sim L \text{Re}^{3/4}$ не залежить від в'язкості ν , тобто $f = \text{const}$, $g = \text{const}$ при $r/\eta \gg 1$. Звідціля впливає один із найважливіших законів дрібномасштабних турбулентних рухів (закон двох третин): у будь-якій турбулентній течії з досить великим числом Рейнольдса Re середній квадрат різниці швидкостей у двох точках на відстані r одна від одної за не надто малих, але й не надто великих значень r (порівнянних із масштабом довжини Λ відповідної усередненої течії), має бути пропорційним $r^{2/3}$, звідкіля [9,10],

$$D_{11}(r) = C (\varepsilon r)^{2/3}, \quad (8)$$

де C – універсальна стала.

Еквівалентне «закону двох третин» для структурної функції поля швидкості твердження, сформульоване в термінах спектрів, набуває вигляду:

$$E(k) \approx C * \varepsilon^{2/3} k^{-5/3}, \quad (9)$$

що згідно роботи [26]. $1/\eta \gg k \gg 1/L$.

Цей закон нині добре підтверджено експериментально для найрізноманітніших турбулентних течій [3,4]. Що стосується структурних функцій n -порядку, то теорія подібності Колмогорова приводить до співвідношення $V^n \sim (\varepsilon r)^{n/3}$, (де $V \equiv u'(r) - u'(r+r^*)$), яке, взагалі кажучи, не підтверджується експериментально, особливо для $n \gg 1$ [9,19-21]. Як відомо, ця обставина пов'язана з тим, що гіпотези подібності для локально ізотропної турбулентності в їхній первісній формі припускали сталість припливу енергії

до дрібномасштабних збурень, що лежать в інерційному інтервалі, тобто сталість параметра Колмогорова ε [9,19,21].

Однак для реальних турбулентних течій дисипація енергії $\varepsilon(r, t)$ змінюється не тільки під час переходу від однієї точки r (області G) течії до іншої, але є випадковою величиною від координат r і часу t , пульсуючи разом із миттєвим полем швидкостей $u'(r, t)$. Розподіли ймовірностей дисипації енергії $\varepsilon(r, t)$ впливають на безумовні розподіли ймовірностей для дрібномасштабних характеристик розвиненої турбулентності, які з цієї причини в загальному випадку не можуть бути цілком універсальними [21]. Це залежить у загальному випадку від зміни гідродинамічних характеристик осередненого руху середовища, зокрема від числа Рейнольдса Re .

Відоме зауваження [1] щодо початкових гіпотез подібності Колмогорова стосувалося саме цього впливу. У зв'язку з цими труднощами, уявлення Колмогорова про випадковий каскад було уточнено в роботі [7], в якій запропоновано відмовитися від умови $\varepsilon(r, t) = const$ в ділянці G (із центром у точці r і характерним масштабом $\Lambda \ll L$) і виходити з того, що статистичні характеристики дрібномасштабних рухів (наприклад, структурні функції) визначаються не теоретико-імовірнісним середнім значенням $\varepsilon(r, t)$ випадкової величини ε , а залежать від значень дисипації $\varepsilon(r, t)$, осередненої по деякому об'єму Ω_r з характерним розміром r , малим порівняно з типовим масштабом неоднорідності осередненої течії, $r \ll \Lambda$. Якщо, як область осереднення, що лежить у межах G , вибрати кулю радіуса r (одержувані результати слабо залежать від форми області осереднення), то величина ε_r , визначається за формулою [9,21]

$$\varepsilon_r(r, t) = \frac{6}{\pi r^3} \int_{|r^*| < r} \varepsilon(r + r^*, t) dr^* \quad (10)$$

Слід зазначити, що початкова теорія каскаду не є абсолютно точною ще й тому, що в ній не враховуються в явному вигляді будь-які дрібномасштабні когерентні дисипативні структури, якими може володіти турбулентне поле, за винятком допустимого в її рамках макроструктурування потоку на великих масштабах ($r \sim L$) [9,21]. Проте, будь-яка адекватна теорія турбулентності зобов'язана враховувати наявність і динаміку подібних дисипативних структур і нерівномірність їхнього просторово-часового розподілу в хаотичному потоці [27,28].

З іншого боку, з хаотичним характером передання кінетичної енергії по каскаду, що викликається нестійкістю дисипативних структур, пов'язане явище гідродинамічної внутрішньої перемежованості, за якої області, зайняті так званими турбулентними плямами (в яких спостерігаються інтенсивні пульсації градієнтів швидкості, ($\varepsilon_r > 0$), тісно переплітаються з областями зі слабо турбулізованою або повністю безвихровою рідиною (в яких такі пульсації практично відсутні, $\varepsilon_r \approx 0$). Наявність перемежованості відповідає режиму течії (за малого числа Re), коли потужності постійно діючого механізму турбулізації середовища, що передає енергію потоку на великих масштабах, ще недостатньо для формування повністю розвиненої турбулентності в усій області G , зайнятій рідиною [9,31]. Таким чином, значення величини $\varepsilon_r(r, t)$ (або споріднених їй величин, квадратичних за градієнтами швидкості) можуть слугувати індикатором перемежованості.

Крім статистичного підходу до моделювання турбулентності, нині дедалі ширше знаходять застосування методи прямого числового моделювання турбулентності на основі розв'язування нестационарної системи тривимірних рівнянь Нав'є-Стокса. Проте через стохастичність цього явища в реальності вдається отримувати лише осереднені характеристики руху. Це дає змогу, іноді простежити не тільки еволюцію утворень різних просторових структур із плином часу, але також вивчати загальну динаміку і природу розвитку турбулентності. Наприклад, результати чисельного моделювання явища «Перекидів» у гідродинамічній системі (сконструйованій у вигляді багаторушної моделі зачеплення найпростіших елементів – триплетів) ілюструють каскадний процес передачі енергії в розвиненому турбулентному потоці, що відповідає закону Колмогорова-Обухова і підкріплюють уявлення про загальні властивості в поведінці динамічних систем [29]. Цікаво також зазначити, що дослідження процесу стохастизації динамічних систем і сценаріїв переходу до хаосу під час числового моделювання турбулентності служать аналогом розв'язання некоректних задач із використанням оператора осереднення і «Параметричного розширення» [30].

За такого підходу впорядкована структура турбулентної течії, що визначається як аттрактор асимптотично стійкого розв'язку для осереднених величин, уявляє собою її регуляризований опис [12]. Слід, однак, зауважити, що використання методів прямого числового моделювання турбулентності для розв'язання практично важливих задач (особливо задач, пов'язаних із розрахунками турбулентного тепло і масо-перенесення в багатокомпонентних хімічно активних сумішах) часто є проблематичним [9,21,25]. Проте більш, повне розв'язання рівнянь гідродинаміки для флуктуаційних параметрів (через дуже велику кількість турбулентних ступенів свободи) містило б настільки велику інформацію, що не могло б бути повністю реалізовано [9,21,25].

У зв'язку з цим на перший план виступає завдання наближеного (напівемпіричного) опису турбулентності. Під час виведення усереднених рівнянь руху рідини, що становлять основу сучасної гідродинамічної теорії турбулентності, основна маса дослідників опирається на рівняння гідродинаміки у формі рівнянь Нав'є-Стокса, які за припущенням описують течію рідини і в турбулізованому режимі навіть за екстремально

великих значень безрозмірних параметрів. Однак сама можливість вибору цих рівнянь як стартових для переходу до осереднених рівнянь Рейнольдса не є безперечною, хоча б тому, що під час їхнього виведення робиться досить сильне припущення про лінійний зв'язок тензора в'язких напружень Π_{ij} з першими похідними поля швидкостей $\partial u_i / \partial x_j$ [16]. Хоча в ламінарних і слабо надкритичних течіях це припущення добре працює, але в сильно нелінійних турбулентних рухах рідини не можна виключити більш складної залежності тензора в'язких напружень від тензора швидкостей деформацій. У зв'язку з цим слід навести ще один аргумент на користь подібного роду сумнівів, процитувавши витяг із роботи [16]: «Таким чином, гіпотеза про те, що турбулентність повністю описується рівняннями Нав'є-Стокса, математично не обґрунтована, оскільки немає загальної теореми, яка гарантує глобальне існування розв'язків рівнянь Нав'є-Стокса, як задачі з початковими умовами. Цілком імовірно (хоча таких прикладів поки що немає), що ці розв'язки можуть стати сингулярними, так що рівняння перестають бути справедливими і для побудови повної теорії потрібні, мабуть, нові фізичні принципи, що виходять за рамки класичної гідродинаміки».

На сьогодні дослідники турбулентних течій використовують переважно класичний підхід до моделювання зсувної турбулентності, який ґрунтується на ідеї Рейнольдса про усереднення гідродинамічних рівнянь за ансамблем тотожних течій (можливих реалізацій), або за допомогою іншої еквівалентної процедури [31,32,34,36]. Отримані в такий спосіб рівняння масштабу середнього руху, внаслідок нелінійності вихідних гідродинамічних рівнянь, містять невизначені кореляційні члени (типу векторів турбулентної дифузії і тепла, або тензора турбулентних напружень Рейнольдса) і тому виявляються незамкненими. Закриття осереднених за Рейнольдсом рівнянь гідродинаміки суміші зазвичай проводять за допомогою тих чи інших напівемпіричних моделей турбулентності, що ґрунтуються, наприклад, на залученні послідовності диференціальних рівнянь для моментів флуктуацій. Разом з тим, важливо вже тут вказати на принциповий недолік цього підходу, який полягає в тому, що усереднення Рейнольдса здійснюється за усіма просторовими масштабами турбулентності [16]. Тобто моделювання на основі напівемпіричних гіпотез закриття за необхідності проводиться одночасно по всьому спектру різномасштабних вихрових структур.

Якщо врахувати те, що на відміну від практично універсального спектра дрібномасштабних пульсацій, великомасштабні вихрові структури істотно різні для різних течій (рис. 3), то стає очевидною безперспективність створення універсальних напівемпіричних моделей турбулентності, придатних для опису різнотипних турбулентних течій. З цієї причини завдання полягає головним чином у встановленні меж застосовності тієї чи іншої напівемпіричної моделі турбулентності. Проте є деякі підстави сподіватися, що залучення багатопараметричних апроксимацій, що ґрунтуються на еволюційних рівняннях переносу для старших моментів пульсуючих у потоці термогідродинамічних параметрів, що пульсують у потоці, дасть змогу певною мірою просунутися на шляху побудови універсальних моделей турбулентності з ускладненими властивостями, що описують досить велику кількість різноманітних турбулізованих природних середовищ [9,31].

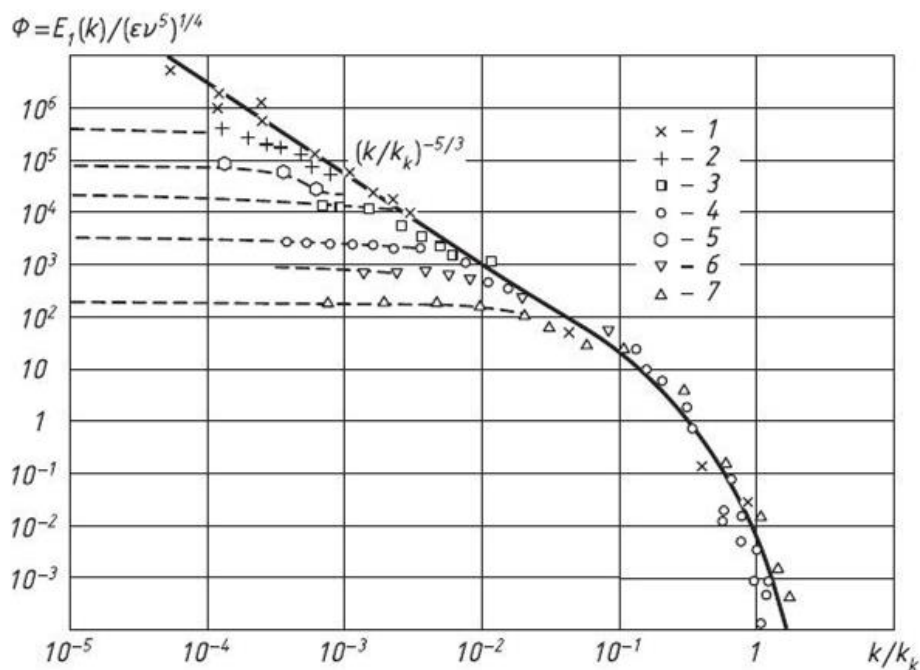


Рис. 3. Спектр поздовжньої складової турбулентних пульсацій для різних течій [31]:
1 – припливно-відпливний канал; 2 – крутий струмінь; 3 – течія в трубі; 4 – течія з постійним зсувом;
5 – слід за циліндром; 6 – турбулентність за сіткою; 7 – прижезовий шар

Разом з тим, актуальна на сьогодні проблема моделювання структурованої турбулентності порушує питання про пошук й інших базових рівнянь, для яких є фізичні підстави розв'язання відповідної проблеми замикання. Можливість опису подібного роду турбулентності може бути основана, зокрема, на конструюванні кінетичних рівнянь типу Фоккера-Планка-Колмогорова, аналогічних тим, що використовуються в теорії фазових переходів другого роду [9]. Вважається, що такий шлях побудови теорії розвиненої турбулентності може бути ефективним.

Математична модель та методика розв'язування задачі. Опис механізму нестационарного відриву потоку та зародження турбулентного примежового шару є актуальним завданням для багатьох дослідників, так і багатьох практично важливих застосувань. Зокрема, різкі зміни аеродинамічних характеристик профілів крил та лопатевих систем різноманітних гідроагрегатних машин при малих змінах кута атаки та режимів роботи, а також динамічні навантаження на різноманітні конструкції під дією постійного і різко мінливого потоку, що набігає, є наслідком нестационарного обтікання та відриву потоку.

Вичерпної теорії виникнення турбулентності в різноманітних аеродинамічних течіях на сьогодні взагалі немає. Проте, як приведено вище, було запропоновано ряд сценаріїв розвитку турбулентних течій, основаних на процесах хаотизації руху. Цей підхід зародився в результаті досліджень модельних систем диференціальних рівнянь. Частково це підтверджується експериментальними дослідженнями гідродинамічних особливостей турбулентних течій в аеродинамічних трубах [14,15,19].

Для розв'язування задачі з розрахунку характеристик течії навколо наземного транспортного засобу обрано модель течії в'язкого стисливого газу, що описується осередненими за Рейнольдсом рівняннями Нав'є-Стокса. Розрахункова область навколо транспортного апарата є складною, тому доцільно використовувати багатоблоковий підхід та криволінійну систему координат. Система рівнянь Нав'є-Стокса осереднена за Рейнольдсом для довільної криволінійної системи координат запишеться

$$\frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{H}, \quad (11)$$

де $\hat{Q}$ – вектор невідомих змінних; $\hat{E}, \hat{F}, \hat{G}$ – вектори нев'язких потоків; $\hat{E}_v = \xi_x E_v + \xi_y F_v + \xi_z G_v$, $\hat{F}_v = \eta_x E_v + \eta_y F_v + \eta_z G_v$, $\hat{G}_v = \zeta_x E_v + \zeta_y F_v + \zeta_z G_v$ – вектори в'язких потоків; $\hat{H} = 1/j H$ – вектор джерельних членів.

Вектори $\hat{Q}, \hat{E}, \hat{F}, \hat{G}, E_v, F_v, G_v$ визначаються наступними співвідношеннями

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho \\ \rho u \\ \rho v \\ \rho w \\ E_t \end{bmatrix}, \quad \hat{E} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho U \\ \rho U u + \xi_x p \\ \rho U v + \xi_y p \\ \rho U w + \xi_z p \\ (E_t + p)U - \xi_t p \end{bmatrix}, \quad \hat{F} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho V \\ \rho u V + \eta_x p \\ \rho v V + \eta_y p \\ \rho w V + \eta_z p \\ (E_t + p)V - \eta_t p \end{bmatrix}, \quad \hat{G} = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} \rho W \\ \rho u W + \zeta_x p \\ \rho v W + \zeta_y p \\ \rho w W + \zeta_z p \\ (E_t + p)W - \zeta_t p \end{bmatrix}, \quad (12)$$

$$E_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xx} \\ \tau_{xy} \\ \tau_{xz} \\ u\tau_{xx} + v\tau_{xy} + w\tau_{xz} - q_x \end{bmatrix}, \quad F_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yy} \\ \tau_{yz} \\ u\tau_{xy} + v\tau_{yy} + w\tau_{yz} - q_y \end{bmatrix}, \quad G_v = \frac{1}{J} \begin{bmatrix} 0 \\ \tau_{xz} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zz} \\ u\tau_{xz} + v\tau_{yz} + w\tau_{zz} - q_z \end{bmatrix}, \quad (13)$$

де $\xi_x, \xi_y, \xi_z, \eta_x, \eta_y, \eta_z, \zeta_x, \zeta_y, \zeta_z$ – метричні коефіцієнти, $J = \partial(\xi, \eta, \zeta)/\partial(x, y, z)$ – якобіан перетворення координат, $\tau_{xx}, \tau_{yy}, \tau_{zz}, \tau_{xy}, \tau_{xz}, \tau_{yz}$ – компоненти тензора напружень та q_x, q_y, q_z – компоненти вектора теплових потоків. $E_t = \rho \left[e + \frac{1}{2}(u^2 + v^2 + w^2) \right]$.

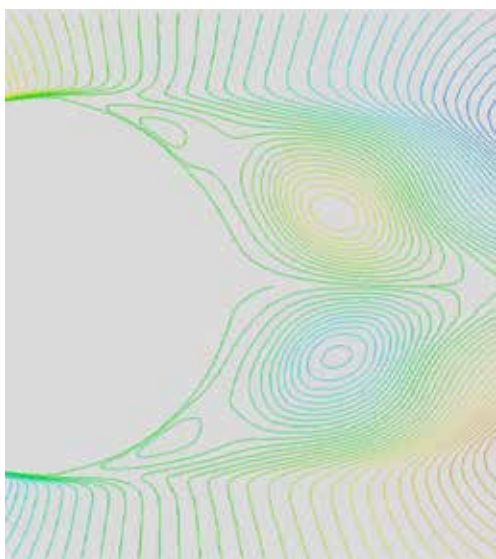
В системі рівнянь (11) n-компонентні вектори $\hat{Q}, \hat{E}_i, \hat{F}_i, \hat{G}_i, \hat{E}_v, \hat{F}_v, \hat{G}_v$ мають відповідний вигляд в залежності від моделі турбулентності.

Результати числового моделювання. Тривимірна задача обтікання циліндра дозвуковим потоком в'язкого газу є однією з базових задач для тестування будь-якої програмної реалізації задач зовнішньої аеродинаміки твердих тіл. Її числове розв'язування дозволяє аналізувати аеродинамічні характеристики та структуру течії. Для виконання цього завдання розроблено методики, алгоритми та програм з визначення

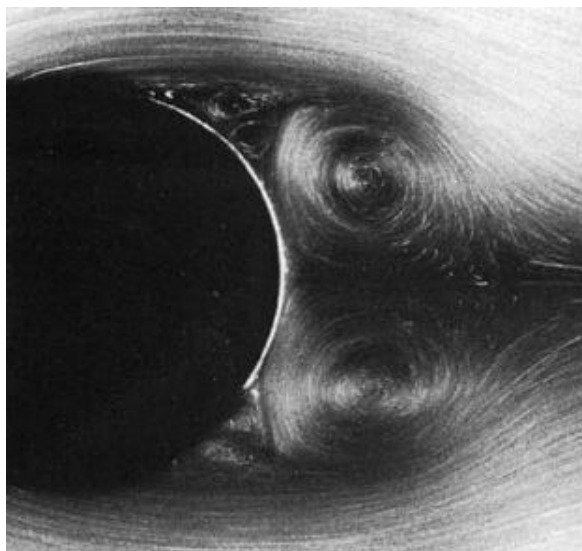
параметрів течії навколо елементів транспорту засобу на основі розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта – Аллмараса та $k-\omega$ Ментера (SST) [32,34].

Шляхом числового розв'язування осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є-Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта – Аллмараса [32] в реалізації відокремлених вихорів, розраховано обтікання колового циліндру. Отримані результати розрахунків порівнюються з експериментальними даними (рис. 4-6).

На рис. 4-5 показано течію за циліндром, одержану розрахунковим шляхом та в експерименті [33,34]. Після досягнення усталеного режиму за циліндром розвивається вихорова доріжка. Представлені результати розрахунку та фотографії поля течії з експерименту узгоджуються [33,34]. Видно, що наведеному матеріалі спостерігається подібність полів течії. Це говорить про відповідність математичної моделі фізичним процесам, що моделюються.

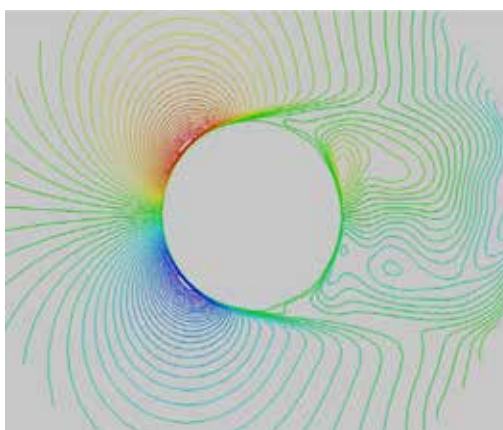


а)

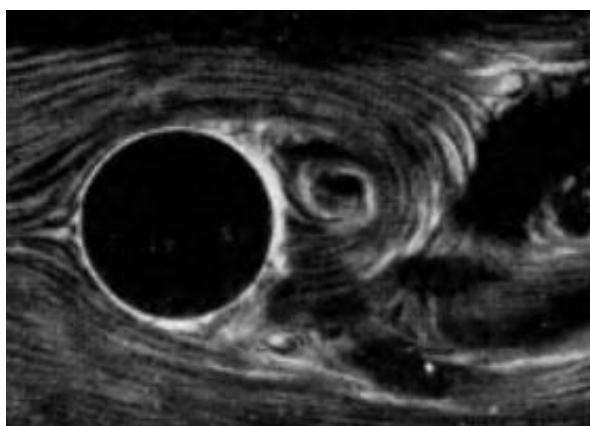


б)

Рис. 4. Течія за циліндром: а – розрахунок (ізолінії V), $Re=1700$; б – експеримент $Re=1700$ [33,34]



а)



б)

Рис. 5. Течія навколо циліндра зі сходом вихорової доріжки: а – розрахунок (ізолінії V), $Re=10000$; б – експеримент [33,34]

Результати розрахунків розподілу коефіцієнта тиску по поверхні циліндру, отриманого шляхом розв'язування осереднених за Рейнольдсом Нав'є-Стокса, замкнених моделлю турбулентності Спаларта – Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів, показано на рис. 6. Отримані результати розподілу коефіцієнта

тиску порівнюються з експериментальними даними [33]. Видно задовільне узгодження розрахованих та експериментальних даних.

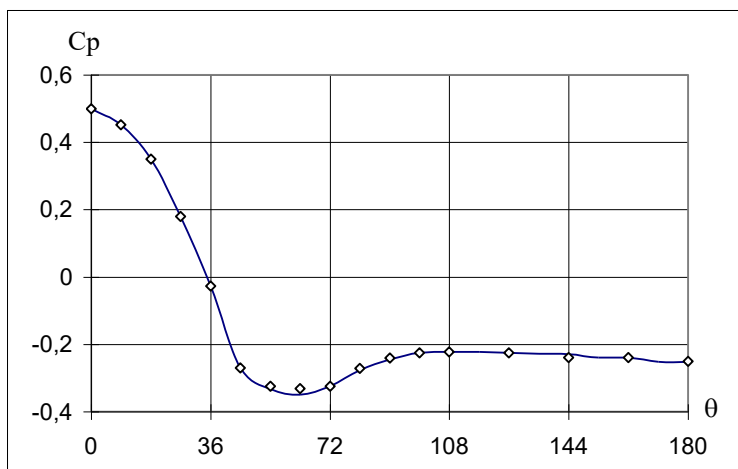


Рис. 6. Розподіл коефіцієнта тиску на поверхні циліндра для $Re=14000$ з використанням моделі турбулентності Спаларта – Аллмараса в реалізації відокремлених вихорів: — – розрахунок $Re=14500$; O – експеримент $Re=14500$ [33]

Висновки. На сьогодні для реальних аеродинамічних систем, що описуються нелінійними диференціальними рівняннями, та які повинні повністю відображати динаміку процесу з урахуванням складних нелінійних ефектів проблема математичного моделювання реальних течій залишається невирішеною. Турбулентний рух рідини настільки складний і підходи до його вивчення настільки різноманітні, що він не залишає шансів на системне і, головне, повне викладення. Теорія турбулентності і ще далека від свого завершення. Продовжують розроблятися нові підходи до її вивчення та розуміння механізму турбулентних процесів. Зростає кількість моделей, які пропонуються для кращого розуміння окремих її властивостей. Теорія турбулентності усе ще перебуває у стадії розробки й далека від свого завершення. Повний розрахунок турбулентного руху поки що неможливий.

На сьогодні числові методи є основним інструментом, що дають змогу продовжити дослідження і розвивати результати, одержувані з використанням якісної теорії нелінійних диференціальних рівнянь. Подальший розвиток електронно-обчислювальних машин, експериментальні дослідження в гідроаеродинаміці та перспективні розробки нових методів розв'язування рівнянь математичної фізики дозволять досягнути певних успіхів у числовому моделюванні реальних течій навколо транспортних апаратів та їх елементів.

Список використаних джерел:

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. Fluid mechanics. Oxford: Pergamon pres. 1987. 540 p.
2. Batchelor G. K. The theory of homogeneous turbulence. Cambridge: University Press. Cambridge. 1953. 198 p.
3. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical fluid mechanics: Mechanics of Turbulence. Volume 1. English edition edited by J.L. Lumley. Cambridge, Massachusetts: MIT press. 1975. 774 p.
4. Monin A.S., Yaglom A.M. Statistical fluid mechanics: Volume 2, English edition edited by J.L. Lumley. Cambridge, Massachusetts: M.I.T. Press. 1975. 896 p.
5. Bradshaw, P. An introduction to turbulence and its measurement. Oxford: Pergamon Press. 1971. 218 p.
6. Chapman G.T., Tobak M. Observations, theoretical deas, and modeling of turbulent flows – past, present and future / *Theoretical Approaches to Turbulence* (Dwoyer et al. (eds)). New York: Springer-Verlag, 1985. P.19–49.
7. Obukhov A. M. Some specific features of atmospheric turbulence. *J. Fluid Mech.* 1962. V. 13. Pt. 1. P. 77-81.
8. Klimontovich Yu. L. Turbulent motion and the structure of chaos. A new approach to the statistical theory of open systems. London: Publisher Springer. 1991. 398 p.
9. Kolesnichenko A. V., Marov M.Y. Turbulence and self-organization: modeling astrophysical objects. London: Edition Publisher: Springer. 2013. 685 p.
10. Kolesnichenko A. V., Marov M.Y. Mechanics of turbulence of multicomponent gases. Dordrecht: Kluwer Academic Publishersю. 2001. 375 p.
11. K. de F  riet J. Statistical mechanics and theoretical models of diffusion processes. *Advances in Geophysics*, Volume 6, 1959, P. 139-147

12. Belotserkovskii, O. M. Numerical experiment in turbulence: From order to chaos. *Int. J. Fluid Mech. Res.*, 23, No. 5-6, 1996. P. 321–488.
13. Hinze I.J. Turbulence: An introduction to its mechanism and theory. New York: McGraw-Hill book company. 1959. 586 p.
14. Batchelor G. K An introduction to fluid dynamics. Cambridge: Cambridge University Press. 1967. 615 p.
15. Van Dyke, M. An album of fluid motion. Stanford: Parabolic Press, CA, 1982. 176 p.
16. Belotserkovskii, O. M. Numerical modeling in continuum mechanics. M.: Nauka. 1991. 520 p.
17. Marsden J. E., McCracken M. The hopf bifurcation and Its applications. New York: Springer-Verlag. 1976. 284 p.
18. Marsden J. E., McCracken M. The hopf bifurcation and its applications. Berlin: Springer. V19, 1988. 408 p.
19. Frost W., Moulden T. Handbook of turbulence: Volume 1. Fundamentals and applications. New York: Publisher Plenum Press. 1977. 498 p.
20. Feigenbaum M. J. Universal behavior in nonlinear system. *Physica*. 1978. v.70. P. 16.
21. Фрік П. Г. Турбулентність: підходи та моделі. Х.: ІКД. 2003. 292с.
22. Клімонтович Ю. Л. Введення в фізику відкритих систем. Х.: Янус-К, 2002. 284 с.
23. Малинецький Г.Г. Математичні основи синергетики: Хаос, структури, обчислювальний експеримент. Х.: Книжковий дім Либроком, 2009. 312 с.
24. Колмогоров А. М. Локальная структура турбулентности в нестисливій рідині при дуже великих числах Рейнольдса. *Доповіди АН СРСР*. 1941. Т. 30. С. 299-303.
25. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. Kh., Travin A. K. An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow turbulence and combustion*. 2015. 95(4). P. 709-737.
26. Обухов А. М. Про розподілення енергії в спектрі турбулентного потоку. *Відом. АН СРСР. Сер. географія і геофізика*. 1941. Т. 5. № 4. С. 453-466.
27. Brown G. L., Roshko A. On density effects and large structures in turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech.* 1974. V. 64. P. 775-816.
28. Crow S. C., Champagne F. H. Orderly structures in jet turbulence. *J. Fluid Mech.* 1971. V. 48. P. 547-591.
29. Гледзер Е. Б., Должанский Ф. В., Обухов А. М. Системи гідродинамічного типу та їх застосування. М.: Наука, 1981. 368 с.
30. Тихонов А. Н., Арсенін В. Я. Методи розв'язування некоректних задач. Київ : Наукова думка. 1986. 182 с.
31. Chapman D.R. Computational aerodynamics development and outlook: Dryden Lecture in Research for 1979. 17th Aerospace Sciences Meeting, *AIAA Paper*. 1979-0129.
32. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA Paper*, 1992-0439.
33. Roshko A. On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. *NACA Tech. Note*. 1954. N3169. 29 p.
34. Menter F. R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA-Paper*, 1993-2906.
35. Prediction Methods for Turbulent Flows/ Edited by Wolfgang Kollmann. Washington, London. Publisher: McGraw-Hill Education, 1980. 468 p.

References:

1. Landau L.D., Lifshitz E.M. (1987) *Fluid mechanics*. Oxford. Pergamon press.
2. Batchelor G. K. (1953.) *The Theory of homogeneous turbulence*. Cambridge University Press.
3. Monin A.S., Yaglom A.M. (1975) *Statistical fluid mechanics: Mechanics of Turbulence. Volume 1*. English edition edited by J.L. Lumley. Cambridge, Massachusetts. MIT press.
4. Monin A.S., Yaglom A.M. (1975) *Statistical fluid mechanics: Mechanics of Turbulence. Volume 2*, English edition edited by J.L. Lumley. Cambridge, Massachusetts. M.I.T. Press.
5. Bradshaw, P. (1971) *An introduction to turbulence and its measurement*. Oxford: Pergamon Press.
6. Chapman G.T., Tobak M. (1985) Observations, theoretical deas, and modeling of turbulent flows – past, present and future. *Theoretical Approaches to Turbulence (Dwoyer et al. (eds))*. New York: Springer-Verlag, 19–49.
7. Obukhov A. M. (1962) Some specific features of atmospheric turbulence. *J. Fluid Mech.* V. 1 3. Pt. 1. 77-81.
8. Klimontovich Yu. L. (1991) *Turbulent motion and the structure of chaos. A new approach to the statistical theory of open systems*. London: Publisher Springer.
9. Kolesnichenko A. V., Marov M.Y. (2013) *Turbulence and self-organization: modeling astrophysical objects*. London: Edition Publisher: Springer.
10. Kolesnichenko A. V., Marov M.Y. (2001) *Mechanics of turbulence of multicomponent gases*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishersю.
11. K de Fériet J. (1959,) Statistical mechanics and theoretical models of diffusion processes. *Advances in Geophysics*. Volume 6. 139-147.

12. Belotserkovskii, O. M. (1996) Numerical experiment in turbulence: From order to chaos. *Int. J. Fluid Mech. Res.*, 23, No. 5-6. 321-488.
13. Hinze I.J. (1959) *Turbulense: An introduction to its mechanism and theory*. New York: McGraw-Hill book company.
14. Batchelor G. K. (1967) *An introduction to fluid dynamics*. Cambridge: University Press.
15. Van Dyke, M. (1982) *An album of fluid motion*. Stanford: Parabolic Press, CA.
16. Belotserkovskii, O. M. (1991) *Numerical modeling in continuum mechanics*. M.: Nauka.
17. Marsden J. E., McCracken M. (1976) *The hopf bifurcation and Its applications*. New York: Springer-Verlag.
18. Marsden J. E., McCracken M. (1988) *The hopf bifurcation and its applications*. Berlin: Springer. V19,
19. Frost W., Moulden T. (1977) *Handbook of turbulence: Volume 1 Fundamentals and applications*. Volume 1 New York: Publisher Plenum Press.
20. Feigenbaum M. J. (1978) Universal behavior in nonlinear system. *Physica*. v.70. 16.
21. Frik P. H. (2003) *Turbulentnist: pidkhody ta modeli [Turbulence: approaches and models]*. Kh.: IKD (in Ukr.).
22. Klimontovych Yu. L. (2002) *Vvedennia v fizyku vidkrytykh system [Introduction to the physics of open systems]*. Kh. : Yanus-K (in Ukr.).
23. Malynetskyi H.H. (2019) *Matematychni osnovy sinerhetyky: Khaos, struktury, obchysliuvalni eksperyment [Mathematical foundations of synergetics: Chaos, structures, computational experiment]*. K.: Knyzhkovyi dim Lybrom, (in Ukr.).
24. Kolmogorov A. M. (1941) Lokalnaia struktura turbulentnosti v nestyslyvii ridyni pry duzhe velykykh chyslakh Reynolds [Local structure of turbulence in incompressible fluid at very high Reynolds numbers]. *Dopovidi AN SRSR*. T.30. 299-303 (in Ukr.).
25. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. Kh., Travin A. K. (2015) An enhanced version of DES with rapid transition from RANS to LES in separated flows. *Flow, turbulence and combustion*, 95(4), 709-737.
26. Obukhov A. M. (1941) Pro rozpodilennia enerhii v spektri turbulentnoho potoku [On the distribution of energy in the turbulent flow spectrum]. *Vidom. AN SRSR. Ser. heohrafiia i heofizyka*. T. 5. N 4. 453-466 (in Ukr.).
27. Brown G. L., Roshko A. (1974) On density effects and large structures i n turbulent mixing layers. *J. Fluid Mech*. V. 64. 775-816.
28. Crow S. C., Champagne F. H. (1971) Orderly structures in jet turbulence. *J. Fluid Mech*. V. 48. 547-591.
29. Hledzer E. B., Dolzhanekyi F. V., Obukhov A. M. (1981) *Systemy hydrodynamychnoho typu ta yikh zastosuvannia [Hydrodynamic systems and their application]*. M.: Nauka (in Ukr.).
30. Tykhonov A. N., Arsenin V. Ya. (1986) *Metody rozviazuvannia nekorektnykh zadach [Methods of solving incorrect problems]*. Kyiv : Naukova dumka. (in Ukr.).
31. Chapman D.R. (1979) Computational aerodynamics development and utlook: Dryden Lecture in Research for 1979. 17th Aerospace Sciences Meeting, *AIAA Paper*. 1979-0129.
32. Spalart P. R., Allmaras S. R. (1992) A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, *AIAA Paper*, 1992-0439.
33. Roshko A. (1954) On the drag and shedding frequency of two-dimensional bluff bodies. *NACA Tech. Note*. N3169. 29.
34. Menter F. R. (1993) Zonal two-equation k- ω turbulence models for aerodynamic flows. *AIAA-Paper*, 1993-2906.
35. Kollmann W. (1980) *Prediction methods for turbulent flows*. Washington, London: Publisher: McGraw-Hill Education.

КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ

UDC 004.89

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.5>

Aloshyn S. P., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Computer and Information
Technologies and Systems
National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"
ORCID: 0009-0002-4239-4194

**INTELLIGENT VEHICLE CONDITION ANALYZER
BASED ON PARAMETER DYNAMICS TRENDS**

The article considers the problem of timely assessment of a vehicle's technical condition based on the analysis of informative wear indicators, enabling the prevention of critical failures without the need to visit a service center. Traditional approaches to technical diagnostics, which rely on mileage or scheduled maintenance intervals, are often insufficiently effective, as they do not reflect the actual condition of vehicle components and assemblies. Therefore, an intelligent approach based on an ensemble of artificial neural networks is proposed, allowing the determination of the wear degree of major vehicle systems by analyzing the dynamics of their operational parameters.

The purpose of this research is to develop a model that enables automated classification of a vehicle's technical condition based on a set of indicators signaling potential faults. To achieve this, a representative training dataset was formed using statistical data on typical wear symptoms (such as reduced acceleration dynamics, unstable engine starting, increased fuel consumption, engine knocking, etc.), enabling the timely detection of early failure signs and determination of optimal moments for maintenance. The developed model is based on the Kolmogorov–Arnold theorem and implemented as a pattern recognition task using supervised learning methods.

Experimental results confirm the high accuracy and practical applicability of the model. The proposed neural network architecture can be adapted to different classes of vehicles. Practical application of such an analyzer reduces maintenance costs, enhances operational safety, and ensures prompt response to emerging technical issues. The developed solution can be integrated into existing hardware and software systems for vehicle condition monitoring, providing convenience, accessibility, and reliability of the diagnostic process. The results of the study promote the broader adoption of artificial intelligence technologies in the field of vehicle technical diagnostics.

Key words: vehicle condition monitoring, intelligent diagnostics, neural networks, technical wear indicators, artificial intelligence, pattern recognition, Kolmogorov–Arnold theorem, supervised learning, input features.

Альошин С. П. Інтелектуальний аналізатор стану автомобіля за тенденціями динаміки його параметрів

У роботі розглядається проблема своєчасної оцінки технічного стану автомобіля на основі аналізу інформативних ознак зносу, що дозволяє попередити критичні відмови без необхідності звернення до сервісного центру. Традиційні підходи до технічної діагностики, що ґрунтуються на пробігу або регламентних інтервалах, є недостатньо ефективними, оскільки не враховують реальний стан вузлів і агрегатів. У зв'язку з цим запропоновано інтелектуальний підхід на основі ансамблю штучних нейронних мереж, що дозволяє визначати ступінь зносу основних систем автомобіля за динамікою параметрів його роботи.

Метою дослідження є розробка моделі, яка забезпечує автоматизовану класифікацію технічного стану транспортно-го засобу на основі сукупності ознак, що сигналізують про потенційні несправності. Для цього сформовано репрезентативну навчальну вибірку з використанням статистичних даних про типові симптоми зносу (зниження динаміки розгону, нестабільний запуск двигуна, зростання витрати пального, поява детонації тощо), що дозволяє своєчасно виявляти ознаки потенційних несправностей і визначати оптимальні моменти для технічного обслуговування. Розроблена модель базується на теоремі Колмогорова–Арнольда і реалізована як задача розпізнавання образів із використанням методів навчання з учителем.

Експериментальні результати підтверджують високу точність та практичну застосовність моделі. Запропоновану нейромережеву архітектуру можна адаптувати під різні класи транспортних засобів. Практичне застосування такого аналізатора дозволяє знизити витрати на обслуговування, підвищити безпеку експлуатації та своєчасно реагувати на технічні проблеми. Розроблене рішення може бути інтегроване в існуючі програмно-апаратні системи моніторингу стану автомобіля, забезпечуючи зручність, доступність та надійність діагностичного процесу. Резуль-

тати дослідження сприяють ширшому впровадженню технологій штучного інтелекту у сфері технічної діагностики автотранспорту.

Ключові слова: діагностика технічного стану, інтелектуальна діагностика, нейронні мережі, індикатори технічного зносу, штучний інтелект, розпізнавання образів, теорема Колмогорова–Арнольда, навчання з учителем, вхідні ознаки.

Formulation of the problem. The average mileage of a modern vehicle before reaching critical wear of its main components typically ranges from 200,000 to 300,000 km [1]. However, this indicator may vary significantly depending on the engine quality and operating conditions. Therefore, assessing the technical condition of an engine should rely not solely on the odometer readings, but rather on informative features of potential failures and statistical data from a representative precedent database of vehicles in the same class, enabling timely detection and prevention of possible malfunctions.

It is well known that the earlier the signs of potential failures are identified, the easier, cheaper, and faster the issue can be resolved. As practice shows [1,2], even minor engine damage often leads to a cascade of further faults, which can ultimately result in complete vehicle failure. Thus, it is crucial for a vehicle owner to determine the optimal moment for maintenance or repair based on reliable statistical indicators while minimizing the risks of Type I and Type II errors [3].

Analysis of recent research and publications. A comprehensive study on the vehicle maintenance was conducted by V. D. Myhal [3], in which the structure and key functions of intelligent transportation systems were also examined.

Gong C.A. et al. [4] performed an in-depth analysis of artificial intelligence algorithms – specifically supervised learning, unsupervised learning, and reinforcement learning – in the context of vehicle failure prediction. Their work emphasizes the identification of appropriate artificial intelligence architectures for various types of vehicle system faults and highlights the strengths of each learning paradigm in addressing diagnostic and predictive challenges.

Studies dedicated to vehicle condition diagnostics explore the implementation of neural network approaches, particularly deep neural networks (DNNs), convolutional neural networks (CNNs), recurrent neural networks (RNNs), and ensemble models. These works underline a paradigm shift from reactive to predictive maintenance, especially through the integration of neural methods with conventional diagnostic techniques.

Nikitin D.M. and Rybitskyi O.M. [5] discuss the use of automaton models for processing and analyzing vehicle diagnostic data.

The purpose of the article is to enable qualified and timely assessment of a vehicle's technical condition without requiring a visit to a service center or consultation with specialists. This can save time and financial resources by utilizing intelligent analysis of retrospective precedent data for vehicles of the corresponding class.

Given the capabilities of modern technical data analysis software and the availability of sufficient statistical data in databases, the stated problem is addressed through the synthesis of an ensemble of neural network models. These models are trained on a representative sample of examples and serve as an independent tool for recognizing the degree of wear and determining the optimal timing for preventive maintenance [6].

The main goal of this study is to develop an effective neural network model for identifying the technical condition of a vehicle and determining the optimal maintenance schedule while minimizing the risk of Type I and Type II errors [6].

Presenting main material. Mathematical Problem Statement and Solution Algorithm.

The task is to establish an analytical relationship (F) between the informative features of potential failures (X) and the degree of wear (technical condition) of the vehicle's main systems. This task can be interpreted as mapping the feature space to the space of condition classes [6]:

$$F: X \rightarrow Y_{\text{opt}}, X \subset \mathbb{R}^m, Y \subset \mathbb{R}, \quad (1)$$

where X is the vector of the vehicle input condition features;

S is the vehicle's technical condition (class).

The analytical form of function F is derived based on the Kolmogorov–Arnold representation theorem, which allows expressing a multivariable function as a superposition of univariate functions. This can be transformed into a neural network format according to the Hecht-Nielsen formula [6]:

$$y(x) = \alpha \sum_{i=1}^M v_i (w_{i1}x_1 + w_{i2}x_2 + \dots + w_{in}x_n + u_i), \quad (2)$$

where M is training sample size;

α, v are neural network parameters;

n is number of neurons;

$w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{in}$ are weight coefficients.

The task of identifying the weight coefficients is reduced to training the neural network (or an ensemble of models with various architectures and complexities) on a representative dataset. The goal is to achieve the required recognition accuracy within acceptable errors on both training and test sets. This can be formally described as:

$$\begin{aligned} \max A(S, X) \\ \text{at } \delta \leq \delta_0 \end{aligned} \quad (3)$$

where $A(S, X)$ – decision rule for recognizing class S in feature space X ;

S – set of technical condition levels to be recognized;

X – set of input features;

δ – training and testing error rate;

δ_0 – maximum allowable error.

Upon training completion, the network is capable of implementing an optimal pattern recognition algorithm according to hypothesis testing theory, accepting a feature vector of the examined object as input.

The input feature set X and the class alphabet S implement recognition rule [6]:

$$\begin{aligned} \omega_g \in \Omega_k, \text{ if } L(\omega, \{\omega_g\}) = \sup_i L(\omega, \{\omega_i\}) \\ L(\omega, \{\omega_g\}) \rightarrow \omega_g \in \Omega_k, \end{aligned} \quad (4)$$

where

$L(\omega, \{\omega_g\})$ – classification rule assigning an object with features X to a class in S ;

S – set of classes (vehicle condition states).

According to the Kolmogorov–Arnold theorem and the network training algorithm, there exists a set of parameters H, n, α, v_i, u_i such that the function F can be approximated by (2) over the entire domain with established small error. This allows the relationship between features and condition classes to be implemented using a three-layer neural network [6, 7].

Training Sample Formation

The informative features indicating the degree of vehicle wear are represented as a vector comprising the following characteristics [1,2]:

- reduced acceleration dynamics (by 25% compared to nominal),
- low oil pressure (indicated on the dashboard),
- increased engine oil consumption,
- unstable engine start and fluctuating RPM,
- low compression of the fuel-air mixture,
- uneven idling,
- increased fuel consumption,
- increased engine knock during operation,
- engine overheating.

Vehicle condition is classified into two example classes:

0 – acceptable condition,

1 – critical condition.

The feature values may be quantitative or nominal (symbolic). A fragment of the training sample is shown in

Fig. 1.

1 Var1	2 Var2	3 Var3	4 Var4	5 Var5	6 Var6	7 Var7	8 Var8	9 Var9	10 Var10
1	0	1	1	1	0	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0	1	0	0	0
0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
1	1	0	1	1	1	1	1	0	1
0	1	0	1	1	1	1	1	1	1

Fig. 1. Fragment of the training sample for the neural network

Network Architecture Configuration and Training

Initial settings for training modes, architectures, and learning methods are selected based on the chosen data analysis software. Weight coefficient optimization is performed via combination search using the backpropagation algorithm with various modifications [6–7]:

$$w_{hq}^{(n)}(t) = w_q(t-1) + \Delta w_{hq}^{(n)}(t), \quad (5)$$

$$w_q(t-1) = w_q(t) + \alpha \cdot \frac{\partial E(k)}{\partial w_q(t)}$$

where w – set of weight coefficients at layer n ;
 n – layer number;
 q – neuron number in the n -th layer;
 h – input number of the neuron in the n -th layer.

The synthesis of an ensemble of models with varying complexity and architecture, trained on a representative sample, made it possible to achieve satisfactory modeling accuracy. Training graphs for models with various architectures and weight adjustment methods are presented in Fig.2.

Experimental studies demonstrated stable convergence of the training process to minimum error values for each vehicle condition class. The achieved levels of performance and accuracy are acceptable for practical implementation, validating the modeling results and justifying their application in real vehicle condition diagnostics.

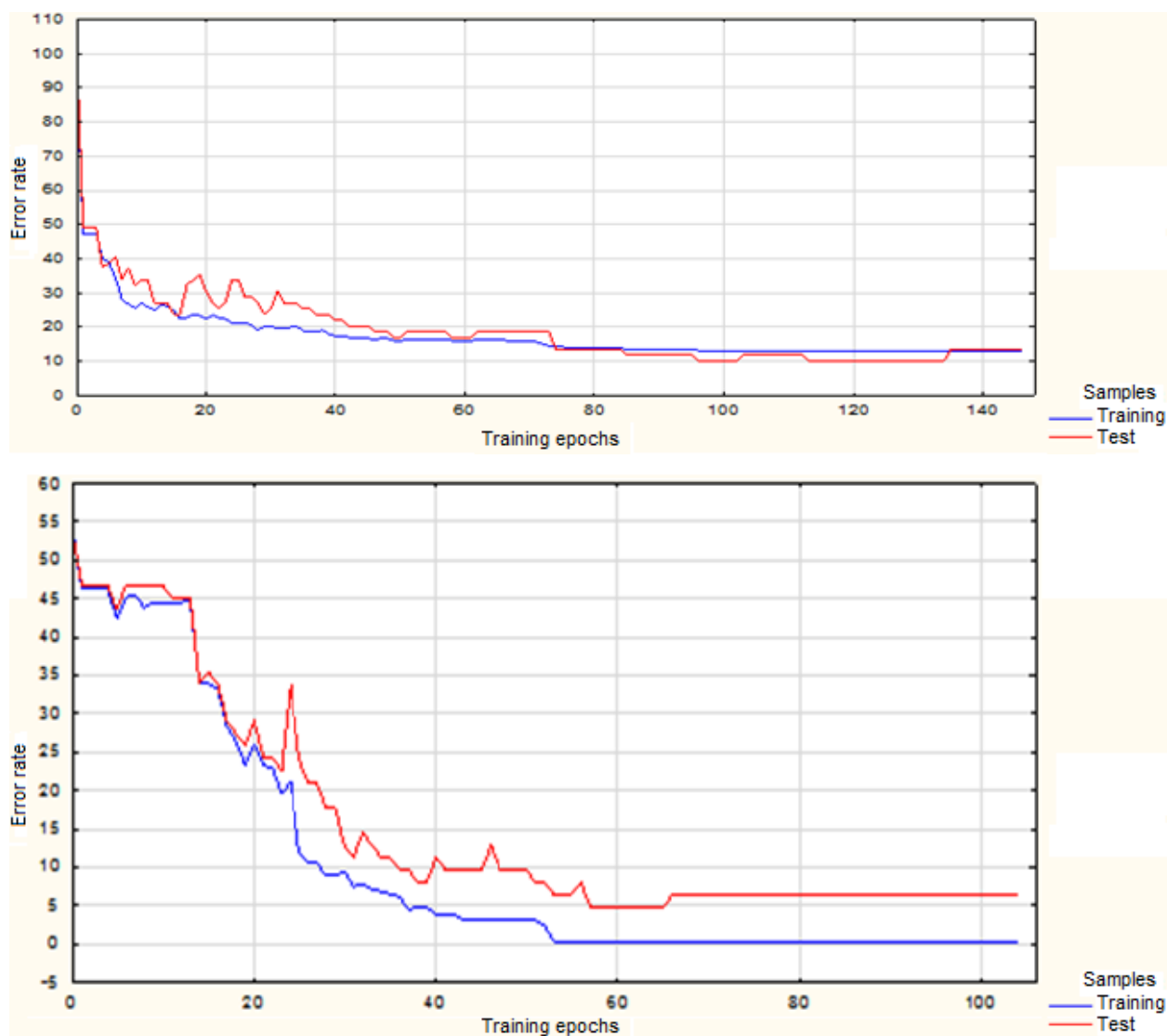


Fig. 2. Training curves of neural network models with different weight update methods, architectures, and complexity levels

Modeling confirmed the stable convergence of the iterative training process to minimum error on both training and test datasets. The performance of the synthesized models is sufficient for practical use. The task was implemented using a standard data analysis software package.

Conclusions. For the timely identification of a vehicle's technical condition, it is essential to establish a functional correlation between the state of the vehicle and its relevant input indicators. This objective was accomplished through the use of supervised learning techniques within neural networks, framed as a pattern recognition problem.

The outcomes of the study hold substantial practical value, as they contribute to the development of high-performance models for evaluating the technical state of a vehicle and supporting well-informed, prompt maintenance decisions. These decisions are made with due consideration of safety, operational reliability, diagnostic efficiency, and economic feasibility.

Functionally, the developed neural network models can be integrated as standalone components within existing technical data analysis systems.

The proposed diagnostic methodology, implemented via conventional data analysis platforms, enhances the applicability of artificial intelligence technologies in the automotive sector, broadens user accessibility, and offers a resource-efficient approach for monitoring vehicle health.

Bibliography:

1. Кукурудзяк, Ю. Ю. Технічна експлуатація автомобілів. Технологія обслуговування: електронний навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ. 2023. 227 с.
2. Лудченко, О. А. Технічна експлуатація і обслуговування автомобілів: технологія: підручник. К. : Вища школа. 2007. 527 с.
3. Мигаль, В. Д. Інтелектуальні системи в технічній експлуатації автомобілів: монографія. Х.: Майдан. 2018. 262 с.
4. Gong, C. A., Su, C. S., Chen, Y. H., Guu, D. Y. How to Implement Automotive Fault Diagnosis Using Artificial Intelligence Scheme. *Micromachines (Basel)*. 2022. 13(9). 1380. DOI:10.3390/mi13091380
5. Нікітін, Д., Рибіцький, О. Інтелектуальні автоматні системи для обробки та аналізу діагностичних даних автомобіля. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. 2025. № 58. С. 143–151. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-17>.
6. Haykin, S. *Neural Networks and Learning Machines*. Prentice Hall, 2009. 906 p.
7. Тільняк, Ю. Я., Корнага, Я. І. Діагностика технічного стану автомобілів із використанням нейронної мережі. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки*. 2018. Том 29 (68). Ч. 2. № 1. С. 29-34.
8. Барановський, В. М., Спірін, А. В., Полевода, Ю. А., Твердохліб, І. В. Роль і місце технічного діагностування в системі технічної експлуатації автомобілів в сільському господарстві. *Техніка, енергетика, транспорт АПК*. 2018. Випуск 1 (100). С. 24–28.
9. Бажинов, О. В., Заверуха, Р. Р., Бажинова, Т. О. Інформаційна комплексна система діагностики гібридних і електромобілів. *Інженерія природокористування*. 2020. № 2 (16). С. 12–18.
10. Молодан, А. О., Дубінін, Є. О., Потапов, М. М., Тарасов, Ю. В., Полтавський, М. В. Розробка та застосування технології нейронних мереж для діагностики технічного стану автотракторних двигунів. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія Автомобіле- та тракторобудування*. 2021. № 1. С. 67–79. DOI: 10.20998/2078-6840.2021.1.08.
11. Liu, Y., Cui, D., Peng, W. Vehicle state and parameter estimation based on adaptive robust unscented particle filter. *Journal of Vibroengineering*. 2022. Vol. 25, No. 2. Pp. 392–408. URL: <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22788>.
12. Volodarets, M. et al. Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2i Information Complex using Simulation Modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2020. 5/3 (107). Pp. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.215006.
13. Mun, S. et al. Ensemble learning for Fault Condition Prediction and Health Status Monitoring in Military Ground Vehicles. *Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo 2023*. Abstract ID: 1479. 2023. 6 p. URL: https://www.hpc.msstate.edu/publications/docs/2023/05/16933IISE_2023_v7.pdf.
14. Wang, J., Li, Q., Ma, Q. Research on Active Avoidance Control of Intelligent Vehicles Based on Layered Control Method. *World Electric Vehicle Journal*. 2025. 16(4). 211. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj16040211>.

References:

1. Kukurdiak, Yu. Yu. (2023). *Tekhnichna ekspluatatsiia avtomobiliv. Tekhnolohiia obsluhovuvannia: elektronnyi navchalnyi posibnyk*. Vinnytsia: VNTU. 227 s.
2. Ludchenko, O. A. (2007). *Tekhnichna ekspluatatsiia i obsluhovuvannia avtomobiliv: tekhnolohiia: pidruchnyk*. Kyiv: Vyshcha shkola. 527 s.
3. Myhal, V. D. (2018). *Intelektualni systemy v tekhnichnii ekspluatatsii avtomobiliv: monohrafiia*. Kharkiv: Maidan. 262 s.
4. Gong, C. A., Su, C. S., Chen, Y. H., Guu, D. Y. (2022). How to Implement Automotive Fault Diagnosis Using Artificial Intelligence Scheme. *Micromachines (Basel)*. 2022;13(9):1380. DOI: 10.3390/mi13091380.
5. Nikitin, D., Rybitskyi, O. (2025). Intelligent automated systems for processing and analysis of vehicle diagnostic data. *Computer-Integrated Technologies: Education, Science, Production*. No 58, 143-151. URL: <https://doi.org/10.36910/6775-2524-0560-2025-58-17>.
6. Haykin, S. (2009). *Neural Networks and Learning Machines*. Prentice Hall, 2009. 906 p.

-
7. Tilniak, Yu. Ia., Kornaha, Ya. I. (2018). Diahnostyka tekhnichnoho stanu avtomobiliv iz vykorystanniam neironnoi merezhi. *Vcheni zapysky TNU imeni V.I. Vernadskoho. Serii: Tekhnichni nauky*. Tom 29 (68). Ch. 2. № 1. S. 29–34.
 8. Baranovskyi, V. M., Spirin, A. V., Polevoda, Yu. A., Tverdokhlib, I. V. (2018). Rol i mistse tekhnichnoho diahnostuvannia v systemi tekhnichnoi ekspluatatsii avtomobiliv v silskomu hospodarstvi. *Tekhnika, enerhetyka, transport APK*. Vinnytsia. Vypusk 1 (100). 2018.C. 24-28.
 9. Bazhinov, O. V., Zaverukha, R. R., Bazhinova, T. O. Informatsiina kompleksna systema diahnostyky hibrydnykh i elektromobiliv. *Inzheneriia pryrodokorystuvannia*. № 2 (16). 2020. C. 12-18.
 10. Molodan, A. O., Dubinin, Ye. O., Potapov, M. M., Tarasov, Yu. V., Poltavskyi, M. V. (2021). Rozrobka ta zastosuvannia tekhnolohii neironnykh merezh dlia diahnostyky tekhnichnoho stanu avtotraktornykh dvyhuniv. *Visnyk NTU «KhPI». Serii Avtomobile- ta traktorobuduvannia*. № 1. 2021. C. 67-79. DOI: 10.20998/2078-6840.2021.1.08.
 11. Liu, Y., Cui, D., Peng, W. (2022). Vehicle state and parameter estimation based on adaptive robust unscented particle filter. *Journal of Vibroengineering*. Vol. 25, No. 2. 2022. Pp. 392–408. URL: <https://doi.org/10.21595/jve.2022.22788>.
 12. Volodarets, M. et al. (2020). Development of the Analytical System for Vehicle Operating Conditions Management in the V2i Information Complex using Simulation Modeling. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 5/3 (107). 2020. Pp. 6–16. DOI: 10.15587/1729-4061.2020.215006.
 13. Mun, S., Hwang, J., Bian, L., Falls, T. C., Bond, W. G. (2023). Ensemble learning for Fault Condition Prediction and Health Status Monitoring in Military Ground Vehicles. *Proceedings of the IISE Annual Conference & Expo 2023*. Eds: Babski-Reeves K., Eksioglu B., Hampton D. Abstract ID: 1479. 2023. 6 p. URL: https://www.hpc.msstate.edu/publications/docs/2023/05/16933IISE_2023_v7.pdf.
 14. Wang, J., Li, Q., Ma, Q. (2025). Research on Active Avoidance Control of Intelligent Vehicles Based on Layered Control Method. *World Electric Vehicle Journal*. 16(4). 211. URL: <https://doi.org/10.3390/wevj16040211>.

Безверхий О. І., доктор фізико-математичних наук, професор,
професор кафедри інформаційних систем і технологій
Національного транспортного університету,
ORCID: 0000-0002-0834-6335

Луц В. Є., аспірант кафедри інформаційних систем і технологій
Національного транспортного університету,
ORCID: 0009-0001-2948-6935

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ API ДЛЯ РОЗПІЗНАВАННЯ МОВЛЕННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ PYTHON

З розвитком комп'ютерних систем стає все більш очевидним, що використання систем розпізнавання мови набагато розшириться, якщо стане можливим використання людської мови при роботі безпосередньо з комп'ютером, і зокрема стане можливим управління машиною звичайним голосом в реальному часі, а також введення і виведення інформації у вигляді звичайної людської мови. Голосовий інтерфейс є необхідним компонентом, коли мова йде про створення комфортних умов життя. Такі системи входять в повсякденний побут, крім того, можливо їх застосування і на виробництві в складі комплексів управління виконавчими механізмами. При створенні системи голосового розпізнавання команд розробник стикається з певними проблемами: відсутність математичної моделі семантики мовного сигналу; що виражається в тому, що для визначення семантики мовного сигналу індивідуальні характеристики мовця: специфіка вимови, акценти, наголоси тощо; робота із спонтанною мовою та необхідність виділення наявності ключового слова; відмінності в акустичній обстановці, шуми, тощо. Параметризація аналогового сигналу мови є першим кроком в процесі розпізнавання мови. Алгоритми призначені для виконання параметричного представлення мовного сигналу: параметри, що описують поведінку людської слухової системи. Природно, ці алгоритми спеціально розроблені для збільшення продуктивності системи розпізнавання мови. Переважні параметри, які є списками спектральних енергій звуку, а не деталями голосу певного диктора У статті розглядається порівняння провідних API розпізнавання мовлення шляхом вивчення їхніх функцій, варіантів використання та показників продуктивності. Аналіз має на меті надати розробникам повне розуміння цих технологій, підкреслюючи їхні переваги та обмеження. Python використовувався для тестування цих API із мікрофонним введенням, пропонуючи розуміння їхньої затримки, точності та практичних застосувань. Це дослідження слугує посібником для вибору найкращого API для конкретних вимог проекту з візуальним представленням результатів для ясності.

Ключові слова: розпізнавання мовлення, API, Speech-to-Text, Speech Service, мовні моделі.

Bezverkhyy O. I., Luts V. E. Python speech recognition API comparison

With the development of computer systems, it is becoming increasingly clear that the use of speech recognition systems will expand greatly if it becomes possible to use human speech when working directly with a computer, and in particular, it will become possible to control a machine with a normal voice in real time, as well as to input and output information in the form of normal human speech. The voice interface is an essential component when it comes to creating a comfortable living environment. Such systems are part of everyday life, and they can also be used in production as part of actuator control systems. When creating a voice command recognition system, the developer faces certain problems: the lack of a mathematical model of speech signal semantics; the fact that individual characteristics of the speaker: specific pronunciation, accents, accents, etc. are required to determine the semantics of the speech signal; working with spontaneous speech and the need to highlight the presence of a keyword; differences in the acoustic environment, noise, etc. Parameterization of the analog speech signal is the first step in the speech recognition process. Algorithms are designed to perform a parametric representation of the speech signal: parameters that describe the behavior of the human auditory system. Naturally, these algorithms are specifically designed to increase the performance of the speech recognition system. Preferred parameters that are lists of spectral energies of sound rather than details of a particular speaker's voice This article compares the leading speech recognition APIs by examining their features, use cases, and performance metrics. The analysis aims to provide developers with a complete understanding of these technologies, emphasizing their advantages and limitations. Python was used to test these APIs with microphone input, offering insight into their latency, accuracy, and practical applications. This study serves as a guide to selecting the best API for specific project requirements, with a visual representation of the results for clarity.

Key words: speech recognition, API, Speech-to-Text, Speech Service, language models.

Постановка проблеми. Технологія розпізнавання мовлення стала наріжним каменем у сучасних програмах та інформаційних технологіях[1], уможливорюючи роботу без рук, віртуальних помічників та

інструменти доступності. Аналізуючи роботи [2-5] про розпізнавання мовлення було прийнято рішення розглянути п'ять відомих API: Google Speech-to-Text, IBM Watson Speech to Text, AssemblyAI, Microsoft Azure Speech Service і Amazon Transcribe. Аналіз висвітлює їхні функції, уподобання користувача, процеси та результати розпізнавання за лічені секунди, перевірені за допомогою Python і введення з мікрофона.

Розпізнавання мовлення – це динамічна сфера, яка з'єднує людське спілкування з технологіями. API, які тут обговорюються, мають різні сильні та слабкі сторони, обслуговуючи різні випадки використання, наприклад служби транскрипції, інтерактивні системи та рішення корпоративного рівня. Тестуючи, ми прагнемо визначити найефективнішу та найточнішу службу для реальних програм. Крім того, стаття містить уявлення про затримку, точність і практичну реалізацію, допомагаючи розробникам приймати зважені рішення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз провідних API розпізнавання мовлення. Сучасні технології розпізнавання мовлення стрімко розвиваються завдяки застосуванню штучного інтелекту та алгоритмів машинного навчання. Однією з ключових складових цих технологій є API (Application Programming Interface) – набір інструментів та протоколів, що дозволяють інтегрувати готові рішення розпізнавання мовлення у різноманітні додатки. Використання таких API дозволяє швидко і ефективно перетворювати аудіозаписи в текст за допомогою передових алгоритмів машинного навчання, без необхідності розробляти власні моделі з нуля. Використання API забезпечує високу точність, масштабованість та додаткові функції (наприклад, автоматичну пунктуацію, мітки часу та аналіз настроїв), що є критично важливими для сучасних додатків у бізнесі, освіті, підтримці клієнтів та інших сферах.

У статті розглядаються п'ять провідних сервісів Speech-to-Text: API Google, IBM Watson, AssemblyAI, Microsoft Azure, Amazon Transcribe.

API Google (Google Speech-to-Text)[6] пропонує високу точність, багатомовну підтримку та повну інтеграцію з іншими службами Google. Він підтримує обробку в реальному часі та пакетну обробку, що робить його універсальним для різних програм. Крім того, він має автоматичну пунктуацію, що покращує читабельність транскрипцій. API Google особливо підходить для програм, які вимагають швидкості та масштабованості, наприклад, віртуальних помічників і інструментів транскрипції. Також його широко застосовують у службах підтримки клієнтів, автоматизованих системах управління дзвінками та освітніх платформах.

IBM Watson[7] надає надійні параметри налаштування, включаючи мовні моделі для конкретного домену. Він відомий своїм наголосом на безпеці та відповідності, задовольняючи потреби корпоративного рівня. API підтримує щоденник мовця та мітки часу на рівні слів, додаючи значення для детального аналізу. IBM Watson широко використовується в таких галузях, як охорона здоров'я та юридичні послуги, де точність і відповідність є критично важливими. Також його застосовують у фінансовій сфері та службах комп'ютерного мовлення для обробки дзвінків і документів.

AssemblyAI[8] – це сучасний API, що зосереджується на простоті та ефективності. Він широко відомий завдяки конкурентоспроможній ціні, простоті використання та можливостям транскрипції в реальному часі. Незважаючи на свою простоту, він містить такі розширені функції, як аналіз настроїв, виявлення тем і розпізнавання об'єктів. Спрощений підхід AssemblyAI робить його чудовим вибором для стартапів і невеликих проектів, які потребують швидкого налаштування та економічно ефективних рішень. AssemblyAI також активно використовується в журналістиці та медіа-сфері для автоматичного створення субтитрів і аналізу аудіоконтенту.

Microsoft Azure[9] пропонує повний набір мовленнєвих послуг, включаючи транскрипцію, переклад і розпізнавання мовця в реальному часі. Він підтримує кілька мов і діалектів, забезпечуючи чудову гнучкість для глобальних програм. Інтеграція API з екосистемою Azure робить його потужним інструментом для підприємств. API активно застосовується у великих компаніях для автоматизації комунікацій, управління контактними центрами та обробки голосових команд у корпоративних рішеннях.

Amazon Transcribe[10] чудово працює з великими обсягами аудіоданих, надаючи такі функції, як спеціальний словник і маркування мовців. Він створений для масштабованості, що робить його ідеальним для підприємств із великими потребами в транскрипції. Його повна інтеграція з іншими службами AWS забезпечує ефективні робочі процеси та аналітику. Amazon Transcribe активно застосовується у сфері маркетингу, автоматизації аналізу телефонних дзвінків і створення аналітичних звітів.

Постановка завдання. Мета статті: Провести порівняльний аналіз провідних API розпізнавання мовлення шляхом вивчення їхніх функцій, варіантів використання та показників продуктивності. Аналіз має на меті надати розробникам повне розуміння цих технологій, підкреслюючи їхні переваги та обмеження.

Виклад основного матеріалу. Кожен API було протестовано за допомогою Python за допомогою таких кроків:

1) Google, IBM, Microsoft і Amazon вимагають ключів API та облікових записів служб, включаючи налаштування проектів на відповідних платформах розробників.

2) AssemblyAI забезпечує просту систему автентифікації на основі маркерів, що значно скорочує час налаштування. Цей крок забезпечує безпечний доступ до API і запобігає несанкціонованому використанню.

Введення з мікрофона було записано за допомогою бібліотеки розпізнавання речей Python, яка спрощує збір аудіо для обробки мовлення. Аудіо було збережено у форматі WAV для сумісності з усіма п'ятьма API:

```
import speech_recognition as sr
recognizer = sr.Recognizer()
with sr.Microphone() as source:
print("Please speak a word:")
audio = recognizer.listen(source)
audio_data = audio.get_wav_data()
```

Захоплене аудіо було оброблено кожним API за допомогою відповідних Python SDK або HTTP-запитів. Наприклад, Microsoft Azure Speech SDK надає клас SpeechRecognizer, який спрощує транскрипцію.

Бібліотека часу Python використовувалася для вимірювання часу обробки для кожного API, надаючи інформацію про їх затримку. Цей показник є критичним для таких програм, як субтитри в реальному часі та віртуальні помічники:

```
import time
start_time = time.time()
# API call here
end_time = time.time()
processing_time = end_time - start_time
print(f"Processing time: {processing_time} seconds")
```

API порівнювали в кількох вимірах, щоб підкреслити їхні унікальні переваги та обмеження (див. Табл. 1):

Таблиця 1

Характеристики API

Характеристика	Google Speech-to-Text	IBM Watson Speech to Text	AssemblyAI	Microsoft Azure Speech Service	Amazon Transcribe
Точність	Висока	Від середньої до високої	Висока	Висока	Від середньої до високої
Затримка	Низька	Помірна	Низька	Низька	Помірна
Вартість	Оплата за використання	Багаторівневе ціноутворення	Доступні тарифи	Оплата за використання	Багаторівневе ціноутворення
Підтримка мов	Понад 120 мов	Понад 30 мов	Понад 30 мов	Понад 90 мов	Понад 50 мов
Налаштування	Помірні	Розширені	Обмежені	Розширені	Помірні
Зручність використання	Помірна	Складна	Проста	Помірна	Помірна
Додаткові функції	Базові	Розширені	Помірні	Розширені	Базові

Випадки використання та застосування. Google Speech-to-Text ідеально підходить для великих програм, таких як голосовий пошук, транскрипція в реальному часі та боти обслуговування клієнтів. Його багатомовна підтримка робить його придатним для глобальних програм.

IBM Watson зазвичай використовується в охороні здоров'я, юридичному та фінансовому секторах через наголос на відповідності та безпеці даних. Щоденник доповідача особливо корисний для транскрипції та аналізу нарад.

AssemblyAI популярний серед стартапів завдяки своїй економічності та простоті використання. Програми включають транскрипцію подкастів, субтитри до відео та аналіз настроїв.

Microsoft Azure найкраще підходить для корпоративних середовищ, які потребують інтеграції зі службами Azure. Часто використовується в багатомовній підтримці клієнтів і аналітиці.

Amazon Transcribe добре підходить для транскрипції в медіа, кол-центрах і взаємодії з клієнтами. Його масштабованість робить його ідеальним для підприємств, які працюють з великими наборами даних.

Для порівняння роботи API було створено програму, яка дозволяла порівняти час та точність розпізнавання мовлення. У програмі застосовано як синхронне, так і асинхронне розпізнавання мовлення. Синхронний метод забезпечує миттєвий зворотній зв'язок для коротких аудіозаписів, тоді як асинхронне розпізнавання дозволяє ефективно обробляти великі аудіофайли за допомогою періодичного опитування статусу транскрипції. Після отримання текстових даних з кожного API, програма аналізує результати, порівнюючи кількість слів у транскрипціях за допомогою побудови графіка. Це дозволяє не лише перевірити ефективність кожного сервісу, а й оцінити обсяг отриманих даних для подальшого аналізу.

Нижче наведено загальний код, що демонструє інтеграцію з вищезазначеними Speech-to-Text API, отримання транскрипцій та побудову графічного представлення результатів.

```

import time import json import requests import matplotlib.pyplot as plt
def transcribe_google(audio_file_path):
    from google.cloud import speech
    client = speech.SpeechClient()
    with open(audio_file_path, "rb") as audio_file: content = audio_file.read()
    audio = speech.RecognitionAudio(content=content)
    config=speech.RecognitionConfig(encoding=speech.RecognitionConfig.AudioEncoding.
LINEAR16, language_code="uk-UA" )
    response = client.recognize(config=config, audio=audio)
    transcript=" ".join([result.alternatives[0].transcript for result in response.
results]) return transcript
def transcribe_ibm(audio_file_path):
    from ibm_watson import SpeechToTextV1
    from ibm_cloud_sdk_core.authenticators import IAMAuthenticator
    authenticator = IAMAuthenticator('your_ibm_api_key')
    stt = SpeechToTextV1(authenticator=authenticator)
    stt.set_service_url('your_ibm_service_url')
    with open(audio_file_path, "rb") as audio_file:
        response = stt.recognize(audio=audio_file, content_type="audio/wav")
        result = response.get_result()
        transcript = " ".join([res['alternatives'][0]['transcript'] for res in result.
get('results', [])]) return transcript
def transcribe_assemblyai(audio_url):
    API_KEY = "assemblyai_api_key" headers = {"authorization": API_KEY}
    data = {"audio_url": audio_url}
    response = requests.post("https://api.assemblyai.com/v2/transcript", json=data,
headers=headers)
    transcript_id = response.json().get('id')
    while True: polling_response=requests.get(f"api_url,{transcript_id}",
headers=headers)
    status = polling_response.json().get("status")
    if status == "completed": break
    elif status == "error": return ""
    time.sleep(5)
    transcript = polling_response.json().get("text", "") return transcript
def transcribe_azure(audio_file_path):
    import azure.cognitiveservices.speech as speechsdk speech_key = "your_azure_
speech_key" service_region = "your_azure_region" speech_config = speechsdk.SpeechConf
ig(subscription=speech_key, region=service_region) audio_config =speechsdk.
AudioConfig(filename=audio_file_path)speech_recognizer=speechsdk.SpeechRecognizer(speech_
config=speech_config, audio_config=audio_config) result = speech_recognizer.recognize_
once() return result.textdef transcribe_amazon(audio_file_uri):
    import boto3
    transcribe = boto3.client('transcribe', region_name='your_aws_region', aws_
access_key_id='your_aws_access_key',aws_secret_access_key='your_aws_secret_key')
    job_name = "transcription_job_" + str(int(time.time())) transcribe.start_
transcription_job(TranscriptionJobName=job_name,
Media={'MediaFileUri': audio_file_uri}, MediaFormat='wav',
LanguageCode='en-US' )
    while True:
        status=transcribe.get_transcription_job(TranscriptionJobName=job_name)
        job_status = status['TranscriptionJob']['TranscriptionJobStatus']
        if job_status in ['COMPLETED', 'FAILED']: break
        time.sleep(5)
        if job_status == "COMPLETED": transcript_url = status['TranscriptionJob']
['Transcript']['TranscriptFileUri']
        transcript_response = requests.get(transcript_url)
        transcript=transcript_response.json().get("results", {}).get("transcripts", [{}])
[0].get("transcript", "") return transcript return ""

```

Результати. API було протестовано з десятима різними словами, промовленими в мікрофон у контрольованих умовах. У таблиці (див. Табл. 2) нижче наведено середній час розпізнавання та рівень точності:

Таблиця 2

Результати часу та точності

API	Average Time (s)	Accuracy (%)
Google	1.2	96
IBM Watson	1.7	90
AssemblyAI	1.1	93
Microsoft Azure	1.3	94
Amazon Transcribe	1.5	91

Графічна візуалізація. Щоб краще зрозуміти різницю в продуктивності, дані було візуалізовано за допомогою гістограм і лінійних графіків. Ці діаграми ілюструють компроміс між швидкістю та точністю між API:

Гістограма (див. Рис. 1) показує середній час розпізнавання для кожного API.

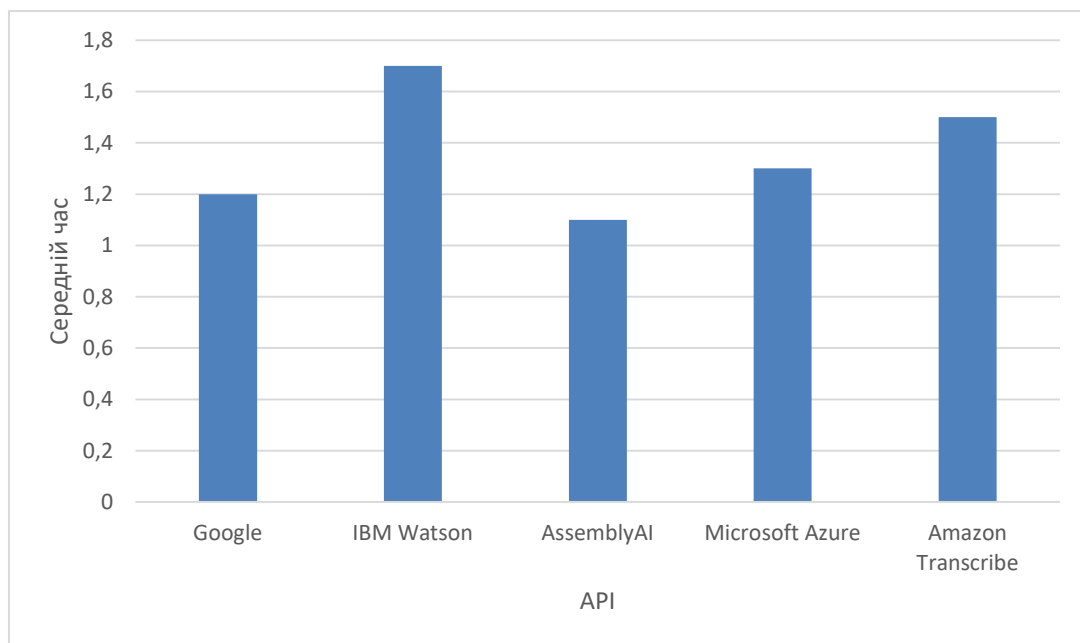


Рис. 1. Гістограма середнього часу

Лінійний графік (див. Рис. 2) висвітлює тенденції точності на основі тестових слів.

Висновки. Кожен API має унікальні сильні сторони. Google Speech-to-Text відрізняється точністю та швидкістю, що робить його ідеальним для додатків у реальному часі, таких як голосові помічники. Функції налаштування IBM Watson і безпека корпоративного рівня роблять його придатним для спеціалізованих областей, зокрема охорони здоров'я та фінансів. Microsoft Azure Speech Service пропонує відмінну інтеграцію з екосистемою Azure, що робить його надійним вибором для підприємств. Масштабованість і доступність Amazon Transcribe роблять його ідеальним для компаній із великими потребами в транскрипції. Тим часом AssemblyAI пропонує економічно ефективне та просте рішення для загального використання з такими конкурентоспроможними функціями, як аналіз настроїв.

Вибір необхідного API залежить від конкретних вимог вашого проекту, включаючи бюджет, бажані функції та очікувану точність. Розробники також повинні враховувати додаткові фактори, такі як підтримка шумного середовища та регіональних акцентів, які можуть суттєво вплинути на продуктивність.

Таким чином, цей аналіз забезпечує структуру для вибору API розпізнавання мовлення, адаптованого до ваших потреб. Майбутня робота може включати тестування додаткових API, оцінку їх продуктивності в різних умовах і вивчення нових технологій у сфері розпізнавання мовлення.

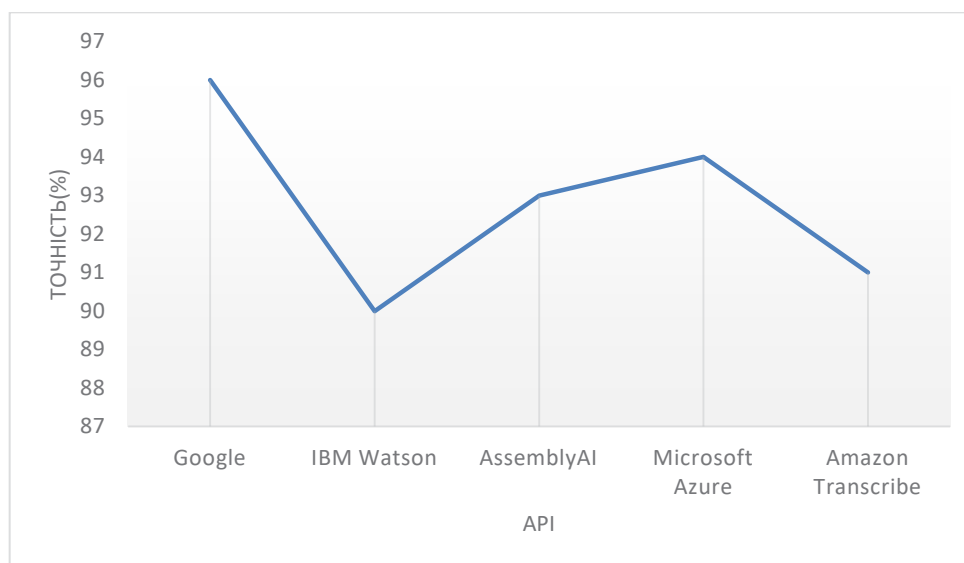


Рис. 2. Лінійний графік точності розпізнавання

Список використаних джерел:

1. О. І. Безверхий, Д. О. Александренко, В. Є. Луц. *Проектування інформаційної системи з можливістю голосового управління*, Системи та технології, No 2 (66), 2023, С. 13-20 DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.2>
2. Dong Yu, Li Deng. *Automatic Speech Recognition: A Deep Learning Approach*. L.: Springer-Verlag London, 2015. 320 p.
3. Automatic Speech recognition: short introduction. URL: https://www.esat.kuleuven.be/psi/spraak/demo/Recog/asr_intro.html (дата звернення: 21.12.2024)
4. Al-Fraihat, Dimah & Sharrab, Yousef & Alzyoud, Faisal & Qahmash, Ayman & Maaita, Adi. Speech Recognition Utilizing Deep Learning: A Systematic Review of the Latest Developments. 2024. Human-centric Computing and Information Sciences. 15. 10.22967/HCIS.2024.14.015.
5. Introducing the Web Speech API. URL: <https://www.sitepoint.com/introducing-web-speech-api/> (дата звернення: 27.12.2024)
6. Speech-to-Text AI: speech recognition and transcription. URL: <https://cloud.google.com/speech-to-text> (дата звернення: 20.12.2024)
7. IBM Watson. What's Next in AI is foundation models at rock URL: <https://research.ibm.com/artificial-intelligence> (дата звернення: 21.12.2024)
8. AssemblyAI Documentation. URL: <https://www.assemblyai.com/docs> (дата звернення: 17.12.2024)
9. Azure AI Speech. URL: <https://azure.microsoft.com/en-us/products/ai-services/ai-speech> (дата звернення: 21.12.2024)
10. Speech To Text Amazon Transcribe: URL: https://aws.amazon.com/transcribe/?nc1=h_ls (дата звернення: 25.12.2024)

References:

1. O. I. Bezverkyi, D. O. Aleksandrenko, V. Ye. Luts. *Designing an information system with the possibility of voice control*. Systems and Technologies, Vol. 66 No. 2 (2023): P.13-20 DOI: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.2-66.2>
2. Yu, D., & Deng, L. (2015). *Automatic speech recognition: A deep learning approach*. Springer-Verlag London.
3. Automatic speech recognition: A short introduction. (n.d.). Retrieved from https://www.esat.kuleuven.be/psi/spraak/demo/Recog/asr_intro.html
4. Al-Fraihat, D., Sharrab, Y., Alzyoud, F., Qahmash, A., & Maaita, A. (2024). Speech recognition utilizing deep learning: A systematic review of the latest developments. *Human-Centric Computing and Information Sciences*, 15. <https://doi.org/10.22967/HCIS.2024.14.015>
5. Introducing the web speech API. Retrieved from <https://www.sitepoint.com/introducing-web-speech-api/>
6. Speech-to-text AI: Speech recognition and transcription. Retrieved from <https://cloud.google.com/speech-to-text>

-
7. IBM Watson. What's Next in AI is foundation models at rock. Retrieved from <https://research.ibm.com/artificial-intelligence>
 8. AssemblyAI documentation. Retrieved from <https://www.assemblyai.com/docs>
 9. Azure AI speech. Retrieved from <https://azure.microsoft.com/en-us/products/ai-services/ai-speech>
 10. Speech to text Amazon Transcribe. Retrieved from https://aws.amazon.com/transcribe/?nc1=h_ls

Haitan O. M., Senior Lecturer at the Department of Computer and Information Technologies and Systems of National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic" ORCID: 0000-0002-7228-9937

Snytko I. V., Student at the Department of Computer and Information Technologies and Systems of National University "Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic"

INTEGRATED PLATFORMS FOR AUTOMATING PERSONAL FINANCIAL ACCOUNTING BASED ON CHATBOTS AND CLOUD TECHNOLOGIES

In the context of increasing financial complexity and the growing need for better personal finance management, virtual personal financial assistants have emerged as essential tools for individuals seeking efficient ways to track, manage, and analyze their finances. The widespread adoption of smartphones and cloud-based technologies has contributed to the growth of automated financial solutions that assist users in budgeting, expense tracking, and making financial decisions. This study examines the conceptual and practical foundations of developing a virtual personal financial assistant based on Telegram chatbot technology, integrated with cloud services such as Google Sheets. The research explores methods for automating financial accounting, enhancing user interaction with financial data, and ensuring secure, scalable, and accessible financial accounting tool for individual and family.

The paper investigates the integration of asynchronous communication models using AioGram, implementation of cloud-based data management via the Google Sheets API, and the use of a lightweight database SQLite for handling service-related data. Particular attention is given to the interaction logic, user experience design, and security protocols based on OAuth2 for managing sensitive financial data.

Furthermore, the research analyzes the user experience, focusing on how the system supports both individual and shared financial management. It explores the functionality that enables multiple users to collaboratively manage a family budget.

The proposed solution represents an approach, combining elements of software engineering, cloud computing, and digital finance. The study highlights the advantages of chatbot-driven interfaces for personal finance management and outlines the potential for future enhancements, including greater automation, multi-user collaboration, and artificial intelligence integration.

Key words: virtual financial assistant, financial accounting, Google Sheets, Telegram bot, chatbot.

Гайтан О. М., Снитка І. В. Інтегровані платформи для автоматизації особистого фінансового обліку на основі чат-ботів та хмарних технологій

У контексті зростаючої складності фінансових процесів та потреби в ефективному управлінні особистими фінансами віртуальні персональні фінансові асистенти стають важливими інструментами для тих, хто шукає зручні способи відслідковування, управління та аналізу своїх фінансів. З поширенням смартфонів та хмарних технологій набувають популярності автоматизовані фінансові рішення, які допомагають користувачам у веденні бюджету, відслідковуванні витрат та прийнятті фінансових рішень. Це дослідження аналізує концептуальні та практичні аспекти розробки віртуального персонального фінансового асистента, побудованого на основі технології Telegram-бота та інтегрованого з хмарними сервісами, такими як Google Sheets. Метою дослідження є вивчення методів автоматизації фінансового обліку, покращення взаємодії користувача з фінансовими даними та створення безпечного, масштабованого і доступного інструменту для фінансового обліку як для окремих осіб, так і для сімей.

У статті детально розглядається інтеграція асинхронних моделей комунікації за допомогою AioGram, впровадження хмарного управління даними через Google Sheets API та використання легкої бази даних SQLite для зберігання сервісних даних. Особлива увага приділяється логіці взаємодії користувача, дизайну інтерфейсу та питанням безпеки, зокрема застосуванню протоколу OAuth2 для захисту чутливої фінансової інформації.

Також досліджується досвід користувачів, особливо щодо того, як система підтримує як індивідуальне, так і спільне фінансове управління. Зокрема, розглядається функціональність, яка дозволяє кільком користувачам спільно управляти сімейним чи груповим бюджетом.

Запропоноване рішення поєднує елементи програмної інженерії, хмарних обчислень та цифрових фінансів. Дослідження підкреслює переваги чат-ботів для управління особистими фінансами та вказує на потенціал для подальших удосконалень, таких як підвищення автоматизації, розширена співпраця між користувачами та інтеграція штучного інтелекту.

Ключові слова: віртуальний фінансовий помічник, фінансовий облік, Google Sheets, телеграм-бот, чат-бот.

Formulation of the problem. Modern financial management systems play a pivotal role in the effective management of financial processes in both business and personal life. The advent of digital technologies and automation software solutions has profoundly transformed financial accounting, budget planning, and income and expense control. These functions have become easier, accessible, and more convenient for users.

A virtual financial assistant is a software tool or system designed to assist users in managing their finances. It is an application or a bot that performs a variety of functions to help users in managing their finances, maintaining records of income and expenses, planning budgets, analyzing expenses, and providing recommendations for achieving financial goals or investments. Presently, financial bots have become prevalent. These are computer programs that can automate some financial tasks using coded commands.

The importance of virtual financial assistants lies in their ability to provide users with convenience and efficiency in managing their finances. Virtual financial assistants can automate many routine tasks, such as recording expenses, categorizing transactions, and generating reports. This saves users significant time and effort, allowing them to focus more on strategic planning of their finances. Available on a variety of platforms, such as mobile apps or online services, virtual financial assistants allow users to have constant access to their financial data. They also offer a user-friendly and intuitive interface that allows even non-expert users to easily navigate their finances. Virtual assistants also use analytical algorithms and artificial intelligence to analyze a user's financial data. Based on this analysis, they provide personalized recommendations for the optimal allocation, savings, and investments, thereby assisting users in achieving their financial objectives. The programs pay close attention to the security of financial data. They use advanced encryption methods and security protocols to ensure the confidentiality and protection of financial data.

Key areas that require virtual assistance in managing personal finances include:

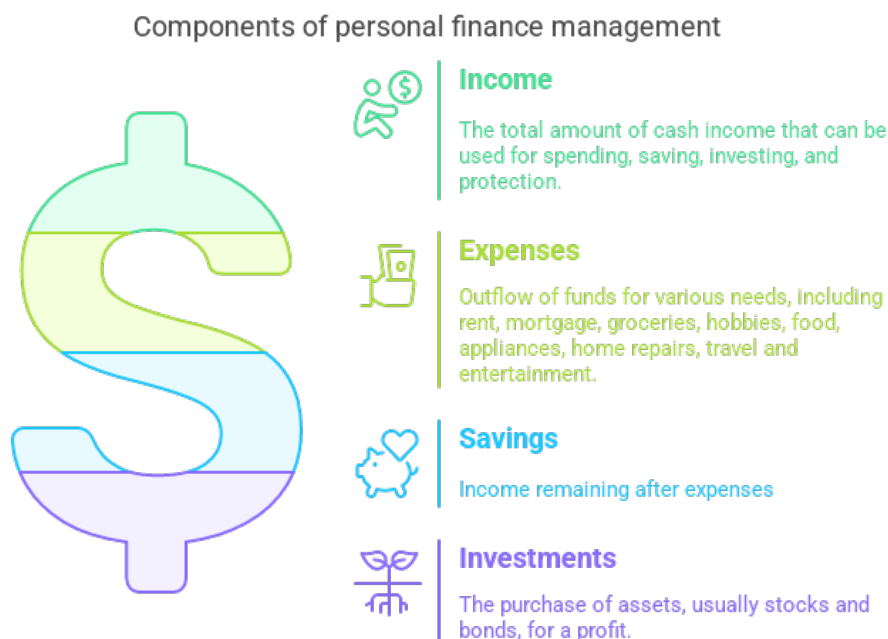


Fig. 1. Key areas of managing personal finances

Virtual financial assistants can be effectively used to manage family budgets by providing centralized accounting of financial transactions and access for all family members. This approach helps increase transparency, accountability, and consistency in family financial management. Sharing expenses helps to avoid unnecessary spending, optimize the use of resources, and develop healthy financial habits. Furthermore, a transparent accounting system stimulates discussion of common financial goals and improves communication among family members about budget decision-making. All family members can see their contribution to the family budget and understand the overall financial situation, how funds are being used, and which expenses are being prioritized.

Users can customize bots individually. For instance, financial bots can send notifications regarding loan payments, debts, and other reminders that the user needs.

The following are the advantages of Virtual financial assistants for users: the ability to control financial income, expenses, and keep records; the formation of a plan and income calculations, the ability to build a model of interaction with finances in advance; the ability to generate reports; the ability to view statistics; access to information 24/7; and customization of the program according to the user needs [1].

Analysis of recent research and publications. Mohanan A. et al. [2] reviewed the current literature on intelligent personal assistants. They outlined the key benefits of personal financial assistants, which increase productivity and improve accessibility by allowing users to manage finances, plan expenses, obtain information, and perform routine tasks using voice or text commands. However, along with these benefits, attention has been drawn to security and privacy threats, particularly in the case of third-party apps that could lead to unauthorized access or misuse of user data.

Iovine A. et al. [3] classified the types of conversational agents into three categories: informational, transactional, and advisory systems. Khudolii Yu.S. and Kosolapenko V.S. [4] added lead generators and feedback chatbots to this list.

Iovine A. et al. studied the development of key components of virtual customer assistants (VCA) in the financial industry depending on the category, reviewed templates and best practices for creating Conversational User Interfaces for VCA.

The prospects for the development of virtual financial assistant technologies lie in the use of generative Artificial Intelligence, Deep Machine Learning, and the integration of quantum algorithms into financial planning. Jain M. and Srihari A. [5], considering personal financial management tools, compared traditional approaches and solutions based on artificial intelligence. Pavlyuchenko D. M. [6] conducted a study on the impact of Artificial Intelligence and Machine Learning on banking services.

The market for financial management software is expanding rapidly due to the development of technology and the growing interest in personal finance. Numerous software solutions have been developed to assist users in managing their finances.

“**Money Manager Expense and Budget**” is a financial management app developed by RealbyteInc. that helps users track their expenses, plan their budgets, and control their financial resources [7].

Key functions of «Money Manager Expense and Budget» include:

1. Input and tracking of users' incomes and expenses with categorization of expenses and their descriptions.
2. Budget planning with the definition of monthly expenditure limits for each category. The ability to set budget goals and receive notifications when approaching the limit, ensuring expense control.
3. Tracking reports and statistics in the form of charts and diagrams for expense control, displaying incomes and expenses by various categories and over a specific period of time.
4. Synchronization across different devices and backup [8].

“**Money Lover**” is a financial app created by Finsify in 2011 for personal finance tracking and resource management. The app is available for use on various platforms, such as mobile devices with Android and iOS [8].

Key functions of “Money Lover” include:

1. Transaction and expense tracking. Adding transactions by categories to track user expenses. The ability to link bank accounts for tracking transaction histories.
2. Financial planning. The ability to categorize expenses, set limits for each category, and receive notifications when approaching the limit.
3. Financial management for special events. The ability to create separate financial plans for events with planned expenses, such as vacations, holidays, or gifts.
4. Automatic addition of recurring transactions, such as weekly purchases or monthly bills, into the system.
5. Account management. The ability to add various bank accounts, credit cards, and other financial resources to the system. The ability to track balances, transfers, expenses, and income from all accounts for a complete overview of financial status.

In addition to applications that require downloading and installation, there are also chatbots integrated into messaging platforms such as Facebook, Viber, and Telegram. These chatbots offer the following advantages for users:

1. Convenience. Users are not required to download or install a separate application, as the chatbots are directly embedded within platforms like Facebook, Viber, and Telegram. This enables users to carry out financial transactions and access information in a convenient manner without leaving the messaging app.
2. Quick access. Users can obtain essential financial information directly within the messenger chat. This saves time by eliminating the need to switch to standalone applications or websites.
3. Interactivity. Chatbots enable user interaction through text messages or interactive buttons, which simplifies communication. Users can easily specify their requests and receive the appropriate responses and actions.

“**WhereIsMyMoney**” is a Telegram-based financial management bot designed to help users track their expenses and manage their financial resources [9].

The main functions of “WhereIsMyMoney” include:

1. Tracking of expenses and income, with the ability to input amounts and descriptions for both.
2. Expense statistics over a specified period.
3. Report export in selected formats, such as csv or xlsx.

Based on the analysis of existing software solutions in the field of virtual financial assistants, the development of a virtual financial assistant in the form of a chatbot was deemed appropriate solution, and its core functionality was defined.

The purpose of the article is to explore the development of a virtual financial assistant in the form of a Telegram bot integrated with Google Sheets, designed to support users in managing and tracking their personal finances.

Based on the analysis of the subject area and taking into account user needs for a convenient tool for managing both personal and shared financial records, the functional requirements for a chat-bot were defined as follows:

- User interaction initialization: launching the bot, providing instructions, creating an individual accounting spreadsheet, and supporting invitations for shared access.
- Implementation of a main menu with buttons: entering transactions (income and expenses), viewing recent entries, aggregating by categories, viewing balance over a selected period (recent, monthly, or total income/expenses), accessing the spreadsheet, and accessing help information (getting a link to the spreadsheet and a help section).
- System configuration: managing reminders and invitations, and setting up shared (family) finance tracking.
- Transactions: adding, categorizing, commenting on, cancelling, editing, and deleting financial records.
- Spreadsheet operations: synchronized access to the “Expenses”, “Income”, and “Reports” sheets, with the ability to edit or delete transactions.
- Table deletion and user management: deleting the spreadsheet (for the owner) and removing invited users.

Non-functional requirements include maintaining informal conversational interactions, preserving the user session between interactions, and ensuring continuous bot operation without requiring repeated registration.

Presenting main material. The platform selected for the development of a virtual financial assistant defines the foundation for its functionality and the mode of interaction with users. There are various platforms on which a virtual financial assistant can be developed, each offering its own advantages and specific features. Several popular platforms are considered and compared below.

Messagers Facebook, Viber, and Telegram offer powerful capabilities for chatbot development. They have a broad user base and provide convenient communication through text messages, buttons, and graphical elements.

Mobile platforms (iOS, Android) allow users to interact with the virtual assistant via a mobile application on their devices. This ensures portability and accessibility for users.

Web platforms enable the creation of a financial assistant accessible through a browser, offering flexibility and convenient interactive access to financial features.

For development of the virtual financial assistant, the **Telegram** platform was chosen due to its popularity, user-friendly interface, and robust tools for building bots. Telegram has a large and steadily growing number of active users, which ensures broad access to the target audience (Fig. 2) [10].

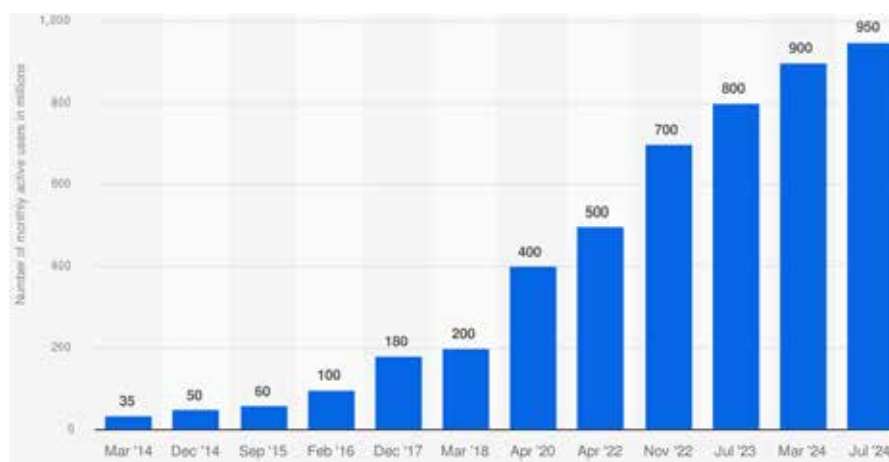


Fig. 2. Increase in the Number of Telegram Users

Source: © Statista 2025

The platform supports BotAPI and provides a clear, well-documented programming interface that simplifies functionality integration. Telegram’s simple and intuitive interface facilitates interaction with financial features and services. Robust security measures and modern encryption techniques ensure the protection of confidential data, which is critical for handling sensitive financial user data.

In development of the virtual financial assistant for automation of financial accounting and planning, several key software technologies were selected to ensure system efficiency, flexibility, and integration capability. The primary requirements for these technologies are ease of integration with existing services, user-friendliness, reliability,

and scalability. The selection process considered the following aspects: user convenience, automation capabilities, and the technical implementation of interactions between system components.

One of the core technologies used for developing the virtual assistant is the **Telegram API**, which enables the creation of bots for automated user interaction via chat. The **Aiogram** library was chosen for this purpose. Aiogram is a high-level, asynchronous Python library for building Telegram bots, capable of efficiently handling numerous concurrent requests. It supports essential functionality and provides a convenient interface for interacting with the Telegram API and developing complex, interactive bots. Aiogram enables flexibility of user interaction logic and is reliable in terms of scalability. Its key advantages lie in its simplicity and flexibility. Thanks to its extended functionality, Aiogram facilitates the creation of bots with complex user scenarios and interactions through commands and messages. It provides convenient tools for processing incoming messages, managing finite-state machines, and implementing response logic. It also supports various message types, custom keyboards with buttons, and user interaction events.

Python is selected as the main programming language for development of the virtual assistant due to its high performance, flexibility, and simplicity in implementing interaction logic among system components. Python's elegant syntax, efficient data structures, and dynamic typing contribute to its usability. As an interpreted language, Python is well-suited for scripting and rapid bot development. Moreover, it includes a vast number of standard libraries that offer ready-made solutions for tasks ranging from text processing to data analysis. Python's cross-platform nature allows it to run on various operating systems and devices.

Google Sheets was chosen as the cloud-based platform for storing and processing financial data in the table view. It provides a convenient interface for working with large volumes of data and enables users to effectively manage their finances through integration with other services. Interaction with Google Sheets is implemented using the **gspread** library, which allows connections to a Google account to read, write, and update spreadsheet data without manual document modifications. The library's extensive functionality supports operations on various data types, creation of new spreadsheets, editing and deletion of existing ones, and management of access rights to Google Sheets directly from the Telegram bot. This significantly reduces user workload and automates most data-related operations.

Google Sheets also enables automated data processing through built-in formulas. This functionality allows the financial assistant to perform calculations, analyze data, and provide relevant reports to the users. Therefore, choosing Google Sheets as the tool for storing users' financial data is a rational decision, offering user-friendly data handling, multi-device access, and automation capabilities.

Each user has an individual Google Sheets spreadsheet to which the bot has access. Expense and income data entered by users via the Telegram bot are automatically recorded in the corresponding spreadsheet. This allows for convenient storage and tracking of the user's financial history.

To work with Google Sheets via the Telegram bot, a Google service account is required. It facilitates interaction with various Google services, including the Sheets and Drive APIs. This account provides automatic authentication and access to functions that enable interaction with stored data, including file creation, reading, updating, and other operations within the Google services. Using this service account, the financial assistant uses Sheets API to read and write data to Google Sheets. This enables the automatic update of financial data, execution of calculations, and generation of reports based on the spreadsheet content. Additionally, the service account grants access to the Drive API, allowing file operations such as uploading, saving, searching, and synchronizing files in the Google Drive cloud storage.

To ensure security and authentication when accessing Google Sheets, the **OAuth2** standard is used. This protocol provides secure access to user data without requiring password storage. The **oauth2client** library is employed for interaction with OAuth2, offering tools for authorization and authentication necessary for accessing Google API. The library provides secure access to users' financial data by retrieving access tokens for service accounts used to interact with Google API directly from Python. This approach ensures security and access control to financial data and automates the process of accessing Google Sheets.

The use of the **gspread** and **oauth2client** libraries allows the virtual financial assistant to access Google Sheets and perform read/write operations. In addition, other libraries are utilized: **schedule** for task planning, **decimal** for high-precision decimal operations, and **datetime** for working with dates and times.

For automating tasks such as periodic data updates or end-of-day reminders, the **schedule** library in Python is used. It enables the configuration and execution of scheduled tasks, supporting the development of reminder functionality for financial operations and user expense tracking. This tool allows for planning tasks, events, and actions at specific time intervals, as well as setting up recurring tasks. The library also supports different time zones and is useful for automating processes such as data collection, message sending, and event planning.

To store general information about the financial assistant, the SQLite database was selected. SQLite is a lightweight relational database engine that is well-suited for small-scale projects. It provides fast data access and a simple SQL syntax for interaction with the database.

The architecture of the chatbot represents a multi-component system that enables interactive communication between the user and the application. It is built on a microservices-based approach, where each component is

responsible for a specific function. The structure of the virtual financial assistant comprises three main components: Telegram bot, SQLite database, and Google Sheets. The Telegram bot serves as the user interface, allowing users to input their financial data and receive reports. It interacts with users by collecting and processing requests, then transfers the data to Google Sheets for storage. Google Sheets are utilized to organize and store users' financial data. The bot also accesses financial data via the Google Sheets API, enabling automated operations such as balance calculations, expense tracking, and report generation. The SQLite database stores and provides access to user-related information (such as chat ID, email addresses, and spreadsheet link). The bot interacts with the database to retrieve and update user information. This architecture allows the virtual financial assistant to efficiently interact with users, securely store their financial data, and ensure confidentiality and integrity of the information.

Integration between components is implemented via RESTful APIs for communication between the Telegram bot and Google Sheets. This ensures a high level of scalability, security, and user convenience.

The operation algorithm of the virtual financial assistant is based on the interaction between the user, the Telegram chatbot, and Google Sheets (Fig. 3).

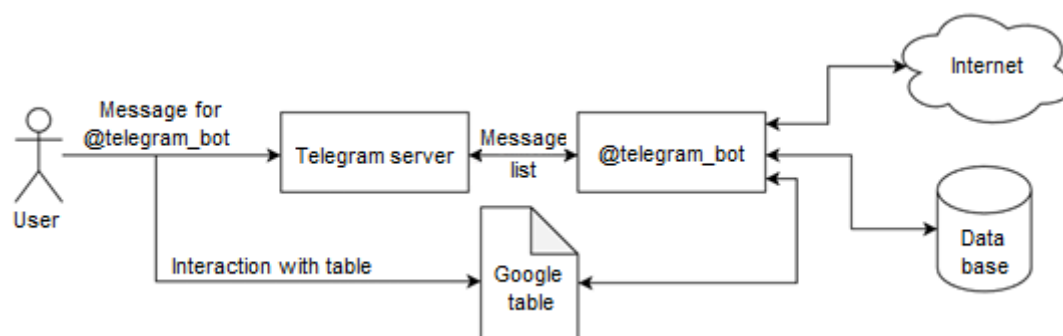


Fig. 3. The operation algorithm of the virtual financial assistant

The Telegram bot operation algorithm can be divided into several stages. The bot constantly monitors the incoming stream of messages and waits for a message from the user. Upon receiving a message, the bot performs semantic and structural analysis to determine the type of the request or command sent. It examines the message text, its structure, and the presence of keywords to identify the required operation. Following the analysis, the bot executes the corresponding action or request. This may include providing information, performing a specific function, conducting a search, or interacting with Google Sheets or the database. Upon completion, the bot generates an appropriate response for the user in the form of text, a link, or other format that best addresses the user's request. Depending on the action performed, the bot may save the obtained data for future interactions. Additionally, the user has access to the linked Google Sheet, which they can view or modify.

The development of a Telegram chatbot begins with registration via the Telegram Bot API through the official BotFather, which facilitates the registration process and provides an API token for interaction with the Telegram Bot API.

After receiving the API token, to integrate with Google Sheets, it is necessary to create a dedicated service account in the Google Cloud Platform. This entails initiating a new project, enabling the Google Sheets API and Google Drive API services, and configuring credentials with "Application Data" access type. The service account is granted the "Owner" role to permit the creation and modification of Google Sheets documents. Once these settings are configured, a JSON-formatted key must be generated. JSON is a language-independent data exchange format based on JavaScript, used to transmit structured information between heterogeneous systems. It represents data as key-value pairs, and supports objects (including associative arrays), arrays, numbers, strings, Boolean values, and nulls.

The use of a predefined template in Google Sheets allows for the creation of a standardized, preformatted document, which serves as a basis for storing user-provided financial data via the chatbot. To configure such a template, a spreadsheet must be created and the service account granted editor permissions (Fig. 4–6).

The sqlite3 is a built-in module included in the standard Python distribution starting from version 2.5. Within the framework of the virtual financial assistant, it is used exclusively for storing service information about users and data that facilitates modifications to the spreadsheet, since the primary financial data (income, expenses, reports) is stored in Google Sheets. The attributes of the database are listed below:

- user_id stores the user's identifier in the database; data type: INTEGER; set as the PRIMARY KEY;
- email stores the user's email address; data type: TEXT;
- spreadsheet_link stores the link to the Google Sheets; data type: TEXT;
- last_added_row_sheet1 stores the index of the last added row in the first sheet; data type: INTEGER;
- last_added_row_sheet2 stores the index of the last added row in the second sheet; data type: INTEGER;

```
# Підключення до бази даних
conn = sqlite3.connect('users.db')
cursor = conn.cursor()
# Створення бази даних
cursor.execute('''CREATE TABLE IF NOT EXISTS users
                (user_id INTEGER PRIMARY KEY, email TEXT, spreadsheet_link TEXT,
                last_added_row_sheet1 INTEGER, last_added_row_sheet2 INTEGER,
                money REAL, description TEXT, notifications BOOLEAN, invite_code TEXT)
                ''')
conn.close()
```

Fig. 7. The database initialization

At the initial stage of implementing the Telegram bot, a handler for the /start command is created. This handler analyzes the arguments passed with the command using the `message.get_args()` method. Depending on the presence of an argument, the corresponding function is invoked: `handle_normal_start` for a standard launch, or `handle_invite_start` when a user is invited to use the system jointly.

The `handle_normal_start` method processes the message that initiates interaction with the bot. Its core functionality depends on whether the user is registered in the database:

- establishes a connection to the database and retrieves the user record using the `user_id`;
- if the user already exists in the database, sends a message containing a link to their spreadsheet, retrieving the spreadsheet key using `get_spreadsheet_key`;
- if the user is not present in the database, sends a welcome message describing the bot's features and prompts the user to enter their actual Gmail address;
- sets the state to `UserEmail.email` in order to handle the entered email address in the next step.

The `handle_invite_start` method handles messages that initiate the process of inviting a user to join a shared financial accounting system. Its main actions include:

- sends a message to the user requesting their email address;
- sets the state to `UserEmail.invite_email` to process the entered email.

The `UserEmail.email` and `UserEmail.invite_email` states validate the correctness of the entered email address and subsequently invoke the `create_sheet` and `share_sheet` functions respectively.

The `create_sheet` function performs the following tasks:

- creates a spreadsheet based on a template and grants access to the provided email address;
- sends a message to the user in the chat with a link to the created spreadsheet and usage instructions;
- generates a menu for further interaction with the bot;
- stores the user's data in the database for future identification and generates an invitation code for inviting additional users.

The `share_sheet` function performs the following operations:

- connects to the database and retrieves the spreadsheet link using the invitation code;
- if the spreadsheet link exists, extracts the email from the user's message;
- opens the spreadsheet using the retrieved link and grants editing access to the specified email;
- stores the user's data in the database, including user ID, email, spreadsheet link, and other relevant information;

- sends the user a message with the spreadsheet link and instructions for using the financial assistant bot.

The `handle_text` function processes user messages that are not bot commands, ensuring smooth interaction with the bot. Its main operations are:

- retrieves the text message and user ID;
- splits the message into two parts – amount and description – using a space;
- checks whether the first part is a float-type number;
- if valid, performs the required operations; if the first part is not a number, sends an error message indicating incorrect input;
- formats the number to two decimal places;
- stores the amount and description in the database;
- displays category selection buttons to the user.

The `handle_text_message_sheet` function, which manages data insertion into the “Expenses” and “Income” sheets in Google Sheets, executes the following tasks:

- authorizes access to Google Sheets using provided credentials;
- opens the spreadsheet using the key retrieved from the database;
- retrieves the money amount and description from the database;

- obtains additional user details, such as the user's name;
- formats the current timestamp;
- creates a data list including the formatted timestamp, message text, money amount, user name, and description;

- searches the first empty row in the spreadsheet, starting from row 18;
- updates this row with the prepared data using the update method;
- updates the database with information about the last added entry.

To display information about the added transaction and provide a "Cancel" button, the `cancel_button` functions are implemented with the following functionality:

- deletes the previous message containing buttons;
- retrieves the current time and user ID;
- obtains the user's recorded money amount from the database;
- creates a new message confirming the recorded money amount into a specific category;
- adds a "Cancel transaction" button to the message.

Functions such as `balance` and `balance_month` are implemented to display the balance for all time / for the current month. They perform the following operations:

- call the `get_data_from_cell` function to retrieve data from a specific cell in the SHEET for expenses and income respectively;
- calculate the balance by subtracting expenses from income;
- convert resulting income, expenses, and balance data in format for display;
- generate a formatted message showing the financial balance, including income, expenses, and balance for the selected period;
- remove previously displayed buttons from the message; generate a button labeled either "View Monthly" or "View All-Time" for further navigation;

- send the new message with the balance data and the navigation button.

The `report_by_category_of_expenses`, `report_by_category_of_income` (for categorized transaction summaries), `report_recent_transactions`, and `report_recent_earnings` (for 15 recent transactions / earnings) functions implement reporting mechanisms for the user's financial activity.

The `report_by_category_of_expenses` function performs the following tasks:

- authorizes access to Google Sheets using the provided credentials;
- opens the spreadsheet;
- determines the current month;
- defines the range for expense categories and amounts;
- retrieves category and amount values from the spreadsheet;
- formats report text by adding category names and corresponding amounts;
- sends the generated report to the chat.

The `/delete_sheet` command implements conditional logic based on the user's role: if the spreadsheet was created by the user, the command initiates complete deletion; if the user was invited to the shared sheet, the command removes them from access. The `delete_sheet` function performs the following tasks:

- checks the presence of an `invite_code` in the database for the current user;
- depending on the presence of the `invite_code`, generates confirmation buttons for deleting the sheet (`confirm_delete`) or exiting the shared access (`confirm_remove`);
- sends a confirmation message with the relevant buttons.

The `confirm_delete` function performs the following tasks:

- retrieves the `user_id` from the request;
- calls the `del_spreadsheet` function via `google_client` to delete the spreadsheet using the key from the database;
- deletes the associated database record based on the spreadsheet link;
- sends a message confirming the deletion and provides instructions for entering a new email address to restart the process;

- sets the state to `UserEmail.email` to collect the user's email.

The `confirm_remove` function performs the following tasks:

- retrieves the `user_id` from the request;
- queries the database to obtain the user's email and spreadsheet link;
- opens the spreadsheet using the link;
- removes the user's access rights based on their email address;
- deletes the corresponding record in the database;
- sends a message confirming successful removal of the email from the spreadsheet, along with instructions for entering a new email to restart the process;
- sets the state to `UserEmail.email` to collect the user's email.

Upon first activation, the virtual financial assistant provides a brief guide to the chatbot and prompts the user for their email address to generate a personal spreadsheet. Once the address is submitted, the bot displays a message indicating that the spreadsheet is being created and asks the user to wait. After the table has been created, the assistant sends a link to it accompanied by a brief usage guide (Fig. 8).

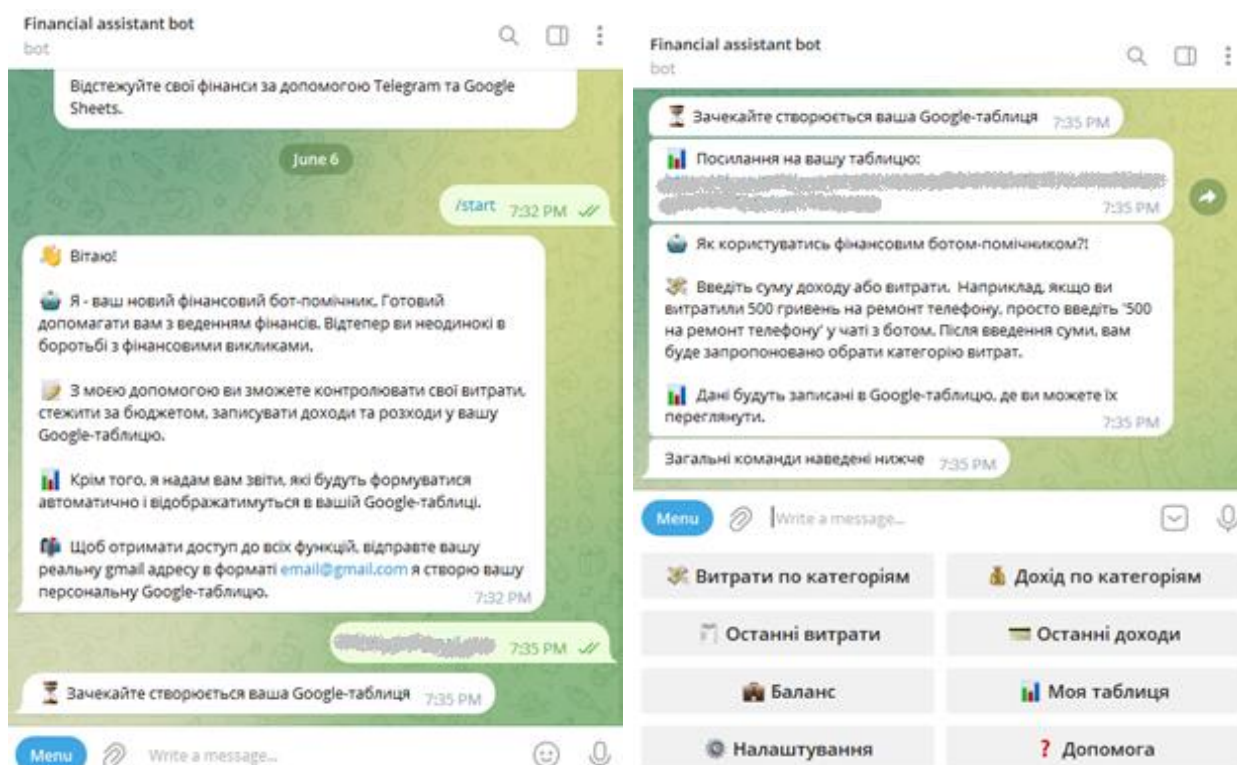


Fig. 8. The registration process

Upon completing of the registration process and personal table generation a menu appears, presented as a set of interactive buttons that assist the user in managing finances and configuring the personal virtual assistant. To initiate interaction, the user inputs an expense, for example: “700 for phone repair.” The bot then prompts the user to select a category for the expense or income. As a result, a confirmation message is displayed showing the transaction details (Fig. 9).

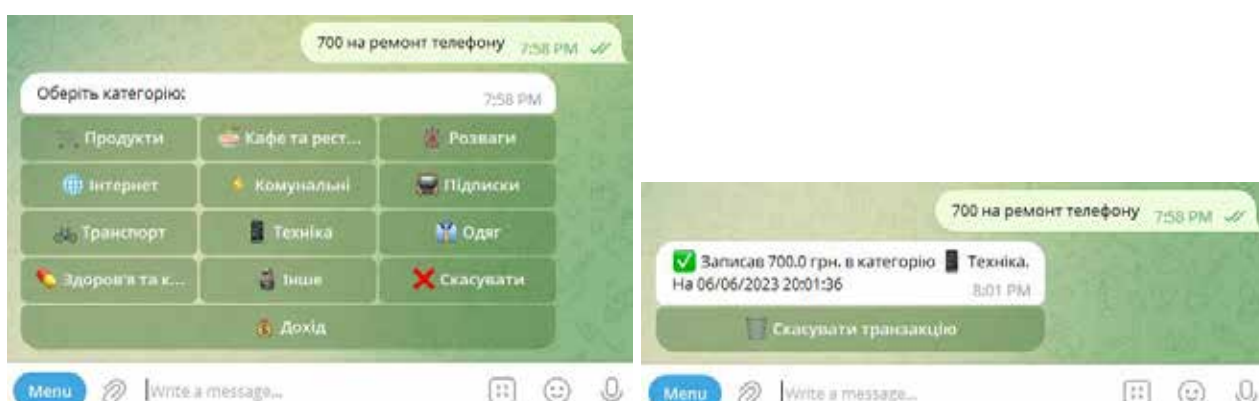


Fig. 9. The recording of transaction

In a similar manner, the user input both income and expenditure data into the table. After transactions have been recorded, the user can review them either by accessing the spreadsheet via the registered email address or directly within the Telegram bot through the corresponding menu options (Fig. 10).

The system supports collaborative financial tracking. To enable this functionality, the user must navigate to the “Settings” section, select the “Shared Accounting” option, and send an invitation to another user (Fig. 11).

				Місяць											
Рівень витрат				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Категорія витрат	План	Середній факт	За рік	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Листопад	Січень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Продукти	2000	996.42	996.42	0	0	0	0	0	996.42	0	0	0	0	0	0
Кафе та ресторани	1000	1434.06	1434.06	0	0	0	0	0	1434.06	0	0	0	0	0	0
Ресторани	500	900	900	0	0	0	0	0	900	0	0	0	0	0	0
Інтернет	500	320	320	0	0	0	0	0	320	0	0	0	0	0	0
Комунікації	2000	3239.73	3239.73	0	0	0	0	0	3239.73	0	0	0	0	0	0
Підприємства	200	79	79	0	0	0	0	0	79	0	0	0	0	0	0
Транспорт	1000	1600	1600	0	0	0	0	0	1600	0	0	0	0	0	0
Телефон	1000	700	700	0	0	0	0	0	700	0	0	0	0	0	0
Одяг	2000	1800	1800	0	0	0	0	0	1800	0	0	0	0	0	0
Дарюючи та краса	1000	1201.15	1201.15	0	0	0	0	0	1201.15	0	0	0	0	0	0
Інше	2000	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Сума	13200	12311.28	12311.28	0	0	0	0	0	12311.28	0	0	0	0	0	0
Категорія доходу				Січень	Лютий	Березень	Квітень	Травень	Червень	Листопад	Січень	Вересень	Жовтень	Листопад	Грудень
Зарплата	0	13000	13000	0	0	0	0	0	13000	0	0	0	0	0	0
А. Підприємства	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Кредит	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Фінанси	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Бюджет	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Відсотки	0	756	756	0	0	0	0	0	756	0	0	0	0	0	0
Сума	0	13756	13756	0	0	0	0	0	13756	0	0	0	0	0	0
Всього				0	0	0	0	0	1444.72	0	0	0	0	0	0
Розподіл	13200	1444.72		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	13.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%
Відсоток	0.00%	0.00%		0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	13.50%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%	0.00%

Fig. 13. Report sheet after data entry by multiple users

To ensure proper operation, the virtual financial assistant must be deployed either on a hosting platform or a local server. For local deployment, the following steps are required. Before launching the project, a virtual environment should be created using the command `python -m venv venv`, and then activated via `venv\Scripts\activate`. All required dependencies must be installed using the command `pip install -r requirements.txt` within the activated environment. Next, the database should be initialized by executing the script `python db.py`. If necessary, configuration parameters – such as the Telegram bot token and service account credentials – can be modified in the `settings.py` file. Once configuration is complete, the project can be launched using the command `python bot.py`. This approach ensures that the assistant functions correctly in both local and cloud-based environments.

Conclusions. Virtual personal financial assistants serve as effective tools for enhancing financial literacy and ensuring stability at both individual and family levels. They simplify budgeting processes, facilitate income and expense tracking, and support informed financial decision-making.

This study presents the implementation of a Telegram bot integrated with Google Sheets, providing users with convenient and secure access to the functions of a personal financial assistant. The results demonstrate the practical value of such an approach for everyday financial management.

The developed tool has significant potential for further enhancement, particularly through expanding functionality, increasing automation, and integrating artificial intelligence. The proposed solution represents a meaningful step toward the digital transformation of personal finance management.

Bibliography:

1. Розробка фінансових додатків та сервісів від Wezom. URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/razrobotka-finansovyh-prilozhenij>.
2. Mohanan A., Sabu A., Shinu S.S., Surendran S., ChandraBabu G. Assessing the Development and Use of Virtual Personal Assistants. *International Journal for Research Trends and Innovation (IJRTI)*. 2025. Vol. 10, Issue 1. Pp. a870–a879. URL: <https://ijrti.org/papers/IJRTI2501104.pdf>.
3. Iovine A., Narducci F., Musto C., de Gemmis M., Semeraro G. Virtual Customer Assistants in Finance: From State of the Art and Practices to Design Guidelines. *Computer Science Review*. 2023. Vol. 47. Article 100534. DOI: 10.1016/j.cosrev.2023.100534.
4. Худолій Ю. С., Косолапенко В. С. Особливості застосування чат-ботів на основі штучного інтелекту у фінансовій сфері. *Економіка і регіон*. 2023. № 3 (90). С. 97–103. DOI: 10.26906/EiR.2023.3(90).3036.
5. Jain M., Srihari A. AI Driven Personal Finance Management Tools. *International Journal of Novel Research and Development (IJNRD)*. 2024. Vol. 9, Issue 12. P. b822–b831. URL: <https://ijrti.org/papers/IJNRD2412187.pdf>.
6. Павлюченко Д. М. Вплив штучного інтелекту та машинного навчання на банківські послуги. *Академічні візії*. 2024. Вип. 32. 14 с. DOI: 10.5281/zenodo.12936652.
7. Money Manager Expense & Budget. URL: <https://www.realbyteapps.com/>
8. 10 фінансових додатків для домашньої бухгалтерії. URL: <https://new.minfin.com.ua/ua/ideabank/10-prilozhenij-kotorye-pomogut-razbogaket>.
9. WHEREISMYMONEY – PERSONAL FINANCE BOT – TELEGRAM BOT. URL: <https://tdirectory.me/bot/whereismymoneybot.dhtml>.
10. Telegram global MAU 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/234038/telegram-messenger-mau-users>.

References:

1. Rozrobka finansovykh dodatkov ta servisiw vid Wezom. URL: <https://wezom.com.ua/ua/blog/razrobka-finansovykh-prilozhenij>.
2. Mohanan, A., Sabu, A., Shinu, S.S., Surendran, S., ChandraBabu, G. (2025). Assessing the Development and Use of Virtual Personal Assistants. *International Journal for Research Trends and Innovation (IJRTI)*. Vol. 10. Issue 1. 2025. a870 – a879. URL: <https://ijrti.org/papers/IJRTI2501104.pdf>.
3. Iovine, A., Narducci, F., Musto, C., de Gemmis, M., Semeraro, G. (2023). Virtual Customer Assistants in Finance: From State of the Art and Practices to Design Guidelines. *Computer Science Review*. Vol. 47. 100534. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.100534>.
4. Khudolii, Yu. S., Kosolapenko, V. S. (2023). Osoblyvosti zastosuvannia chat-botiv na osnovi shtuchnoho intelektu u finansovii sferi. *Ekonomika i rehion*. 2023. № 3 (90). Pp. 97–103. DOI: 10.26906/EiR.2023.3(90).3036
5. Jain, M., Srihari, A. (2024). AI Driven Personal Finance Management Tools. *International Journal of Novel Research and Development (IJNRD)*, Vol. 9, Issue 12. 2024. b822-b831. URL: <https://ijrti.org/papers/IJNRD2412187.pdf>.
6. Pavliuchenko, D. M. (2024). Vplyv shtuchnoho intelektu ta mashynnoho navchannia na bankivski posluhy. *Akademichni Vizii*. Vol. 32, Zenodo. 14 pp. DOI:10.5281/zenodo.12936652.
7. Money Manager Expense & Budget. URL: <https://www.realbyteapps.com/>
8. 10 finansovykh dodatkov dlia domashnoi bukhhalterii. URL: <https://new.minfin.com.ua/ua/ideabank/10-prilozhenij-kotorye-pomogut-razbogatet>.
9. WHEREISMYMONEY – PERSONAL FINANCE BOT – TELEGRAM BOT. URL: <https://tdirectory.me/bot/whereismymoneybot.dhtml>.
10. Telegram global MAU 2024. URL: <https://www.statista.com/statistics/234038/telegram-messenger-mau-users/>.

Івасечко А. В., викладач кафедри інформаційно-обчислювальних систем і управління
Західноукраїнського національного університету
ORCID: 0009 0002-8623-7828

Ліп'яніна-Гончаренко Х. В., доктор технічних наук, доцент,
доцент кафедри інформаційно-обчислювальних систем
і управління
Західноукраїнського національного університету
ORCID: 0000-0002-2441-6292

АРХІТЕКТУРА НАПІВАВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ АНОТАЦІЇ БАГАТОМОВНИХ АРХІВНИХ РУКОПИСНИХ ТЕКСТІВ

У статті розглянуто актуальну науково-прикладну проблему, пов'язану з автоматизованим розпізнаванням історичних рукописних документів, що зберігаються в архівних установах України. Особливу складність становить те, що значна частина цих документів – зокрема періоду XIV–XIX століть – має гетерогенну мовну структуру, включаючи тексти українською, польською, латинською, російською та османсько-турецькою мовами. Окрім багатомовності, історичні тексти відзначаються використанням кількох алфавітів у межах одного документа, що значно ускладнює застосування класичних методів оптичного розпізнавання символів (OCR), які зазвичай орієнтовані на сучасні одномовні друковані документи.

Для подолання вказаних викликів у роботі запропоновано архітектуру інтелектуальної системи, здатної до напівавтоматизованого маркування символів у складних текстових фрагментах. Передбачено механізм колективної участі користувачів у процесі лейблінгу та подальшої валідації міток, що дозволяє зменшити ймовірність людських помилок і підвищити якість анотованих даних. Такий підхід сприяє формуванню високоякісних корпусів даних, необхідних для навчання моделей глибокого навчання, адаптованих до розпізнавання рукописних текстів зі змішаною мовною структурою.

Ключовими функціональними особливостями запропонованої системи є підтримка мультимовності, мультіалфавітності, а також можливість масштабування процесів розмітки даних відповідно до специфіки історичних джерел. Інструмент орієнтований на створення зручного середовища для інтерактивної взаємодії між дослідниками гуманітарної сфери та фахівцями з обробки даних, що, у свою чергу, дозволяє розширити можливості міждисциплінарних досліджень.

Запропоноване рішення має як теоретичне, так і практичне значення. З одного боку, воно сприяє розробці нових підходів до автоматизованої обробки історичних джерел у контексті цифрової гуманітаристики. З іншого – забезпечує інструментарій для збереження, вивчення та популяризації національної історико-культурної спадщини шляхом її якісної цифрової трансформації.

Ключові слова: розпізнавання рукописного тексту, створення датасету, вебдодаток.

Ivasechko A. V., Lipianina-Honcharenko Kh. V. Architecture of a semi-automated annotation system for multilingual archival handwritten texts

The developed system architecture enables the creation of datasets for further processing using machine learning and deep learning techniques. This approach plays a key role in addressing the challenges associated with the automated recognition of historical handwritten documents, particularly in complex multilingual and multi-script environments. A significant portion of Ukraine's archival heritage, especially documents dating from the 14th to the 19th centuries, contains texts written in various languages—including Ukrainian, Polish, Russian, and Ottoman Turkish—using different scripts such as Cyrillic, Latin, and Arabic.

Traditional Optical Character Recognition (OCR) systems are typically designed for printed texts and are limited in their ability to handle the variability and noise present in historical manuscripts. Furthermore, they often lack support for mixed-language documents and rare historical scripts, making them unsuitable for large-scale archival digitization projects. In contrast, the proposed system architecture not only allows for the semi-automated labeling of individual characters but also incorporates user interaction, validation mechanisms, and multilingual capabilities. These features significantly improve the quality of the labeled data and ensure its suitability for downstream machine learning tasks.

The resulting datasets can be used to train modern recognition models, including convolutional neural networks (CNNs) and transformer-based architectures, which have demonstrated high effectiveness in visual and sequence processing tasks. By generating high-quality, annotated training samples, the system contributes to the development of robust handwriting recognition solutions that can adapt to historical variation in script style, ink degradation, and complex page layouts.

Moreover, the architecture supports iterative model refinement through human-in-the-loop strategies, where user feedback is incorporated to improve recognition accuracy over time. This is particularly important in the digital humanities domain, where expert validation and domain-specific knowledge play a critical role in ensuring the reliability of computational tools. Ultimately, the proposed system facilitates the preservation, accessibility, and computational analysis of cultural heritage documents, thereby supporting historians, linguists, and archivists in their research efforts.

Key words: handwritten text recognition, dataset creation, web application.

Постановка проблеми. Цифровізація та обробка рукописної інформації є однією з актуальних задач сучасної комп'ютерної лінгвістики, штучного інтелекту та інформаційних технологій загалом. Значна частина історичних документів, що зберігаються в архівах України, залишаються неіндексованими та малодоступними для пошуку й автоматичного аналізу через відсутність якісних засобів розпізнавання рукописного тексту, особливо в багатомовному та мультиалфавітному середовищі. Частина таких документів – це рукописні тексти XIV–XIX століть, створені польською, російською, українською та турецькою мовами, із використанням як кирилиці, так і латиниці. Окрім того, виявлено численні приклади українських слів, записаних латиною, що ускладнює задачу автоматичної класифікації та розпізнавання.

Відповідно, постає завдання якісного розпізнавання зображень текстів, їх символів та інтеграції в інтелектуальні системи. З огляду на складність рукописних шрифтів, варіативність мов та нестандартну орфографію, наявні датасети виявляються малоефективними. Це зумовлює потребу у створенні спеціалізованого датасету для задач комп'ютерного зору, навчання моделей глибокого навчання, семантичної обробки й класифікації тексту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У контексті зростаючого інтересу до цифрової гуманітаристики, обробки рукописної спадщини та розвитку систем штучного інтелекту для аналізу історичних документів, дослідження методів багатомовної анотації й розпізнавання рукописного тексту набуває особливої актуальності. Багатомовні архівні матеріали, які містять тексти, написані різними мовами й алфавітами, становлять складне, але цінне джерело для побудови навчальних корпусів та розробки інтелектуальних інструментів розпізнавання (HTR/OCR). Сучасні підходи, що поєднують методи глибокого навчання (CNN, LSTM, GAN) з механізмами валідації, дозволяють досягти високої точності навіть у складних умовах, таких як варіативність орфографії, транслітерація або відсутність стандартизованої розмітки. Огляд актуальних досліджень демонструє як значний прогрес у точності розпізнавання, так і розвиток методологій, спрямованих на підвищення якості анотацій, зокрема через колективну валідацію та донавчання моделей на локальних даних.

Одне з ключових досліджень [1] описує підхід до постійного навчання моделей для історичних рукописів, що дозволяє оновлювати моделі з новими даними без повного перенавчання. В рамках обробки застосовується трифазова система: навчальний, валідаційний та тестовий набори. Це дозволяє досягати стабільності при поступовому розширенні корпусу.

У роботі [2] здійснено тестування платформи Transkribus на латинських текстах. Автори зазначають, що середній показник точності досяг 94,7% при використанні моделей, натренованих на понад 20 000 символів. Застосування Transkribus дозволяє автоматизувати транскрипцію, зменшуючи навантаження на бібліотеки та архіви.

У дослідженні [3] застосовано CNN до рукописів мовою Ґеєз із середньою точністю 89% на тестовому наборі. Були оброблені 12 000 зображень, поділені на тренувальний, валідаційний та тестовий набори (80/10/10).

У огляді датасетів [4] підкреслюється, що лише 18% з 36 відомих історичних наборів містять розмітку на рівні символів. Дослідники пропонують стандартизацію валідації: по 10 прикладів на клас для тренування, тестування і виключення.

У дослідженні [5] проведено аналіз HTR на середньовічних латинських та французьких текстах. Модель демонструє точність розпізнавання 82,5% при використанні лише 200 вручну анотованих сторінок.

У роботі [6] розглядається мультиалфавітне розпізнавання із застосуванням hybrid CNN-LSTM моделей. Найкращий результат – 93,2% точності – досягнутий на корпусі з 5 мовами (арабська, хінді, бенгальська, англійська, урду).

Дослідження [7] показали, що середній CER (Character Error Rate) зменшується на 18% при донавчанні моделей Transkribus на локальних багатомовних архівах.

В рамках проєкту DigitalMaktaba[8] було оброблено 100 документів арабською, перською та урду, створено векторне представлення текстів, що дозволяє автоматичне групування за темами з точністю 91,3%.

В дослідженні[9] запропоновано новий підхід на основі Visual Language Models та GAN. Середній CER у тесті на корпусі середньовічних текстів становив 11,2% – покращення на 7,8% порівняно з базовою моделлю CNN.

Огляд[10] акцентує увагу на системах автоматичної анотації, що використовують CNN та ResNet. Найвищу точність (95,4%) було зафіксовано при розпізнаванні англійських рукописів, що оцифровані з архівів Університету Османа (Індія).

На основі аналізу десяти (табл. 1) досліджень можна зробити висновок, що успішне розпізнавання багатомовних рукописів залежить не лише від архітектури моделі, але й від методів збору, структурування та валідації даних. Найвищу точність було досягнуто при використанні великих анотованих корпусів, у поєднанні з CNN або їхніми гібридними формами. Ефективними виявилися і стратегії донавчання на локальних корпусах (Capurro et al.) та використання нових підходів як Visual Language Models (Aguilar, 2024). У таблиці 1 нижче зведено основні кількісні результати.

Таблиця 1

Порівняння досліджень в розпізнаванні багатомовних рукописів

№	Автори	Рік	Методологія	Мова / корпус	Точність / CER (%)	Кількість прикладів
1	Schomaker [1]	2020	Lifelong learning, HTR	Історичні документи	–	–
2	Milioni [2]	2020	Transkribus + ML	Латинська	94.7	>20,000 символів
3	Gurmu [3]	2021	CNN	Геез	89.0	12,000 зображень
4	Nikolaidou et al. [4]	2022	Dataset analysis	36 корпусів	–	18% мають розмітку символів
5	Aguilar & Jolivet [5]	2023	HTR	Латинська, французька	82.5	200 сторінок
6	Sinwar et al. [6]	2021	CNN-LSTM	5 мов	93.2	–
7	Capurro et al. [7]	2023	Transkribus + донавчання	Багатомовні архіви	CER ↓ на 18%	–
8	Bergamaschi et al. [8]	2022	Векторизація + тематична класиф.	Арабська, перська, урду	91.3	100 документів
9	Aguilar [9]	2024	Visual LMs + GAN	Середньовічні тексти	CER 11.2 (↓7.8%)	–
10	Deepa et al. [10]	2024	CNN + ResNet	Англійська (архіви Індії)	95.4	–

Таблиця 1 дозволяє легко оцінити вплив методологічних рішень на точність розпізнавання. Такі дослідження демонструють важливість використання адаптивних моделей та гнучких підходів до валідації в умовах багатомовного середовища. Найбільш ефективними виявляються системи з можливістю локального донавчання, підтримкою розмітки на рівні символів та гібридними архітектурами, що поєднують CNN з трансформерами або рекурентними мережами.

Мета статті – системно описати архітектуру напівавтоматизованої платформи для сегментації, анотації й класифікації символів із багатомовних архівних рукописних текстів, що поєднує попередню обробку зображень, колективний лейблінг та формування мультимедійного датасету.

Задачі дослідження:

1. Проектування модуля попередньої обробки – визначити послідовність конвертації PDF → растрове зображення (600 dpi), бінаризації за Отсу, виділення рядків, слів і символів із фіксацією позиційних метаданих.
2. Розробка клієнт-серверного інтерфейсу анотації – описати архітектуру Flask-додатку з базою SQLite, механізмом розподілу блоків символів між 3–5 анотаторами, консенсусною валідацією та логуванням дій.
3. Формування структури мультимедійного датасету – спроектувати схему таблиць для збереження лейблів із полем language, автоматизувати експорт розмітки в CSV із класифікацією за мовами й алфавітами.

Виклад основного матеріалу. Систему планується реалізувати у вигляді клієнт-серверного веб-додатку, що повинно забезпечити ефективну взаємодію користувачів з інтерфейсом анотації рукописних символів та зробити її доступною.

На рисунку 1 представлено розроблену архітектуру напівавтоматизованої системи анотації багатомовних архівних рукописних текстів.

Серверна логіка реалізована за допомогою мікрофреймворку Flask, що дозволяє обробляти HTTP-запити, управляти сесіями, обробляти форму реєстрації та авторизації користувачів, а також динамічно надавати дані з бази даних для відображення на сторінці анотації. Серверна частина взаємодіє з базою даних SQLite (блок 5), у якій зберігається інформація про:

- зареєстрованих користувачів (таблиця users (блок 6));
- доступні до анотації символи (таблиця symbols (блок 7));
- результати лейблінгу (таблиця labels (блок 8)).

Кожен запис у таблиці labels містить посилання на користувача (user_id), зображення символу (symbol_id), відповідну анотацію (label), слово(word) та мову(language). Для кожної групи користувачів формується індивідуальний набір ще неанотованих символів, що гарантує уникнення дублювання результатів.

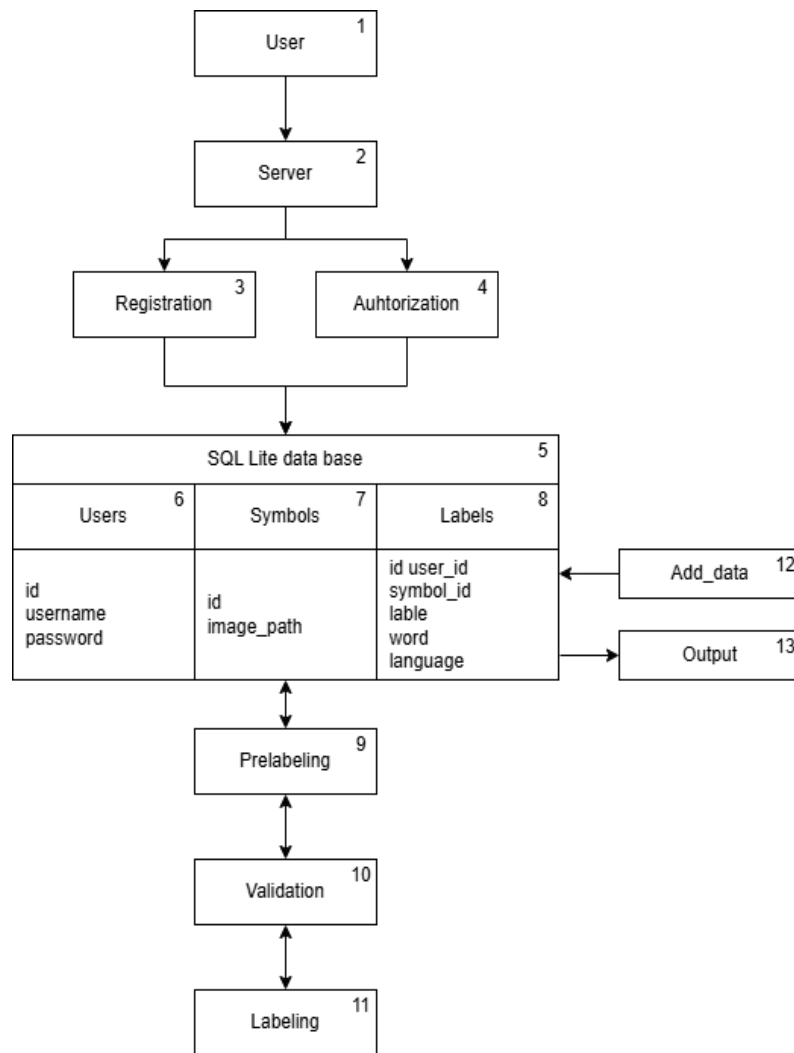


Рис. 1. Архітектура запропонованої системи

Інтерфейс користувача реалізований на основі HTML-шаблонів із використанням шаблонізатора Jinja2, що забезпечує генерацію динамічного веб-контенту та інтеграцію з серверною логікою.

В процесі роботи системи можна виділити такі ключові етапи:

1. Завантаження даних. Скрипт Add data (блок 11) відповідає за імпорт в базу даних попередньо оброблених зображень символів у вигляді PNG-зображень розміром 64x64 пікселі сегментованих з архівних документів в форматі PDF взятих з центрального. Він здійснює ітерацію по файлах у директорії static/symbols, перевіряє відсутність дублювання у базі даних, та додає нові записи до таблиці symbols. Кожен запис містить відносний шлях до зображення, що дозволяє коректно інтегрувати файл у систему відображення у браузері. Тепер система готова до роботи.

2. Авторизація. Після встановлення з'єднання з сервером (блок 2), користувач – User (блок 1) автоматично перенаправляється на сторінку автентифікації, де має змогу або здійснити реєстрацію нового облікового запису – Registration (блок 3), або виконати вхід до системи за допомогою наявних облікових даних – Authorization (блок 4). В обох випадках відбувається звернення до таблиці users (блок 6) шляхом виконання відповідних SQL-запитів, що дозволяє здійснювати перевірку автентичності та обробку облікової інформації.

Після успішної авторизації користувача система перенаправляє його на сторінку інтерфейсу розмітки символів (блок 9), яка забезпечує інтерактивну взаємодію з даними. Зокрема, реалізовано можливість перегляду зображення символу, введення відповідної текстової мітки та надсилання результатів розмітки на сервер. Подані анотації фіксуються в таблиці labels (блок 8) за допомогою SQL-запитів, із прив'язкою до ідентифікатора користувача та символу.

Для візуалізації зображення символу використовується HTML-компонент , шлях до якого формується динамічно через функцію Flask url_for('static', filename=...), що забезпечує сумісність із системою розподілу статичних ресурсів. Після кожного завершеного етапу розмітки сторінка автоматично

оновлюється та завантажує наступне зображення для анотації. У разі відсутності нерозмічених символів, інтерфейс інформує користувача про завершення доступного набору розмітки відповідним повідомленням.

3. Лейблінг. Процес лейблінгу організовано із урахуванням принципів колективного розмічування з багаторівневою перевіркою якості. Кожен документ, що завантажується до системи, може містити значну кількість символів – наприклад, до 10 000 одиниць. Для забезпечення ефективного розподілу навантаження та паралельної обробки, усі символи поділяються на дискретні блоки фіксованого розміру, наприклад, по 2000 символів у кожному.

Кожен блок призначається групі з трьох-п'яти користувачів, які незалежно здійснюють анотацію кожного символу в межах виділеного фрагмента. Такий підхід забезпечує можливість багатоверсійної оцінки кожного елементу та дозволяє реалізувати механізм консенсусної перевірки результатів.

З огляду на те, що джерельні документи, які підлягають обробці, можуть бути написані різними мовами – зокрема українською, польською, російською, а також містити фрагменти транслітерованого українського тексту латиницею – виникає потреба у фіксації мовної приналежності кожного зразка символу. Для вирішення цієї задачі передбачається додавання до інтерфейсу анотації відповідного елемента взаємодії з користувачем – зокрема поля вибору мови або відповідної позначки.

Після завершення первинної розмітки система формує агреговану таблицю анотацій, в якій для кожного символу здійснюється порівняння відповідей користувачів. У випадку, коли усі або більшість респондентів надали ідентичну мітку, результат автоматично вважається достовірним, цей процес називається валідацією (блок 10). У разі розбіжностей передбачається застосування механізму голосування, тобто присвоюється та мітка яку назвала більшість користувачів. Контекстна перевірка дозволяє зменшити кількість помилок, пов'язаних із хибним прочитанням окремих літер, зокрема у випадках, коли символи мають схожу графічну форму (наприклад, «i» та «j», або «n» та «p»). Після валідації відбувається остаточне маркування, або ж Labeling (блок 11) правильний варіант записується в базу даних labels (блок 8).

Запропонована багатокористувацька стратегія розмітки дозволяє суттєво підвищити надійність результатів анотації, знизити ризики суб'єктивного сприйняття з боку окремих користувачів, та створити передумови для формування якісних навчальних вибірок для систем автоматичного розпізнавання рукописного тексту.

4. Експорт даних. Після завершення процесу розмітки даних, окремий скрипт Output (блок 13) формує CSV-файл із усіма анотаціями. Він здійснює об'єднання таблиць symbols (блок 7) і labels (блок 8) за допомогою операції JOIN та експортує дані у форматі: label,image_path,word,language

Цей файл може бути використаний для подальшого навчання моделей розпізнавання символів на основі глибокого навчання.

Висновки. У межах проведеного дослідження розроблено архітектуру інтелектуальної системи для напівавтоматизованої анотації рукописних символів історичних документів у багатомовному та мульталфавітному середовищі. Створена архітектура повинна забезпечити функціонування сервісу, що включає реєстрацію користувачів, розподіл завдань розмітки, інтерактивне введення міток, фіксацію результатів у централізованій базі даних та динамічне відображення зображень символів, також наповнення бази даних символами для розмітки та експорт її результатів в форматі csv для подальшого використання в якості дата-сету для навчання нейронних мереж.

Список використаних джерел:

1. Schomaker, L. Lifelong learning for text retrieval and recognition in historical handwritten document collections. *Handwritten historical document analysis, recognition and retrieval—state of the art and future trends*. World Scientific, London, 2020. 221-248.
2. Milioni, N. Automatic transcription of historical documents: Transkribus as a tool for libraries, archives and scholars. *DiVA Portal*. 2020.
3. Gurmu, M. G. Offline handwritten text recognition of historical Ge'ez manuscripts using deep learning techniques. *ResearchGate PDF*. 2021.
4. Nikolaidou, K., Seuret, M., Mokayed, H., & Liwicki, M. (2022). A survey of historical document image datasets. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*, 25(4), 305-338.
5. Aguilar, S. T., & Jolivet, V. Handwritten text recognition for documentary medieval manuscripts. *HAL*. 2023.
6. Sinwar, D., Dhaka, V. S., Pradhan, N., & Pandey, S. Offline script recognition from handwritten and printed multilingual documents: a survey. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*. 2021. 24(1), 97-121.
7. Capurro, C., Provatorova, V., & Kanoulas, E. Experimenting with training a neural network in transkribus to recognise text in a multilingual and multi-authored manuscript collection. *Heritage*, 2023. 6(12), 7482-7494.
8. Bergamaschi, S., De Nardis, S., Martoglia, R., Ruozzi, F., Sala, L., Vanzini, M., & Vigliermo, R. A. Novel perspectives for the management of multilingual and multialphabetic heritages through automatic knowledge extraction: The digitalmaktaba approach. *Sensors*, 2022. 22(11), 3995.

9. Aguilar, S. T. Handwritten Text Recognition for Historical Documents using Visual Language Models and GANs. HAL. 2024

10. Deepa, A., Srija, B., Jabeen, M., Kankar, K. R., Lakshmi, B. J., & Negi, A. A Review on Automated Annotation System for Document Text Images. In 2024 1st International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU) (pp. 1-6). IEEE. 2024.

References:

1. Schomaker, L. (2020). Lifelong learning for text retrieval and recognition in historical handwritten document collections. *Handwritten historical document analysis, recognition and retrieval—state of the art and future trends*. World Scientific, London, 221-248.

2. Milioni, N. (2020). Automatic transcription of historical documents: Transkribus as a tool for libraries, archives and scholars. DiVA Portal.

3. Gurmu, M. G. (2021). Offline handwritten text recognition of historical Ge'ez manuscripts using deep learning techniques. ResearchGate PDF.

4. Nikolaidou, K., Seuret, M., Mokayed, H., & Liwicki, M. (2022). A survey of historical document image datasets. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*, 25(4), 305-338.

5. Aguilar, S. T., & Jolivet, V. (2023). Handwritten text recognition for documentary medieval manuscripts. HAL.

6. Sinwar, D., Dhaka, V. S., Pradhan, N., & Pandey, S. (2021). Offline script recognition from handwritten and printed multilingual documents: a survey. *International Journal on Document Analysis and Recognition (IJDAR)*, 24(1), 97-121.

7. Capurro, C., Provatorova, V., & Kanoulas, E. (2023). Experimenting with training a neural network in transkribus to recognise text in a multilingual and multi-authored manuscript collection. *Heritage*, 6(12), 7482-7494.

8. Bergamaschi, S., De Nardis, S., Martoglia, R., Ruozzi, F., Sala, L., Vanzini, M., & Vigliermo, R. A. (2022). Novel perspectives for the management of multilingual and multialphabetic heritages through automatic knowledge extraction: The digitalmaktaba approach. *Sensors*, 22(11), 3995.

9. Aguilar, S. T. (2024). Handwritten Text Recognition for Historical Documents using Visual Language Models and GANs. HAL.

10. Deepa, A., Srija, B., Jabeen, M., Kankar, K. R., Lakshmi, B. J., & Negi, A. (2024, March). A Review on Automated Annotation System for Document Text Images. In 2024 1st International Conference on Cognitive, Green and Ubiquitous Computing (IC-CGU) (pp. 1-6). IEEE.

Кошова О. П., кандидат педагогічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Полтавського університету економіки і торгівлі
ORCID: 0000-0003-0794-6774

Черненко О. О., кандидат фізико-математичних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інформаційних технологій
Полтавського університету економіки і торгівлі
ORCID: 0000-0002-9084-0999

Комар І. І., магістр спеціальності «Комп'ютерні науки»
Полтавського університету економіки і торгівлі
ORCID: 0009-0009-3140-268X

РОЗРОБКА ПЛАТФОРМИ ДЛЯ ВЕДЕННЯ БЛОГУ ВИКЛАДАЧА

Метою статті є аналіз архітектури програмного забезпечення для блогу викладача та опис його основних компонентів, які забезпечують ефективне управління контентом та швидку взаємодію з користувачами. Висвітлюються підходи до розробки адміністративного вебдодатку та публічного вебсайту, їх взаємодія через API, а також використання сучасних технологій, таких як Next.js, MongoDB та JWT, для досягнення стабільності, масштабованості та безпеки системи.

Архітектура програмного забезпечення складається з адміністративного вебдодатку (Frontend і Backend) та публічного вебсайту (Frontend). Адміністративний інтерфейс створений на платформі Next.js, що поєднує серверний рендеринг (SSR) та клієнтський рендеринг, забезпечуючи високу швидкість завантаження сторінок. Frontend частина дозволяє викладачам керувати контентом блогу, включаючи створення, редагування та видалення статей, книг та інформації про автора. Backend частина реалізована для обробки запитів, управління базою даних MongoDB, аутентифікації та перевірки прав доступу через JWT. Публічний вебсайт використовує технології статичної генерації сторінок (SSG) та SSR, що забезпечує оптимальну продуктивність та швидке завантаження контенту. Також розглянуто сценарії використання, включаючи авторизацію адміністратора, керування статтями, книгами та налаштуваннями. Для хостингу вибрано платформу Vercel, яка забезпечує автоматичне розгортання через GitHub та підтримку CI/CD.

Результати дослідження підтверджують ефективність вибраної архітектури для забезпечення швидкої та безпечної роботи блогу викладача. Використання Next.js, MongoDB та JWT дозволяє створити гнучку та масштабовану систему з можливістю розширення функціоналу. Публічний вебсайт надає користувачам доступ до статей і книг без аутентифікації, а адміністративний вебдодаток забезпечує зручне управління контентом. Обрані технології сприяють високій продуктивності та зручності використання системи.

Ключові слова: платформа, блог, викладач, освітній процес.

Koshova O. P., Chernenko O. O., Komar I. I. Developing a platform for teacher blogging

The purpose of the article is to analyze the software architecture for a teacher's blog and describe its main components that ensure effective content management and quick interaction with users. It covers approaches to developing an administrative web application and a public website, their interaction via API, as well as the use of modern technologies such as Next.js, MongoDB, and JWT to achieve system stability, scalability, and security.

The software architecture consists of an administrative web application (Frontend and Backend) and a public website (Frontend). The administrative interface is built on the Next.js platform, which combines server-side rendering (SSR) and client-side rendering, ensuring high page loading speed. The frontend part allows teachers to manage blog content, including creating, editing, and deleting articles, books, and author information. The backend part is implemented for query processing, MongoDB database management, authentication, and access control via JWT. The public website uses static page generation (SSG) and SSR technologies, which ensure optimal performance and fast loading of content. Also considered are use cases, including administrator authorization, article, book and settings management. The Vercel platform was chosen for hosting, which provides automatic deployment via GitHub and CI/CD support.

The results of the study confirm the effectiveness of the chosen architecture for ensuring fast and secure operation of the teacher's blog. The use of Next.js, MongoDB, and JWT allows you to create a flexible and scalable system with the ability to expand functionality. The public website provides users with access to articles and books without authentication, and the administrative web application provides convenient content management. The selected technologies contribute to high productivity and ease of use of the system.

Key words: platform, blog, teacher, educational process.

Постановка проблеми. У сучасній системі освіти зростає значення цифрових технологій, що сприяють кращій передачі знань і налагодженню контакту між викладачем та студентом. Важливу роль у цьому процесі відіграють персональні блоги викладачів. Вони дають змогу публікувати навчальні матеріали, ділитися досвідом, поширювати наукові доробки й комунікувати зі студентами. Але створення та підтримка такого блогу вимагає розробки ефективної архітектури ПЗ, яка забезпечить зручність керування, захист доступу, високу швидкість та масштабованість. Брак комплексних рішень із швидким завантаженням, простим редагуванням і захистом даних підкреслює необхідність створення спеціалізованої системи для потреб викладачів.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження [1–11] вказують на популяризацію персоналізованих блогів викладачів як засобу дистанційного навчання та обміну знаннями. Наукові праці наголошують на потребі в безпеці, швидкодії та зручному адмініструванні. Наприклад, у [3] розглядається використання соціальних медіа для постійної комунікації у вищій школі, а в [4] – їх вплив на освітній процес.

Метою роботи є розробка платформи для ведення блогу викладача.

Виклад основного матеріалу. Архітектура програмного забезпечення, яка лежить в основі функціонування блогу викладача, складається з двох ключових складових: адміністративного вебдодатку та публічного вебсайту. Адміністративний вебдодаток, у свою чергу, поділяється на дві частини – клієнтську (Frontend) та серверну (Backend). Публічний вебсайт є вітриною для відображення навчального та наукового контенту. Всі ці компоненти інтегруються між собою через чітко структуровані інтерфейси прикладного програмування (API), що забезпечує надійність, узгодженість у роботі та легкість масштабування платформи.

Адміністративна частина (інтерфейс) реалізована з використанням сучасної фреймворк-платформи Next.js, яка поєднує у собі переваги серверного рендерингу (SSR) та клієнтського рендерингу. Такий підхід забезпечує високу швидкість завантаження сторінок навіть при великій кількості контенту. Інтерфейс адміністратора розділений на:

Frontend (клієнтська частина) – дозволяє викладачу керувати вмістом блогу. До функціональності належать: створення нових статей, оновлення та редагування вже опублікованих, їхнє видалення, а також перегляд статистики відвідування, дій користувачів тощо. Окрім того, реалізовано можливість керування списком книг: додавання нових видань, редагування інформації про них та демонстрація цих даних на публічному сайті.

Завдяки можливостям Next.js усі зміни контенту оперативно оновлюються і миттєво відображаються користувачу завдяки серверному рендерингу.

Backend (серверна частина) – відповідає за обробку всіх запитів, що надходять як з адміністративного інтерфейсу, так і з публічного сайту. Тут реалізовано систему аутентифікації користувачів, контроль доступу до окремих функцій, взаємодію з базою даних. Усі операції з додавання, редагування або видалення контенту, таких як статті, книги чи інформація про автора, передаються через API до серверної частини, яка в свою чергу зберігає дані у базі MongoDB.

Публічний вебсайт, що також базується на Next.js, слугує зовнішньою частиною блогу, доступною для всіх користувачів. Він надає змогу переглядати всі опубліковані статті, книги, а також біографічну інформацію про викладача. Платформа підтримує статичну генерацію сторінок (SSG) поряд із серверним рендерингом, що дозволяє заздалегідь формувати сторінки та зберігати їх у кеші. Такий підхід суттєво пришвидшує їх завантаження, навіть при великій кількості одночасних відвідувачів.

MongoDB використовується як основне сховище для всіх даних блогу. Це документно-орієнтована база даних, яка дозволяє гнучко зберігати інформацію у вигляді документів різного формату. Вона чудово підходить для роботи з динамічним контентом, що змінюється з часом, і легко масштабується, дозволяючи збільшити обсяг даних без втрати продуктивності.

Система автентифікації побудована на основі технології JWT (JSON Web Token). Вона забезпечує захист адміністративної частини платформи, дозволяючи доступ до редагування контенту лише авторизованим користувачам. Такий підхід гарантує безпеку облікових даних і зменшує ризики несанкціонованого доступу (рис. 1).

Для опису роботи платформи для ведення блогу побудовано діаграму прецедентів (рис. 2).

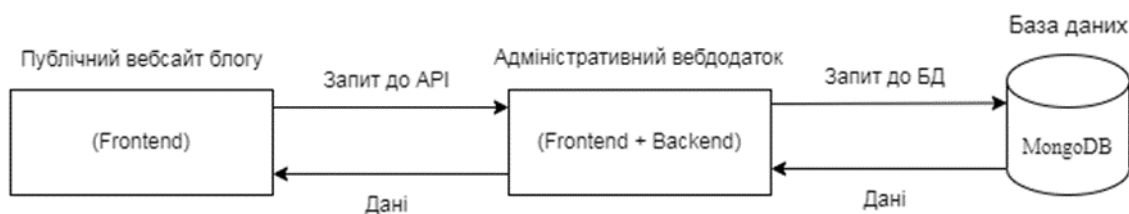


Рис. 1. Архітектура програмного забезпечення



Рис. 2. Діаграма прецедентів

Прецедент: Авторизація

Учасник: адміністратор блогу.

Початковий стан: адміністратор ще не увійшов у систему.

Кінцевий стан: адміністратор успішно авторизований.

Опис дій:

Адміністратор вводить свій логін (email) і пароль.

Натискає кнопку «Увійти».

Система перевіряє правильність введених даних.

Після успішної перевірки адміністратор отримує доступ до системи.

Прецедент: Управління статтями

Учасник: адміністратор блогу.

Початковий стан: адміністратор перебуває в системі.

Кінцевий стан: дані про статті оновлено – додано, змінено або видалено.

Опис дій:

Адміністратор відкриває розділ «Статті».

На екрані з'являється перелік доступних публікацій.

Вибирає потрібну статтю та виконує необхідну дію: додає нову, редагує або видаляє.
Дії обробляються відповідним функціоналом системи.

Прецедент: Управління книгами

Учасник: адміністратор блогу.

Початковий стан: адміністратор авторизований.

Кінцевий стан: відомості про книги оновлено.

Опис дій:

Адміністратор переходить до розділу «Книги».

Виводиться список наявних публікацій.

Обирає конкретну книгу для редагування, додає нову або видаляє наявну.

Система фіксує внесені зміни.

Прецедент: Налаштування профілю

Учасник: адміністратор блогу.

Початковий стан: авторизований адміністратор.

Кінцевий стан: особисті дані викладача оновлено.

Опис дій:

Переходить до розділу «Налаштування».

Переглядає доступні параметри зміни профілю.

Редагує власні персональні дані або додає додаткову інформацію про себе.

Система зберігає зміни до профілю.

Прецедент: Перегляд статті

Учасник: користувач.

Початковий стан: користувач знаходиться на сайті блогу.

Кінцевий стан: стаття переглянута.

Опис дій:

Користувач переходить до розділу «Статті».

Відображається перелік усіх публікацій.

Обирає потрібну статтю.

Ознайомлюється з її змістом.

Прецедент: Перегляд книги

Учасник: користувач.

Початковий стан: користувач відвідує сайт блогу.

Кінцевий стан: переглянуто інформацію про вибрану книгу.

Опис дій:

Користувач відкриває розділ «Книги».

Перед ним з'являється список доступних видань.

Обирає необхідну книгу.

Переглядає її зміст або опис.

Прецедент: Перегляд інформації про автора

Учасник: користувач.

Початковий стан: відкрито сторінку блогу.

Кінцевий стан: користувач ознайомився з інформацією про автора.

Опис дій:

Користувач натискає на вкладку «Про автора».

На екрані відображається біографічна інформація.

Користувач переглядає вміст сторінки.

Для розгортання проекту обрано платформу Vercel, оскільки вона забезпечує зручний та швидкий процес розгортання проекту. Її перевагами є автоматизація, підтримка CI/CD, простота інтеграції з репозиторіями та можливість налаштування змінних середовища.

Спочатку підготовлено проєкт до розгортання. Для цього встановлено всі залежності за допомогою «npm install», а також перевірено локальну роботу програми. Особливу увагу потрібно приділили файлу package.json, у якому потрібно вказати скрипт для збірки «build»: «next build».

Наступним кроком було створення акаунту на платформі Vercel та інтеграція з репозиторієм проєкту через GitHub. Процес розгортання виконується автоматично після вибору репозиторію та натискання кнопки «Deploy». Платформа виконала збірку проєкту, а після успішного завершення надано посилання на готовий сайт. У разі виявлення помилок у роботі сайту їх виправлення у вихідному коді та збереження змін у репозиторію спричиняє автоматичний запуск повторного розгортання.

Щоб вказати свій домен на Vercel, необхідно перейти до налаштувань проєкту в панелі керування Vercel. У розділі «Domains» потрібно додати домен: «https://teacher-blog.vercel.app/». Проєкт готовий до використання.

Висновки з дослідження і перспективи подальших розвідок у цьому напрямі. Розроблена платформа базується на передових підходах до проектування програмного забезпечення, включаючи використання компонентної архітектури та модульного підходу до побудови інтерфейсу. Це забезпечило високу продуктивність, масштабованість та можливість подальшого розширення функціоналу.

Подальші дослідження можуть бути спрямовані на інтеграцію штучного інтелекту для персоналізації контенту, удосконалення механізмів безпеки та впровадження аналітичних інструментів для покращення взаємодії користувачів із платформою. Отримані результати можуть бути корисними для розробників освітніх вебрішень, а також для викладачів, які прагнуть підвищити якість цифрового навчального середовища.

Список використаних джерел:

1. Гуз К. М. Проектування і розробка персонального блогу викладача як засобу активізації пізнавальної діяльності учнів. Волинський національний університет імені Лесі Українки. 2023. Режим доступу: <https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/26961>.
2. Мартинюк О. В. Освітній блог як засіб професійної підготовки майбутніх вихователів закладів дошкільної освіти. Інформаційні технології і засоби навчання. 2022. Т. 87, № 3. С. 54-67. Режим доступу: <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/2425/1443>.
3. Kumar, S., Nanda, P. Social Media in Higher Education: A Framework for Continuous Engagement. *Journal of Educational Technology & Society*, 2020, 23(1), pp. 33-44.
4. Manca, S., Ranieri, M. Implications of social network sites for teaching and learning. Where we are and where we want to go. *Education and Information Technologies*, 2020, 22(2), pp. 605-622.
5. Василенко М., Горбаченко С., Слатвінська В., Чепурна О. Сценарне планування як інструмент безперервного бізнесу: WEB-технології (комплексний підхід) Інформаційні технології та суспільство. 2023. № 3. Режим доступу: <https://journals.maup.com.ua/index.php/it/article/view/2098>.
6. Слабінога М. О., Чабан С. В. Розробка веб-додатків в контексті оптимізації їх швидкодії. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2022. № 3. С. 45–52. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.3.7. Режим доступу: <https://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/219>.
7. Антоненко А. В., Балвак А. А., Цвик О. С., Ємелін Д. М., Гришковець Є. П. Інноваційні методи відображення інформації в веб-браузерах. Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки. 2024. № 1. С. 81–88. DOI: 10.32782/tnv-tech.2024.1.9. Режим доступу: <https://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/542>.
8. Д. М. Ольховський, С.В. Гаркуша, О. О. Черненко, В.О. Лазаренко Розробка сайту кафедри навчально-наукового інституту денної освіти. Збірник наукових праць національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова, № 1 (494), 2024, С. 119-125.
9. Олексійчук Ю. Ф., Ольховський Д.М., Ольховська О.В., Андрушків О. М., Проектування, розробка та тестування web-сервісу для вибору тем дипломних робіт. Системи та технології, № 1, № 1, с. 43-50. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-1-67.7>
10. О.П. Кошова, О.О. Черненко, Т.В. Чілікіна, І.І. Комар Особливості розробки web-застосунків для системи дистанційного навчання з допомогою бібліотеки React. Системи та технології, 2023, 65(1), С. 20-31. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.1-65.3>
11. Кошова О. П., Ольховська О.В., Тацій Д. С., Олексійчук Ю.Ф., Черненко О.О. РОЗРОБКА ВЕБ-ДОДАТКІВ ТА СЕРВІСІВ НА ПЛАТФОРМІ NODE.JS Таврійський науковий вісник. Серія: Технічні науки, 2023. Вип. 2. С. 78-89. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.9>

References:

1. Huz K. M. (2023) Proektuvannia i rozrobka personalnoho blohu vykladacha yak zasobu aktyvizatsii piznavalnoi diialnosti uchniv [Design and development of a teacher's personal blog as a means of activating students' cognitive activity]. *Volynskyi natsionalnyi universytet imeni Lesi Ukrainky. Rezhym dostupu: https://evnuir.vnu.edu.ua/handle/123456789/26961* [in Ukrainian]
2. Martyniuk O. V. (2022) Osvitnii bloh yak zasib profesiinoi pidhotovky maibutnikh vykhovateliv zakladiv doshkilnoi osvity [Educational blog as a means of professional training of future educators of preschool educational institutions]. *Informatsiini tekhnolohii i zasoby navchannia* [Information technologies and teaching aids] T. 87, № 3. S. 54-67. Rezhym dostupu: <https://journal.iitta.gov.ua/index.php/itlt/article/view/2425/1443> [in Ukrainian]
3. Kumar, S., Nanda, P. (2020) Social Media in Higher Education: A Framework for Continuous Engagement. *Journal of Educational Technology & Society*, 23(1), pp. 33-44.
4. Manca, S., Ranieri, M. (2020) Implications of social network sites for teaching and learning. Where we are and where we want to go. *Education and Information Technologies*, 22(2), pp. 605-622.
5. Vasylenko M., Horbachenko S., Slatvinska V., Chepurna O. (2023) Stsenarne planuvannia yak instrument bezperervnoho biznesu: WEB-tekhnohii (kompleksnyi pidkhid) [Scenario planning as a tool for continuous business: WEB technologies (comprehensive approach)] *Informatsiini tekhnolohii ta suspilstvo*. [Information

Technologies and Society]. № 3. Rezhym dostupu: <https://journals.maup.com.ua/index.php/it/article/view/2098> [in Ukrainian]

6. Slabinoha M. O., Chaban S. V. (2022) Rozrobka veb-dodatkov v konteksti optymizatsii yikh shvydkodii [Development of web applications in the context of optimizing their performance]. Tavriyskyi naukovi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky. [Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences.] № 3. S. 45–52. DOI: 10.32851/tnv-tech.2022.3.7. Rezhym dostupu: <https://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/219> [in Ukrainian]

7. Antonenko A. V., Balvak A. A., Tsvyk O. S., Yemelin D. M., Hryshkovets Ye. P. (2024) Innovatsiini metody vidobrazhennia informatsii v veb-brauzerakh [Innovative methods of displaying information in web browsers]. Tavriyskyi naukovi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky [Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences]. № 1. S. 81–88. DOI: 10.32782/tnv-tech.2024.1.9. Rezhym dostupu: <https://journals.ksauniv.ks.ua/index.php/tech/article/view/542> [in Ukrainian]

8. D. M. Olkhovskiy, S.V. Harkusha, O. O. Chernenko, V.O. (2024) Lazarenko Rozrobka сайту кафедри навчально-наукового інституту денної освіти [Development of the website of the Department of the Educational and Scientific Institute of Full-time Education]. Zbirnyk naukovykh prats natsionalnoho universytetu korablebuduvannia imeni admiral Makarova [Collection of Scientific Papers of the Admiral Makarov National Shipbuilding University], № 1 (494), S. 119-125. [in Ukrainian]

9. Oleksiichuk Yu. F., Olkhovskiy D.M., Olkhovska O.V., Andrushkiv O. M. (2024). Proiektuvannia, rozrobka ta testuvannia web-servisu dlia vyboru tem diplomnykh robot [Design, development and testing of a web-service for selecting thesis topics]. Systemy ta tekhnolohii [Systems and Technologies], № 1, № 1, s. 43-50. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2024-1-67.7> [in Ukrainian]

10. O.P. Koshova, O.O. Chernenko, T.V. Chilikina, I.I. Komar (2023) Osoblyvosti rozrobky web-zastosunkiv dlia systemy dystantsiinoho navchannia z dopomohoiu biblioteki React [Features of developing web applications for a distance learning system using the React library]. Systemy ta tekhnolohii [Systems and Technologies], 65(1), S.20-31. <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2023.1-65.3> [in Ukrainian]

11. Koshova O. P., Olkhovska O.V., Tatsii D. S., Oleksiichuk Yu.F., Chernenko O.O. (2023) ROZROBKA VEB-DODATKIV TA SERVISIV NA PLATFORMI NODE.JS [DEVELOPMENT OF WEB APPLICATIONS AND SERVICES ON THE NODE.JS PLATFORM] Tavriyskyi naukovi visnyk. Serii: Tekhnichni nauky [Tavria Scientific Bulletin. Series: Technical Sciences]. Vyp. 2. S. 78-89. <https://doi.org/10.32782/tnv-tech.2023.2.9> [in Ukrainian]

Поперешняк С. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри інформатики та програмної інженерії
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0000-0002-0531-9809

Чорнобривець Д. В., студент
Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
ORCID: 0009-0006-3647-93181

ПІДХІД ДО ВИЯВЛЕННЯ ДОСТУПНОСТІ ПАРКУВАЛЬНИХ МІСЦЬ НА ОСНОВІ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ

Зростання кількості транспортних засобів у міських районах створює значний тиск на інфраструктуру та загострює проблему нестачі паркувальних місць. Традиційні методи управління паркуванням часто не адаптуються до динамічного попиту та не забезпечують оновлення в режимі реального часу, тоді як існуючі рішення на основі датчиків є дорогими в установці та обслуговуванні. У цій статті представлено підхід на основі зору для виявлення доступності паркувальних місць у режимі реального часу, використовуючи досягнення комп'ютерного зору та технологій глибокого навчання.

Розроблена система інтегрує модель виявлення транспортних засобів на основі YOLO з аналізом геометричної області інтересу (ROI) для точного визначення статусів зайнятості паркувальних місць з відеопотоків. Гнучкий графічний інтерфейс користувача (GUI) був розроблений за допомогою PySide6 для візуалізації статусів паркування, підтримки інтерактивного управління паркувальним місцем та забезпечення динамічного налаштування через файли YAML.

Експериментальна перевірка на тестових наборах відеоданих продемонструвала ефективність системи у виявленні транспортних засобів у режимі реального часу, динамічній візуалізації доступності паркувальних місць та зручній адаптації до різноманітної геометрії паркувальних майданчиків.

Запропоноване рішення підвищує ефективність управління міськими паркувальним простором, скорочує час пошуку транспортних засобів, зменшує вплив на навколишнє середовище та закладає основу для майбутніх розширень, включаючи інтеграцію із системами бронювання, платіжними платформами та модулями розпізнавання номерних знаків. Модульна архітектура системи забезпечує масштабованість та застосовність до ініціатив «розумного міста», спрямованих на сталий міський рух.

Ключові слова: комп'ютерний зір, паркування, розпізнавання зображень, інтелектуальні транспортні системи, машинне навчання, відеоаналітика, міська інфраструктура, Інтернет всього, розумне місто.

Popereshnyak S. V., Chornobryvets D. V. A Computer Vision-Based Approach to Parking Space Availability Detection

The increasing number of vehicles in urban areas places significant pressure on infrastructure, exacerbating the problem of parking space shortages and causing congestion, elevated air pollution levels, and significant time losses for drivers searching for available spaces. In central areas of large cities, the inefficient distribution and utilization of parking resources is particularly critical. Traditional parking management methods often fail to address dynamic demand fluctuations and lack capabilities for real-time information updates. Moreover, existing sensor-based solutions are associated with high installation and maintenance costs, limiting their scalability and adoption.

To address these challenges, this paper presents a vision-based approach for real-time parking space availability detection, utilizing modern computer vision and deep learning technologies. The developed system leverages a pretrained YOLO (You Only Look Once) model, adapted and optimized for the detection of vehicles within parking environments based on live video streams. For accurate space monitoring, a geometric analysis of predefined regions of interest (ROIs) is implemented to match detected vehicles to specific parking spots and determine their occupancy status.

A flexible, user-friendly graphical user interface (GUI) has been developed using the PySide6 framework, providing real-time visualization of parking status, dynamic highlighting of available or occupied spaces, and interactive features for space assignment and guidance. An integrated ROI editor allows administrators to define and adjust parking layouts directly within the interface, facilitating rapid deployment and adaptation across various parking facility geometries. Configuration management via YAML files ensures system flexibility, supporting adjustable detection thresholds, resource paths, and modular scalability.

The system has been validated on test video datasets, demonstrating robust performance in detecting vehicles under different lighting and environmental conditions. It provides accurate, dynamic updates of parking space availability, significantly

reducing the time drivers spend searching for parking, improving traffic flow, and contributing to the reduction of fuel consumption and associated emissions.

The proposed approach advances the automation of urban parking management, aligning with the broader Smart City initiatives focused on enhancing the sustainability and livability of urban spaces. Furthermore, the modular architecture of the developed platform allows future extensions, including the integration of reservation systems, payment processing, license plate recognition (LPR) modules, and advanced analytics for predictive occupancy modeling.

The vision-based solution offers a cost-effective, scalable, and flexible alternative to traditional parking monitoring systems, positioning itself as a promising technological foundation for next-generation intelligent parking infrastructures.

Key words: computer vision, parking, image recognition, intelligent transportation systems, machine learning, video analytics, urban infrastructure, Internet of Everything, smart city.

Постановка проблеми. Станом на 2025 рік безперервна урбанізація та зростання кількості транспортних засобів, зокрема в містах України, істотно загострили проблему паркування, перетворивши її на один із ключових викликів сучасної міської мобільності. Нестача паркувальних місць, неефективне використання наявного простору, затори та тривалий час, витрачений водіями на пошук вільних місць, стали глобальними проблемами. Це призводить не лише до індивідуальних незручностей і підвищення рівня стресу серед водіїв, але й спричиняє серйозні соціально-економічні та екологічні наслідки: перевитрату пального, зростання викидів шкідливих речовин в атмосферу, поглиблення транспортних заторів і зниження загальної якості міського життя.

Традиційні методи управління паркувальним простором, що базуються на фізичному огляді або використанні окремих датчиків для кожного паркомісця, часто є неефективними, трудомісткими, дорогими в установці та обслуговуванні й не завжди забезпечують актуальну інформацію про заповненість паркінгу в реальному часі.

Враховуючи ці обмеження, актуальною є потреба у впровадженні інноваційних, автоматизованих рішень. Перспективною альтернативою виступають системи моніторингу паркувальних місць на основі технологій комп'ютерного зору [1, 2]. Використовуючи відеопотоки з камер спостереження, які часто вже інтегровані в інфраструктуру об'єктів, та сучасні алгоритми обробки зображень і глибокого навчання, такі системи дозволяють автоматично визначати статус паркомісць – виявляти вільні та зайняті місця з високою точністю та оперативністю. Це надає водіям своєчасну інформацію, сприяє оптимізації використання паркувального простору та підвищує ефективність міської мобільності загалом.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питання ефективного моніторингу паркувальних місць привернуло значну увагу дослідників в останні роки, і різні рішення використовують технології комп'ютерного зору та машинного навчання.

У роботі [3] була запропонована вдосконалена система виявлення паркувальних місць з використанням алгоритмів комп'ютерного зору наступного покоління. Це рішення наголошує на інтеграції моделей глибокого навчання для покращення точності виявлення в різних умовах навколишнього середовища. Однак, хоча система досягає високої продуктивності, вона значною мірою зосереджена на контрольованих середовищах і не має широкої валідації в динамічно змінних реальних умовах.

Аналогічно, у [4] була розроблена система моніторингу на основі відео, що включає як традиційні алгоритми машинного навчання, так і методи комп'ютерного зору. У цій роботі підкреслюються переваги безперервного моніторингу та прогнозного аналізу зайнятості паркувальних місць. Тим не менш, система вимагає значних обчислювальних ресурсів і передбачає стабільний та високоякісний відеопотік, що може бути складним завданням у міських умовах.

Попередні зусилля, наприклад, у [5], досліджували простіші підходи до обробки зображень для виявлення доступних паркувальних місць. Хоча ці методи були ефективними в середовищах з низькою складністю, вони продемонстрували обмеження при застосуванні до більш перевантажених та складних міських районів, де часті перекриття та мінливість навколишнього середовища є поширеними.

Інтеграція Інтернету речей (IoT) з комп'ютерним зором, як розглянуто в [6], представляє цікавий напрямок. Її система поєднує візуальні дані з мережами IoT для покращення можливостей моніторингу в режимі реального часу. Однак цей підхід вимагає надійної інфраструктури IoT, яка не завжди може бути доцільною або економічно ефективною, особливо для модернізації існуючого міського середовища.

У сфері спеціалізованих паркувальних споруд, таких як контейнерне перевезення в морських портах, наприклад, у [7], було досліджено використання систем зору на основі штучного інтелекту для оптимізації великомасштабної логістики паркування. Хоча це дослідження демонструє багатообіцяючі результати в конкретних промислових умовах, методи та системні архітектури не можна безпосередньо перенести на загальні сценарії паркування на міських вулицях.

У роботі [8] було запропоновано комплексний підхід до обробки даних в рамках інтелектуальних систем паркування як невід'ємного елемента інфраструктури розумного міста. Ця робота зосереджена на оптимізації збору, передачі та аналізу даних про паркування для підтримки інтелектуальних процесів прийняття рішень. Автори підкреслюють важливість ефективного управління даними для покращення моніторингу в режимі реального часу, зменшення заторів та покращення міської мобільності.

Незважаючи на помітний прогрес, кілька критичних прогалин залишаються невирішеними:

- Існуючі системи часто припускають оптимальні умови та є недостатньо стійкими до змінного освітлення, погоди та реальних сценаріїв оклюзії, поширених у міських ландшафтах.
- Багато запропонованих рішень вимагають дорогого обладнання або інтенсивних обчислювальних ресурсів, що обмежує їх практичну масштабованість для широкого розгортання по всьому місту.
- Забезпечення виявлення, обробки та зручного зворотного зв'язку в реальному часі залишається проблемою, особливо в умовах високого трафіку, де швидке прийняття рішень є важливим.
- Сучасним системам часто бракує інтуїтивно зрозумілих інтерфейсів для взаємодії з користувачем у реальному часі та вони недостатньо інтегровані з ширшими інфраструктурами розумного міста.

З огляду на ці проблеми, існує очевидна потреба в розробці інтелектуальної, масштабованої системи моніторингу та управління паркуванням у режимі реального часу, яка використовує досягнення глибокого навчання, ефективної відеоаналітики та адаптивних інтерфейсів користувача, зберігаючи при цьому доступність та простоту розгортання. Це дослідження має на меті усунути ці прогалини, запропонувавши нове рішення на основі комп'ютерного зору, адаптоване для динамічного міського середовища.

Постановка завдання. Метою дослідження є підвищення ефективності управління паркувальними ресурсами в умовах міського середовища, зменшити час пошуку вільного місця та покращити зручність для користувачів завдяки створенню інтелектуальної програмної системи для моніторингу та управління зайнятістю паркувальних місць у режимі реального часу на основі методів комп'ютерного зору, здатної до автоматичної детекції транспортних засобів, візуалізації статусів місць та забезпечення базової взаємодії з користувачем через конфігурований інтерфейс.

Для досягнення поставленої мети сформулюємо задачі дослідження:

- Провести аналіз існуючих підходів до моніторингу паркувальних місць та методів комп'ютерного зору для детекції транспортних засобів.
- Імплементувати та адаптувати модель глибокого навчання YOLO для виявлення транспортних засобів на основі Python, OpenCV та PyTorch.
- Розробити алгоритм геометричного аналізу зон інтересу (ROI) для визначення статусу паркомісць.
- Спроекувати інтерактивний інструмент для налаштування полігональних ROI із використанням PySide6.
- Інтегрувати систему управління конфігурацією на основі YAML для підвищення гнучкості налаштування.

Результати розробленого програмного забезпечення можуть стати корисним інструментом для впровадження на комерційних та приватних паркувальних об'єктах, а також слугувати основою для створення комерційних систем управління паркінгами різного типу (ТЦ, офісні центри, житлові комплекси). Обраний підхід дозволяє створити гнучку та адаптивну систему, здатну функціонувати в умовах різних паркувальних середовищ. Інтеграція інструментів для визначення ROI та зовнішньої конфігурації параметрів підвищує практичну цінність розробки та спрощує її впровадження.

Використання таких технологій дозволяє автоматично визначати статус паркувальних місць, скорочуючи час на пошук вільного місця і покращуючи ефективність паркування в місті. Також, охоплює застосування інтелектуальних алгоритмів для ефективного використання паркувальних зон, що має на меті покращення якості життя водіїв і зниження навантаження на транспортні системи в густонаселених районах.

Виклад основного матеріалу. Проаналізувавши переваги та недоліки різних підходів, для реалізації програмного прототипу в межах даної роботи було обрано комбінацію детекції об'єктів за допомогою моделі YOLO та аналізу положення виявлених автомобілів відносно полігональних ROI, визначених вручну користувачем.

Такий вибір обумовлений високою швидкістю роботи YOLO, що є критичним для систем реального часу, та гнучкістю ручного визначення ROI для адаптації до різних конфігурацій паркінгів. Для визначення зайнятості на даному етапі використовується аналіз входження центральної точки виявленого об'єкта в ROI, однак передбачається можливість подальшого вдосконалення з використанням методу IoU. Важливим аспектом є те, що для досягнення максимальної точності в реальних умовах обрана модель YOLO потребуватиме додаткового навчання (fine-tuning) на датасетах, що містять зображення цільового паркувального майданчика за різних умов освітлення та погоди. Для взаємодії з користувачем та конфігурації ROI розроблено спеціалізований графічний інтерфейс. Використання зовнішнього файлу конфігурації забезпечує гнучкість налаштування системи. Даний підхід створює високі вимоги до апаратного забезпечення (бажано наявність GPU) для забезпечення обробки відеопотоку в реальному часі.

Аналіз допоміжних програмних засобів та засобів розробки. Python є кращим вибором для більшості задач машинного навчання та комп'ютерного зору через свою простоту, гнучкість та величезну екосистему бібліотек. Він також добре підходить для розробки десктопних додатків завдяки наявності потужних GUI-фреймворків.

Щодо навчання моделі: У прототипі використовується модель YOLO, тренувана на загальних датасетах, що дає базову здатність до детекції. Однак, для досягнення максимальної точності та надійності

в специфічних умовах цільового паркувального майданчика (унікальні ракурси, освітлення, погодні умови), передбачається подальший етап донавчання (fine-tuning). Використовуючи техніку трансферного навчання (transfer learning), базова модель буде доадаптована на власному, ретельно зібраному та розміченому датасеті зображень саме з цього паркінгу. Це дозволить спеціалізувати детектор для безпомилкового розпізнавання автомобілів навіть за складних умов експлуатації.

Таким чином, для розробки було обрано набір сучасних, потужних та добре інтегрованих між собою інструментів, що дозволяють ефективно реалізувати систему комп'ютерного зору з графічним інтерфейсом користувача. Використання попередньо навченої моделі YOLO з перспективою подальшого донавчання забезпечує швидке прототипування та шлях до досягнення високої точності в реальних умовах.

Розробка вимог до системи моніторингу паркувальних місць. Програмне забезпечення повинно забезпечувати виконання наступних основних функцій (Рис. 1).

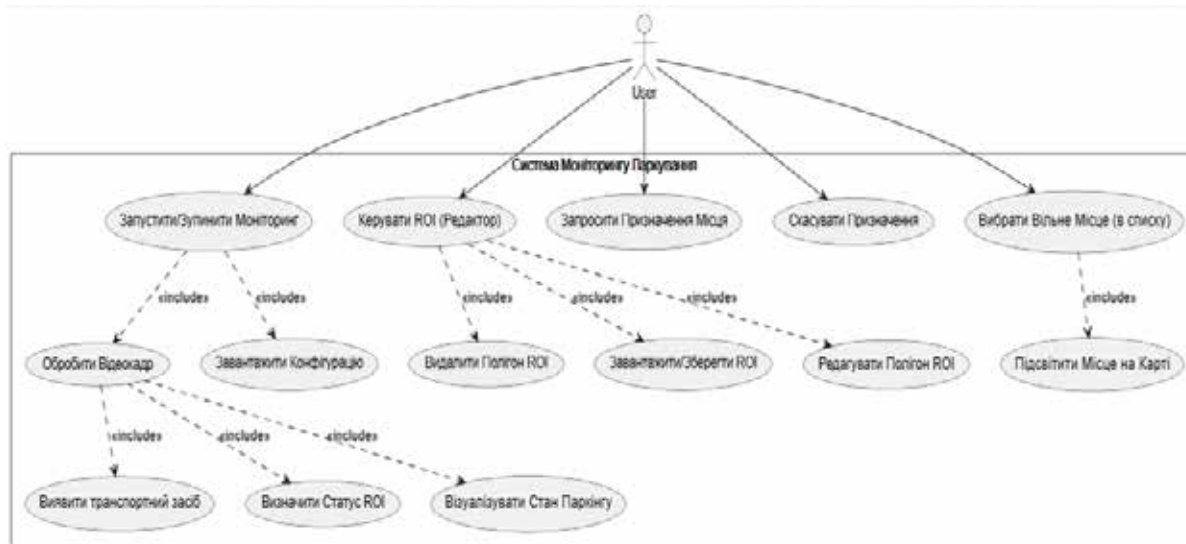


Рис. 1. Діаграма варіантів використання системи

У межах даної роботи реалізується десктопний застосунок, призначений для автоматизованого моніторингу зайнятості паркувальних місць шляхом аналізу відеопотоку з використанням навченої моделі детекції об'єктів YOLO та аналізу положення виявлених транспортних засобів відносно визначених зон інтересу. Мета даного дослідження досягається шляхом реалізації логічної частини програми та графічного інтерфейсу користувача. Логічна частина відповідає за відеоаналіз (детекція ТЗ, статус ROI, керування зонами), а інтерфейс – за візуалізацію результатів моніторингу та взаємодію з користувачем.

Архітектура програмного забезпечення. Для розробки додатка з інтерфейсом застосовано модульний підхід з розділенням логіки та представлення для гнучкості архітектури. Враховуючи, що основні дані, якими оперує прототип – це конфігурація зон інтересу (ROI) та параметри системи, а також вимогу щодо їх редагування користувачем, ці дані зберігаються локально у файлах (.pkl для ROI, yaml для конфігурації), що є простішим рішенням для прототипу порівняно з розгортанням окремої бази даних.

Взаємодія між компонентами GUI та логікою обробки реалізована з використанням механізму сигналів та слотів фреймворку PySide6 (Qt). Обробка відеопотоку, як найбільш ресурсоемна задача, винесена в окремий потік (QThread), щоб не блокувати основний потік графічного інтерфейсу.

Архітектуру системи детально ілюструють діаграма компонентів (рисунк 2).

Опис використаних алгоритмів та архітектур нейронних мереж. Для реалізації системи моніторингу паркувальних місць було використано комбінацію алгоритмів комп'ютерного зору для детекції об'єктів, геометричного аналізу для визначення статусу місць та стандартних методів для візуалізації та управління даними. Ключовим елементом є нейромережева модель для виявлення транспортних засобів.

Детекція Транспортних Засобів: Архітектура YOLO

Основним завданням є виявлення автомобілів на кадрах відеопотоку. Для цього було обрано модель з сімейства YOLO (You Only Look Once), що належить до класу однопрохідних (single-stage) детекторів об'єктів.

На відміну від двостадійних детекторів (як Faster R-CNN), YOLO обробляє зображення за один прохід нейронної мережі. Основна ідея полягає в наступному:

1. Розділення зображення: Вхідне зображення розділяється на умовну сітку $S \times S$ клітинок (Grid Cells).
2. Прогнозування в кожній клітинці: Кожна клітинка сітки відповідає за детекцію об'єктів, центри яких потрапляють у цю клітинку.

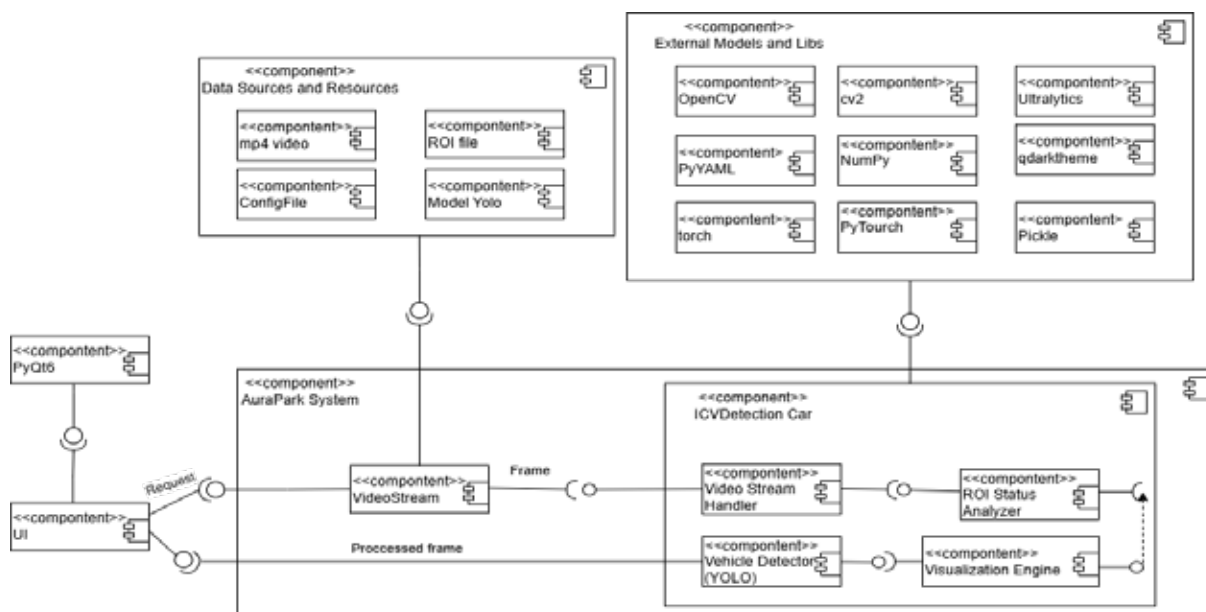


Рис. 2. Діаграма компонентів

Для створення відеопотоку та доступу до окремих кадрів було використано можливості бібліотеки OpenCV (cv2), яка дозволяє ефективно працювати як з відеофайлами (наприклад, у форматі.mp4), так і потенційно з вебкамерами чи IP-камерами. Оскільки обробка відео в реальному часі вимагає отримання кадрів з мінімальною затримкою та не повинна блокувати основний потік графічного інтерфейсу, було використано механізм багатопотоковості, наданий фреймворком Qt через клас QThread (реалізовано у VideoThread). Це дозволяє циклу отримання та аналізу кадрів виконуватися паралельно з роботою GUI, забезпечуючи відгукливість інтерфейсу.

Метод одноетапної (single-stage) детекції об'єктів на основі архітектури YOLO. Для знаходження транспортних засобів (автомобілів) на кадрі з відеопотоку було обрано неймережеву модель архітектури YOLO (You Only Look Once). Підхід YOLO належить до однопрохідних (single-stage) детекторів, що за один прохід конволюційної нейронної мережі генерує сітку прогнозів, яка містить:

Обмежувальні рамки (Bounding Boxes, BBox):

$$B = [x_1, y_1, x_2, y_2].$$

Оцінки впевненості (confidence score) для кожного виявленого об'єкта:

$$S = P(object) \cdot \max_{c \in C} P(c | object),$$

де C – набір можливих класів об'єктів.

Ймовірності класів:

$$P(c | object), c \in C$$

Процес детекції можна представити у вигляді таких схем – YOLO model in car detection (рисунок 3, 4).

Використана у прототипі попередньо навчена модель YOLO (рисунок 5) (.pt-файл), натренована на великих датасетах здатна з високою швидкістю виявляти об'єкти класу «автомобіль», що критично для систем реального часу.

Детекція автомобілів здійснюється шляхом аналізу вхідного зображення розміром 608×608, яке пропускається через глибоку згорткову нейронну мережу з коефіцієнтом зменшення 32×32, що призводить до отримання вихідного тензора розміром 19×19×5×85.

Інтерфейс бібліотеки Ultralytics (на базі PyTorch) дозволяє зручно завантажити модель та отримати результати детекції:

$$\text{model.predict}(\dots) \rightarrow \{B, C, S\},$$

де вихід містить список рамок B , класи об'єктів C та відповідні оцінки впевненості S

Метод геометричного аналізу зайнятості паркувальних місць на основі просторового розташування виявлених об'єктів. Для визначення статусу зайнятості конкретного паркувального місця використовується геометричний аналіз положення виявлених автомобілів відносно попередньо визначених зон інтересу (ROI).

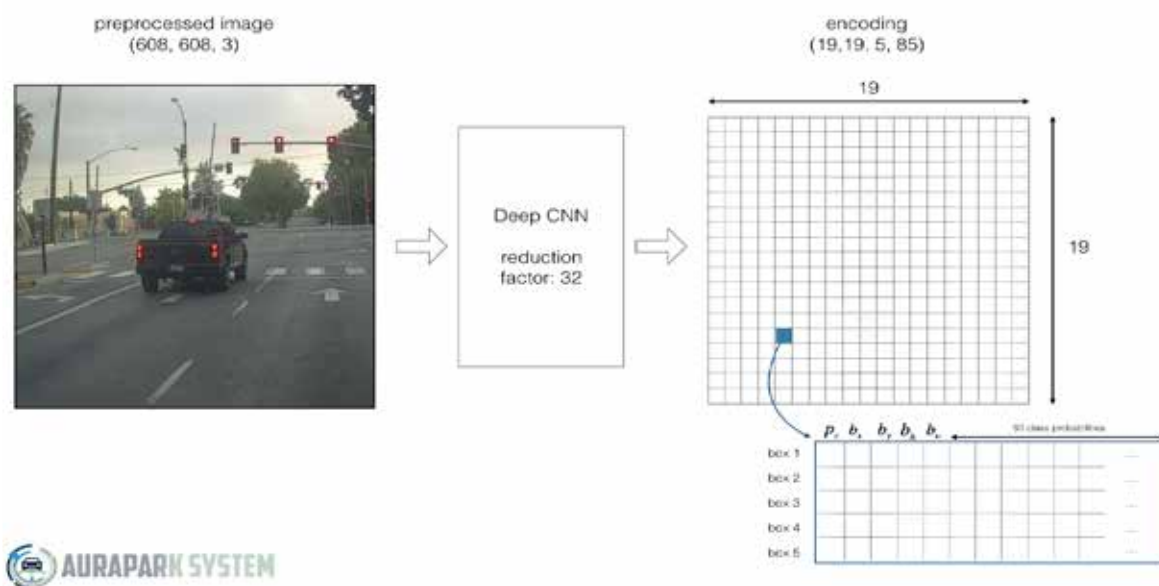


Рис. 3. Вигляд процесу обробки зображення автомобіля в Yolo

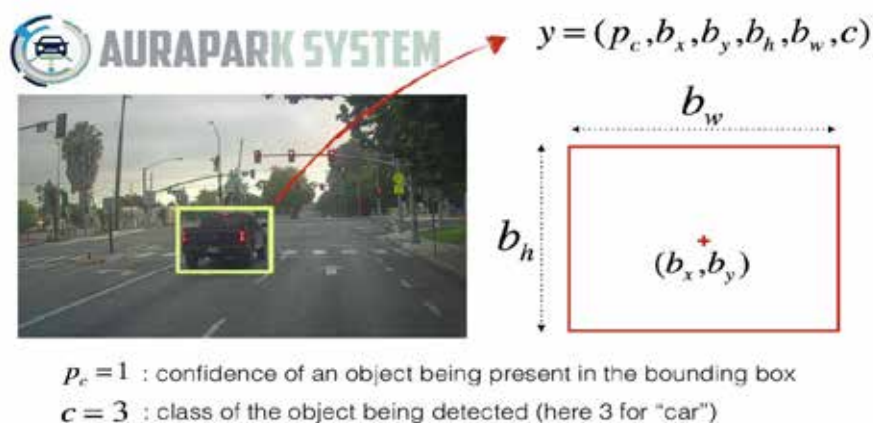


Рис. 4. Кінцевий вигляд обробленого автомобіля трекінгом в Yolo

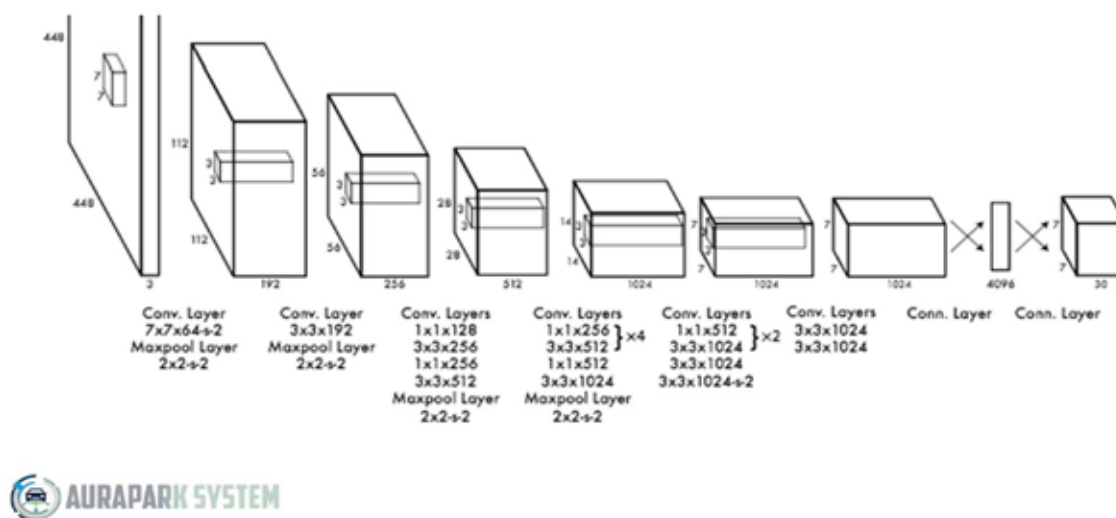


Рис. 5. Загальний вигляд моделі Yolo

Кожне паркомісце моделюється полігоном (у даній реалізації – чотирикутником), координати вершин якого зберігаються у файлі.pkl.pkl.pkl через модуль Pickle.

Після отримання рамки B для виявленого автомобіля обчислюється центральна точка автомобіля:

$$P_c = (c_x, c_y), c_x = \frac{x_1 + x_2}{2}, c_y = \frac{y_1 + y_2}{2}.$$

Для кожного полігону R (що визначає ROI) перевіряється належність точки $P(c)$ цьому полігону за допомогою OpenCV:

$$\text{cv2.pointPolygonTest}(R_{\text{vertices}}, P_c, \text{False}),$$

де якщо результат ≥ 0 , то місце вважається зайнятим

Альтернативним більш точним підходом є аналіз перетину IoU (Intersection over Union)

$$\text{IoU}(B, R) = \frac{|B \cap R|}{|B \cup R|}.$$

Якщо $\text{IoU} > T$ (де T – порогове значення, наприклад, 0.5), то місце визначається як зайняте. (Рисунок 6)

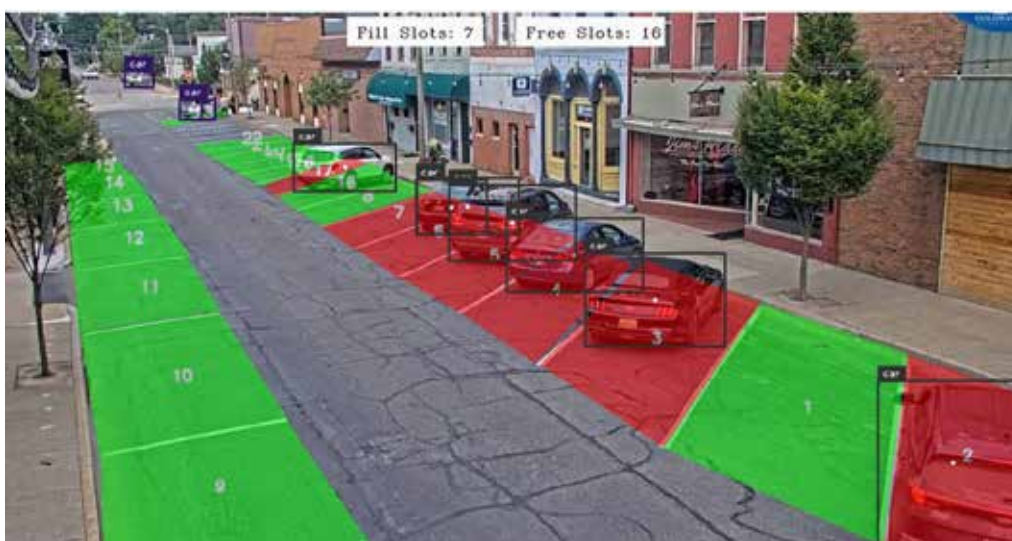


Рис. 6. Вигляд зайнятості паркувального місця

Візуалізація результатів (малювання ROI з кольоровим статусом, номерів місць, опціональних BBox автомобілів) та накладання їх на відеокادر здійснюється за допомогою функцій малювання бібліотеки OpenCV (cv2.polyline, cv2.fillPoly, cv2.putText, cv2.rectangle, cv2.addWeighted).

Отже, для розробки було обрано комбінацію: OpenCV для роботи з відео та геометрією, YOLO (через Ultralytics/PyTorch) для детекції ТЗ, аналіз точки в полігоні ROI для визначення статусу, Pickle та YAML для збереження/завантаження даних/конфігурації, та PySide6 для GUI. Це створює вимоги до апаратного забезпечення (бажано GPU) для забезпечення роботи в реальному часі.

Шляхи вдосконалення та подальшого розвитку. Можна виділити 3 основні напрямки подальшого розвитку розробленої системи:

1. Підвищення точності та надійності ядра системи: Перехід від аналізу центральної точки до визначення зайнятості на основі IoU, донавчання моделі YOLO на специфічному датасеті цільового паркінгу для адаптації до локальних умов.

2. Розширення функціональних можливостей: Додавання підтримки реальних IP-камер (RTSP), інтеграція LPR, впровадження аналітики використання паркінгу.

3. Масштабування та розгортання: Перехід на клієнт-серверну архітектуру для підтримки багатьох камер/користувачів, використання бази даних для зберігання стану та конфігурацій, розгляд варіантів розгортання на сервері або з використанням Edge-пристроїв.

Висновки. У ході виконання роботи було повністю реалізовано поставлену мету – покращення ефективності управління паркувальними майданчиками та надання користувачам актуальної візуальної інформації про стан місць через зручний графічний інтерфейс, за рахунок створення функціонального прототипу системи автоматизованого моніторингу паркувальних місць на основі відеоаналітики, що інтегрує сучасні підходи глибокого навчання та засоби комп'ютерного зору з гнучким інтерфейсом для реального використання.

В результаті дослідження були досягнуті всі завдання дослідження. Було створено універсальний прототип, який поєднує швидку та надійну детекцію зручним інтерфейсом, що не має прямих аналогів серед існуючих програмних рішень з відкритим кодом. Наукова новизна роботи полягає в запропонованій інтеграції методів детекції об'єктів YOLO з гнучким механізмом управління ROI через графічний інтерфейс та візуалізацією стану паркомісць в реальному часі в рамках єдиного конфігурованого застосунку. Реалізована система є працездатною, демонструє баланс між точністю, швидкістю та гнучкістю налаштування, досягаючи поставлених цілей. Архітектурні рішення щодо модульності, паралельної обробки (QThread) та конфігураційності забезпечують зручне розгортання прототипу у нових середовищах. Виявлено перспективи для подальших досліджень, зокрема в напрямку поліпшення точності визначення зайнятості за допомогою глибшої аналітики, IoU-перетинів та багатокамерної обробки.

Список використаних джерел:

1. Чорнобривець Д.В., Поперешняк С.В., Каплюк В.О. Система моніторингу місць для паркування з використанням комп'ютерного зору. *Телекомунікаційні та інформаційні технології*. 2024. 4 (85). С. 62-72. DOI: <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.045775>
2. Чорнобривець Д. В., Поперешняк С.В. Автоматизована система доступу до зарядних станцій для електромобілів з використанням блокторів паркувальних місць. *Сучасні аспекти діджиталізації та інформатизації в програмній та комп'ютерній інженерії*: Матеріали II Міжнародної науково-практичної конференції, м. Київ, 2-3 грудня 2024 р. С. 147-150
3. Sriramdharnish K., Arun R., Parvin Raj R, Haseeb Batcha H., Sanjay A. Vision Park – Next Gen Computer Vision for Efficient Parking Space Monitoring. *International Conference on Emerging Research in Computational Science (ICERCS)*. Coimbatore, India. 2024. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICERCS63125.2024.10895085>.
4. Sujitha B., Ponraj A., Parabrahmachari S., Hyma Lakshmi T., Annamani T. Video Based Car Parking Management and Monitoring Using Computer Vision and Machine Learning. *International Conference on Multi-Agent Systems for Collaborative Intelligence (ICMSCI)*. Erode, India. 2025. 1204-1208. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICMSCI.62561.2025.10893979>.
5. Bachtar M., Besari A., Lestari A. Parking Management by Means of Computer Vision. *Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*. Surabaya, Indonesia. 2020. 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICVEE50212.2020.9243264>.
6. Giampaoli L., Hessel F. Parking Space Occupancy Monitoring System Using Computer Vision and IoT. *7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*. New Orleans, LA, USA. 2021. 7-12. DOI: <https://doi.org/10.1109/WF-IoT51360.2021.9595935>.
7. H. Lee, Chatterjee I., Cho G. Enhancing Parking Facility of Container Drayage in Seaports: A Study on Integrating Computer Vision and AI. *6th International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*. Sapporo, Japan. 2023. 384-387. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICKII58656.2023.10332699>.
8. Popereshnyak S., Yurchuk I. Car Parking Data Processing Technique for Smart Parking System as Part of Smart City. *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making*. ISDMCI. Advances in Intelligent Systems and Computing. 2021. vol 1246. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-3>

References:

1. Chornobryvets' D.V., Popereshnyak S.V., Kaplyuk V.O. (2024) Systema monitorynhu mist's' dlya parkuvannya z vykorystannyam komp'yuternoho zoru. *Telekomunikatsiyni ta informatsiyni tekhnolohiyi*, (85), 62-72. <https://doi.org/10.31673/2412-4338.2024.045775> [Ukrainian]
2. Chornobryvets', D. & Popereshnyak, S. (2024) Avtomatyzovana systema dostupu do zaryadnykh stantsiy dlya elektromobiliv z vykorystannyam blokatoriv parkoval'nykh mist's'. *II Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiya «Suchasni aspekty didzhytalizatsiyi ta informatyzatsiyi v prohranniy ta komp'yuterniy inzheneriyi»*, 147-150 [Ukrainian]
3. Sriramdharnish, K.; Arun, R., Parvin Raj, R.; Haseeb Batcha, H., Sanjay, A. (2024) Vision Park – Next Gen Computer Vision for Efficient Parking Space Monitoring. *International Conference on Emerging Research in Computational Science (ICERCS)*, Coimbatore, India, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICERCS63125.2024.10895085>.
4. Sujitha, B., Ponraj, A., Parabrahmachari, S., Hyma Lakshmi, T., Annamani, T. (2025) Video Based Car Parking Management and Monitoring Using Computer Vision and Machine Learning. *International Conference on Multi-Agent Systems for Collaborative Intelligence (ICMSCI)*, Erode, India, 1204-1208. <https://doi.org/10.1109/ICMSCI62561.2025.10893979>.
5. Bachtar, M., Besari, A., Lestari, A. (2020) Parking Management by Means of Computer Vision. *Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, Surabaya, Indonesia, 1-6. <https://doi.org/10.1109/ICVEE50212.2020.9243264>.
6. Giampaoli, L., Hessel, F. (2021) Parking Space Occupancy Monitoring System Using Computer Vision and IoT. *IEEE 7th World Forum on Internet of Things (WF-IoT)*, New Orleans, LA, USA, 7-12. <https://doi.org/10.1109/WF-IoT51360.2021.9595935>.

-
7. Lee, H., Chatterjee, I., Cho, G. (2023) Enhancing Parking Facility of Container Drayage in Seaports: A Study on Integrating Computer Vision and AI. *IEEE 6th International Conference on Knowledge Innovation and Invention (ICKII)*, Sapporo, Japan, 384-387. <https://doi.org/10.1109/ICKII58656.2023.10332699>.
 8. Popershenyak, S., Yurchuk, I. (2021) Car Parking Data Processing Technique for Smart Parking System as Part of Smart City. *Lecture Notes in Computational Intelligence and Decision Making. ISDMCI. Advances in Intelligent Systems and Computing*, (1246). <https://doi.org/10.1007/978-3-030-54215-3>

УДК 004.514

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.11>

Трофименко О. Г., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій
Національного університету «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0001-7626-0886

Манаков С. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій
Національного університету «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0001-5930-4592

Корнійчук М. М., студент факультету кібербезпеки та інформаційних технологій
Національного університету «Одеська юридична академія»
ORCID: 0009-0009-4223-9291

Лобода Ю. Г., кандидат педагогічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій
Національного університету «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0001-7083-552X

Чикунів П. О., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних технологій
Національного університету «Одеська юридична академія»
ORCID: 0000-0003-4959-7744

МОДАЛЬНІ ВІКНА В ІНТЕРФЕЙСІ КОРИСТУВАЧА ЗАСОБАМИ REACT/NEXT.JS

Модальні вікна стали повсюдним елементом цифрових інтерфейсів для відображення сповіщень, збору введених користувачем даних, керування навігацією. Метою статті є аналіз та систематизація сучасних підходів до реалізації модальних вікон у вебзастосунках, створених засобами React та Next.js. У статті проведено комплексний аналіз сучасних підходів до реалізації модальних вікон у frontend розробці. По-перше, досліджено роль модальних вікон у покращенні взаємодії користувачів у вебзастосунках. Попри їх широке використання є певна неоднозначність щодо того, коли використовувати модальні вікна, а коли альтернативні рішення – спливаючі діалогові вікна. Автори провели детальне порівняння цих компонентів інтерфейсу, різні варіанти їх використання, переваги та потенційні недоліки. По-друге, в статті, розглянуто різні проблеми при розробленні функціональних модальних вікон в інтерфейсі користувача. Зокрема це стосується проблем доступності, продуктивності та ефективності, інтеграції модальних вікон з маршрутизацією, проблем з мобільною версією, переривання поточної взаємодії, проблем з розміткою та стилями. По-третє, у роботі досліджено питання тестування модальних вікон у динамічних вебсередовищах. Традиційні засоби автоматизованого тестування часто мають проблеми з модальною взаємодією через їх тимчасовий характер і залежність від подій, ініційованих користувачем. У статті обговорюється те, як штучний інтелект (ШІ) здатен допомогти розв'язати ці складнощі, дозволяючи складний аналіз модальної поведінки, включно з динамічною адаптацією вмісту та реагування в режимі реального часу. Завдяки інтеграції ефективних методів доступності, оптимізації продуктивності і використанню розширеного тестування за допомогою ШІ, розробники можуть створювати інтуїтивно зрозумілі та ефективні інтерфейси, які покращують, а не перешкоджають взаємодії користувачів. Проведений аналіз може бути цінним як для новачків, так і для досвідчених розробників інтерфейсу, які прагнуть удосконалити свій підхід до модального дизайну в сучасних вебзастосунках.

Ключові слова: модальне вікно, вебпрограмування, вебдизайн, інтерфейс, тестування, спливаюче вікно.

Trofymenko O. G., Manakov S. Yu., Kornüchuk M. M., Loboda Yu. V., Chykunov P. O. Modal Windows in the in UI with React/Next.js

Modal windows are a ubiquitous element of digital interfaces for displaying notifications, collecting user input, and controlling navigation. The purpose of the article is to analyze and systematize modern approaches to implementing modal windows in web applications created using React and Next.js. The article provides a comprehensive analysis of modern approaches to

implementing modal windows in frontend development. First, the role of modal windows in improving user interaction in web applications is investigated. Despite their widespread use, there is some ambiguity regarding when to use modal windows and when alternative solutions are pop-up dialog boxes. The authors conduct a detailed comparison of these interface components, their different uses, advantages, and potential disadvantages. Secondly, the article discusses various problems in developing functional modal windows in the user interface. This concerns accessibility, performance, and efficiency issues, integration of modal windows with routing, mobile issues, interruption of ongoing interaction, issues with markup and styles. Systematizing approaches to implementing these components allows you to ensure interface quality and increase the scalability and maintainability of web applications in the long term. Third, the paper explores the issue of testing modal windows in dynamic web environments. Traditional automated testing tools often have problems with modal interactions due to their temporal nature and dependence on user-initiated events. The paper discusses how artificial intelligence (AI) can help address these challenges by enabling sophisticated analysis of modal behavior, including dynamic adaptation of content and responsiveness in real time. AI-based testing frameworks can simulate complex user interactions, detect accessibility issues, and predict potential UX issues before deployment. By integrating effective accessibility practices, optimizing performance, and using advanced AI-powered testing, developers can create intuitive and effective interfaces that enhance, rather than hinder, user interactions. The analysis can be valuable for both novice and experienced interface developers looking to refine their approach to modal design in modern web applications.

Key words: modal window, web programming, web design, interface, testing, pop-up window.

Постановка проблеми. Модальне вікно є важливим елементом більшості вебзастосунків, оскільки його призначення полягає у фокусуванні уваги користувача на певному об'єкті, що містить важливу інформацію або спонукає до дії, яку необхідно виконати перед тим, як продовжити роботу з основним контентом вебресурсу.

Актуальність глибоко аналізу підходів до реалізації модальних вікон у вебзастосунках на React і Next.js зумовлена поширенням використання цих технологій у сучасній фронтенд-розробці. React є однією з найпопулярніших бібліотек для створення інтерфейсів користувача, а Next.js – потужним фреймворком, який забезпечує серверний рендеринг, генерацію статичних сторінок та оптимізацію продуктивності.

При розробленні складних, динамічних вебінтерфейсів модальні вікна є одним з ключових елементів взаємодії з користувачем, тому правильна їх реалізація має велике значення. Сучасні вебзастосунки часто потребують гнучких, ефективних способів створення модальних вікон. Такі способи можуть включати використання порталів, управління станом через хуки або контекст, а також інтеграцію з UI-бібліотеками. Крім того, реалізація таких вікон вимагає дотримання принципів доступності, зокрема правильного управління фокусом, використання ARIA-атрибутів і забезпечення навігації з клавіатури. Усе це безпосередньо впливає на користувацький досвід.

Ще одним важливим аспектом є вплив модальних вікон на продуктивність і рендеринг. Враховуючи специфіку підходів SSR (Server Side Rendering) і CSR (Client Side Rendering) у Next.js, неправильна реалізація може спричинити проблеми з продуктивністю, завантаженням сторінки або гідратацією компонентів. Особливої уваги потребує інтеграція компонентів модальних вікон у системи маршрутизації (вбудовані, як у Next.js або кастомні). Зокрема передбачення способів керування історією та поточним станом URL у випадках, коли відкриття і закриття модального вікна прив'язане до навігації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Оскільки з потребою розробки модальних та спливаючих вікон розробники інтерфейсу вебзастосунків стикаються доволі часто, то й актуальність добору ефективної реалізації відповідних елементів взаємодії з користувачем підтверджується різнобічними дослідженнями у цій сфері. Багато дизайнерів інтерфейсу користувача (User Interface, UI) обговорюють принципи, яких слід дотримуватися при розробленні функціональних аспектів інтерфейсу користувача [1]. Збір даних через вебформи та діалогові вікна є одним з основних способів взаємодії з користувачами на вебсайті. Щоб користувачі довіряли діалоговим вікнам та вебформам, вони мають відповідати функціональним потребам, нормам конфіденційності та юридичними зобов'язанням [2]. У роботі розглянуто чотири методи створення модальних та спливаючих вікон як елементів інтерфейсу користувача [3]. Дослідження [4] спрямоване на виявлення відмінностей між спливаючими сповіщеннями та повідомленнями у вигляді форм щодо часу їх виконання. Суб'єктивні оцінки обох методів не виявили суттєвої переваги жодного з методів. У роботі [5] звертають увагу на складнощі тестування спливаючих вікон в інтерфейсі вебзастосунків засобами Selenium. При тестуванні вебелементів виконуються численні перевірки візуальних і структурних частин інтерфейсу користувача на відповідність вимогам зручності використання, доступності, продуктивності та стандартам, що створює проблеми для автоматизованого тестування [6]. Суттєвим є те, що скрипти для тестування графічного інтерфейсу (GUI) є малопридатними для перевірки юзабіліті через проблеми налагодження тестового сценарію і не можуть бути пакетними або об'єднаними в систему [7]. Крім того, автоматизовані функціональні тести не завжди є надійними, оскільки тестові скрипти можуть не виявляти помилки, які не прописані в сценарії перевірки. До таких недоліків належать, зокрема, неточне позиціонування модальних та спливаючих вікон, помилки у тексті повідомлень, дефекти форм, з якими скрипт не взаємодіє під час виконання [8]. Тому подальші дослідження підходів до розробки та тестування модальних вікон засобами

React і Next.js дозволяють знайти ефективні рішення, які забезпечать якісну взаємодію з користувачем, відповідатимуть сучасним вимогам до продуктивності й доступності, та є гнучкими для подальшої підтримки й масштабування вебзастосунків.

Мета статті – аналіз та систематизація сучасних підходів до реалізації модальних вікон у вебзастосунках, створених засобами React та Next.js.

Виклад основного матеріалу. Розробка застосунків для сучасного Інтернету охоплює цілу низку складних інженерних процесів, серед яких важливу роль відіграє проєктування інтерфейсів користувача, які поєднують взаємодію інтерактивних, динамічних компонентів. Одним із важливих елементів інтерфейсів є модальні вікна, які активно використовуються для взаємодії з користувачем вебсторінки.

1. Відмінності модальних вікон (modals) від спливаючих (pop-ups)

Модальні вікна дещо схожі на спливаючі діалогові вікна у вебзастосунках, але вони виконують різні функції і мають суттєві відмінності в тому, як вони поведуться і як реалізуються (табл. 1).

Таблиця 1

Основні відмінності між модальними і спливаючими діалоговими вікнами

Характеристика	Модальне вікно (modal)	Спливаюче вікно (pop-up)
Взаємодія з інтерфейсом	Блокує доступ до основного контенту, поки користувач не взаємодіє з вікном	Не блокує основний контент, користувач може продовжувати роботу
Місце відображення	Відображається поверх основного контенту вебсайту чи застосунку	Може відкрити нову вкладку або з'явитися поверх контенту
Тип контенту	Використовуються для важливих повідомлень або форм, які потребують взаємодії	Може містити повідомлення, рекламу або інші менш важливі елементи
Приклад використання	Повідомлення про помилки, підтвердження дій, форми для введення даних	Легкі повідомлення або сповіщення про оновлення, реклама
Застосування в React	Зазвичай використовуються компоненти з умовним рендерингом для контролю видимості	Може бути реалізоване через прості компоненти або використання вікон браузера

Голова відмінність між спливаючими діалоговими і модальними вікнами полягає в тому, як саме відповідне вікно дозволяє користувачеві взаємодіяти з документом, коли воно відкрите. Так спливаюче вікно (pop-up) при появі на екрані дозволяє користувачеві взаємодіяти з іншим контентом сторінки, коли воно відкрите (тобто натискати кнопки та посилання в зоні доступності навколо відповідного діалогового вікна. Модальне вікно (modal) блокує сторінку, доки користувач не виконає запропоновану дію (рис. 1). Тим самим воно зменшує кількість інформації, яку користувачі мають обробити за раз, і зосереджує його увагу на найважливішому. Це може бути підтвердження покупки або підписки на розсилку – у будь-якому разі ці елементи призводять до конкретних дій.

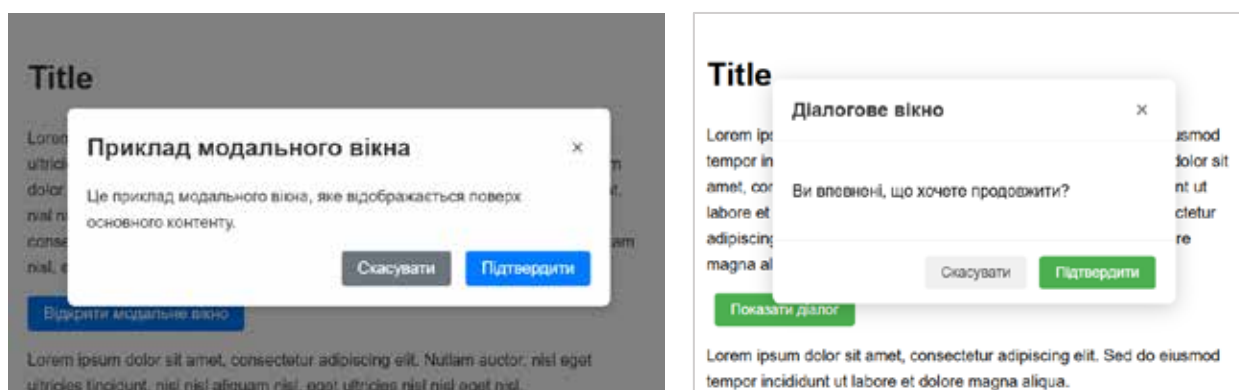


Рис. 1. Різниця між відображенням на вебсторінці модального (ліворуч) та спливаючого (праворуч) діалогових вікон

Хоча подекуди інструменти pop-ups і modals вважають схожими, але по суті вони зовсім різні. Спливаючі вікна – це окремі вікна, які відкриваються в браузері. Завдяки вбудованим таймерам вони можуть автоматично зникати через кілька секунд, якщо користувач не взаємодіє, мінімізуючи збої. Серед різних типів деякі спливаючі вікна можна відфільтрувати за допомогою спеціальних блокувальників реклами. Водночас системні спливаючі вікна є ефективними для поінформування користувачів про успішність чи

невдачу виконаних дій. На відміну від рор-уп, модальні вікна є частиною того самого вікна браузера, затемнюючи і блокуючи фоновий вміст вебсторінки на кшталт певної накладки. Наприклад, за допомогою модальних вікон можна запропонувати ввести певну реєстраційну інформацію, прийняти умови або повідомити про новий функціонал застосунку. Часто такі вікна використовують для реєстрації нових користувачів, проводячи їх через процес реєстрації, при цьому залишаючись по суті на головній сторінці [9]. Наприклад, LinkedIn використовує modals, щоб спонукати людей заповнювати свої профілі або підтримувати зв'язки [10].

Діалоги та модальні вікна стали звичайною частиною Інтернету, але подекуди розробникам, особливо початківцям, не зрозуміло, який із них підходить для певної ситуації краще. Розуміння відмінностей між рор-уп та modal, дозволяє зробити правильний вибір найкращого варіанта для певної ситуації та уникнути негараздів в інтерфейсі. Позаяк модальні вікна з'являються поверх основного вмісту вебсайту або застосунку, блокуючи доступ до решти інтерфейсу на час виконання певної дії користувачем (наприклад, натискання кнопки «Закрити», «Підтвердити» чи то іншої дії), то використовувати їх варто для важливих взаємодій, які потребують негайної уваги користувача, наприклад, для підтвердження важливої дії при реєстрації, видаленні файлів, виходу із системи тощо. Тобто модальне вікно зазвичай вимагає активної взаємодії з користувачем перед тим, як він повернеться до основного контенту. Спливаючі вікна доцільні для надання додаткової інформації або ненав'язливих сповіщень, наприклад: для повідомлень про оновлення, підказок, реклами. Дотримання кращих практик UX-дизайну компонентів робить вебзастосунок більш зручним і привабливим для користувачів. В будь-якому варіанті організації модального або спливаючого вікна не варто перевантажувати користувача занадто великою кількістю варіантів в одному діалоговому вікні.

2. Проблеми програмної реалізації модальних вікон у вебзастосунках

Модальні вікна у React та Next.js потребують ретельно продуманого підходу до реалізації. Одним із базових аспектів є використання механізмів умовного рендерингу та управління станом, що дозволяє динамічно керувати їх відображенням. У React це досягається за допомогою хуків, зокрема useState або useReducer, а в складніших випадках – через глобальні стейт-менеджери. У Next.js важливо враховувати специфіку серверного рендерингу, що може вплинути на рендеринг модального компонента, зокрема на етапі гідратації.

2.1. Проблеми з доступністю

Важливою частиною сучасної реалізації модальних вікон є доступність (accessibility, також відома як a11y). Створюючи подібні компоненти, розробник має забезпечити відповідність стандартам WCAG (Web Content Accessibility Guidelines, доступність вебконтенту для людей із зоровими та іншими обмеженнями), правильне управління фокусом, використання ARIA-атрибутів і підтримку клавіатурної навігації [11]. Якщо модальне вікно реалізоване без врахування стандартів доступності, це може спричинити проблеми для користувачів, які користуються спеціальними пристроями, наприклад, екранними читачами (screen readers). Тобто такі користувачі не зможуть взаємодіяти з модальним вікном або з основним контентом після його закриття.

Можливими варіантами рішень проблем доступності є:

- забезпечення фокусування (focus trapping, фокус-трапінг) всередині модального вікна, коли воно відкрите, й автоматичне відновлення фокуса на попередньому елементі після його закриття;
- блокування інших елементів сторінки від доступу через screen reader, наприклад, через атрибут aria-hidden;
- підтримка коректної навігації через клавіатуру (стрілки, Escape, Tab, Tab/Shift+Tab, Enter тощо);
- використання атрибутів ARIA (Accessible Rich Internet Applications) для полегшення навігації для людей з обмеженими можливостями, наприклад: aria-modal=»true» (вказує, що вікно є модальним і взаємодія має бути зосереджена лише на ньому), aria-labelledby (зв'язування заголовка з модальним вікном), aria-describedby (пояснення змісту вікна).

Приклад використання ARIA-атрибутів:

```
div className="modal" role="dialog" aria-modal="true" aria-labelledby="modal-title">
  <h2 id="modal-title">Модальне вікно</h2>
  <p>Контент модального вікна</p>
  <button onClick={closeModal}>Закрити</button>
</div>
```

У середовищі React ці задачі можуть реалізовуватись як вручну, так і за допомогою спеціалізованих бібліотек, як-от: Headless UI, Radix UI чи Reach UI, які забезпечують семантичну точність та високий рівень доступності.

В таблиці 2 наведено результати проведеного порівняння реалізацій доступності (a11y) модальних вікон при ручній реалізації та у трьох вищезгаданих бібліотеках.

**Порівняння ручної реалізації доступності модальних вікон
та засобами бібліотек Headless UI, Radix UI, Reach UI**

Критерій	Headless UI	Radix UI	Reach UI	Ручна реалізація
Фокус трапінг	Є, вбудований	Є, вбудований	Є, вбудований	Треба реалізовувати самому або з focus-trap
ARIA ролі / атрибути	Напіваавтоматично (деякі потрібно додати вручну)	Автоматично	Автоматично	Треба вручну задати role, aria-labelledby, aria-describedby
Закриття по натисканню клавіші Esc	Так	Так	Так	Треба додати обробник подій вручну
Фокус після закриття	Повертає фокус на тригер	Повертає фокус	Повертає фокус	Треба запам'ятати активний елемент і повернути фокус вручну
aria-hidden для фону	Треба реалізувати вручну	Вбудовано	Вбудовано	Треба самому приховати інші елементи для screen reader
Семантика / відповідність (WAI-ARIA)	Залежить від реалізації користувача	Максимально семантична	Висока, орієнтована на WCAG	Можлива помилка, велика відповідальність на розробнику
Гнучкість / кастомізація	Висока, повна свобода стилізації та логіки	Висока	Обмежена, порівняно з іншими	Повний контроль розробником
Документація з ally	Мінімальна	Докладна	Добра	Відсутня – залежність від сторонніх статей/гайдів
Розмір бібліотеки	Середній (разом з Tailwind UI)	Дуже легкий	Легкий	–
Час на розробку	Середній	Малий	Малий	Значний, багато нюансів доступності
Надійність	Висока	Висока	Висока	Варіативна, залежить від досвіду розробника

Проведений порівняльний аналіз не виявив універсального інструмента для реалізації доступності модальних вікон у вебінтерфейсі. Так, потужна бібліотека Radix UI поєднує гнучкість низькорівневих компонентів з повною реалізацією доступних модальних вікон, а тому є найкращим вибором для семантики та доступності, позаяк в цій бібліотеці компонент Dialog повністю відповідає стандарту доступності WAI-ARIA (Web Accessibility Initiative – Accessible Rich Internet Applications є технологічним стандартом від W3C для надання можливості повноцінного використання Інтернету людьми з фізичними обмеженнями органів зору та опорно-рухового апарату). Усі компоненти модального вікна в Radix вже містять усе необхідне для відповідності WAI-ARIA практикам: фокус-трапінг, закриття по Escape, aria-атрибути, автоматичне приховування фону для screen reader'ів. На відміну від Reach UI, яка також фокусується на доступності, але надає більш високорівневі компоненти з обмеженою кастомізацією, Radix дає більше контролю над DOM-структурою, стилізацією і поведінкою. У порівнянні з Headless UI, яка вимагає ручного налаштування більшості атрибутів доступності та поведінки, Radix значно полегшує впровадження правильної ally-логіки з мінімальними зусиллями з боку розробника. Це дозволяє розробнику зосередитися на дизайні та бізнес-логіці, а не витратити час на реалізацію дрібних, але критичних деталей доступності. Портальна структура (Dialog, Portal) розв'язує типові проблеми з layering та scroll-lock, які в Headless UI потребують ручної реалізації або додаткових бібліотек. Також Radix UI вигідно виділяє високий рівень деталізації та хороша документація.

Втім, бібліотека Radix UI має і недоліки. Так, вона не має стилів (unstyled), що добре для повного контролю, але потребує більше часу на створення візуального подання. Для новачків або швидкого прототипування це є певним бар'єром, особливо порівняно з готовими рішеннями в Reach UI. Ще один нюансом є те, що Radix орієнтована саме на React і не підтримує інші фреймворки, що дещо обмежує її використання в мультифреймворкових проєктах. Також вона активно оновлюється, а тому деякі API можуть часто змінюватися, що потребує уважності від розробника. Тому Radix UI – це вибір для тих, хто хоче мати повний контроль над UI, при цьому не турбуючись про правильність реалізації доступності. Але вона вимагає певного рівня підготовки, часу на стилізацію та розуміння структури.

Reach UI є зручною бібліотекою для тих, хто хоче швидко отримати стабільне, але менш кастомне рішення, тоді як Headless UI краще підійде тим, хто вже використовує Tailwind і готовий додавати ally-логіку вручну, наприклад: aria-hidden, aria-labelledby, aria-describedby.

На відміну від Radix UI, яка надає гнучкі, низькорівневі примітиви без стилів, Reach UI є вужчим за функціональністю, але простішим у впровадженні інструментом. Ця бібліотека надає менш модульну структуру: один компонент Dialog інкапсулює усю логіку, що обмежує можливості його кастомізації, але водночас робить його зручним у використанні в стандартних випадках. Порівняно з Headless UI, яка є повністю unstyled і вимагає від розробника реалізувати доступність вручну або за допомогою окремих компонентів, Reach UI виглядає як золота середина – вона дозволяє швидко інтегрувати доступні діалоги без значних зусиль, зберігаючи при цьому певний контроль над стилізацією. Використання Reach UI доречне в проєктах, де важливі швидкість впровадження, стабільна підтримка доступності та простота – наприклад, у внутрішніх панелях керування, адміністративних інтерфейсах або невеликих вебзастосунках, де кастомізація UI не є пріоритетною.

Ключова відмінність ручної реалізації доступності модальних вікон полягає у тому, що вона має переваги, зумовлені можливостями повного контролю над структурою, стилями, логікою, можливостями оптимізації під свої потреби, без зайвого коду та відсутністю залежності від сторонніх бібліотек. Проте така реалізація має високий ризик пропустити важливі моменти доступності, вимагає більше часу на тестування з клавіатурою та screen reader'ом часто потребує сторонніх утиліт (focus-trap, scroll-lock, tabbable тощо).

2.2. Інтеграція модальних вікон з маршрутизацією

Ще одним аспектом, що потребує аналізу, є інтеграція модальних вікон з маршрутизацією. У Next.js із його файловою структурою роутів виникає потреба враховувати URL-стан при відкритті модального вікна. Це дозволяє не лише покращити користувацький досвід через підтримку історії переходів, а й надає змогу ділитися посиланням, яке одразу відкриває модальне вікно. Така реалізація використовує query-параметри або динамічні маршрути у поєднанні з умовним рендерингом модальних компонентів.

Особливу роль у сучасних підходах до створення модальних вікон відіграє використання React Portal, що дозволяє рендерити модальні вікна поза основним DOM-деревом компонента [12]. Це забезпечує кращу керованість накладанням елементів, ізоляцію стилів та уникнення конфліктів з батьківськими контейнерами.

NextJS з повноцінним впровадженням у версії 14 нового роутера App Router пропонує власний специфічний підхід до реалізації модальних вікон. Для цього мають використовуватися так звані паралельні та перехоплені маршрути (parallel and intercepted routes) [13]. Призначення parallel routes полягає у композиції сторінки з окремих блоків, які існують паралельно і рендеринг яких може бути оптимізовано. Intercepted routes дозволяють за допомогою внутрішніх механізмів маршрутизації відображати контент спеціального компонента, накладаючи його на контент основної сторінки, на якій відбулося перехоплення. При цьому видимий URL замінюється на URL спеціального компонента. Швидкість роботи такого підходу залежить від того, чи необхідне для рендерингу такого спеціального компонента завантаження додаткових даних, адже звертання до сервера у таких випадках може впливати на швидкодію, що однак можна подолати використанням механізмів кешування, якщо відповідні дані треба зберігати. При цьому лише перше відкриття такого модального вікна буде повільнішим, а всі наступні – швидкими. Стан модального вікна контролюється маршрутизатором, а не React-хуками типу useState – замість цього використовуються навігаційні події, зокрема натискання на спеціальний компонент посилання Link (який розширює функціональність стандартного елемента anchor) чи виклик функції router.push() (що додає новий запис у історію URL) [12].

2.3. Проблеми продуктивності та ефективності

Проблема продуктивності та ефективності при реалізації модальних вікон у front-end зазвичай виникає в контексті рендерингу, керування станом, ізоляції фокусу та блокування фону. Неправильне використання або надмірне використання модальних вікон може спричинити погіршення продуктивності, особливо на старих або технічно слабких пристроях. Щоб забезпечити плавну роботу інтерфейсу без затримок, розробники вдаються до кількох стратегій оптимізації. Для покращення продуктивності важливо оптимізувати рендеринг модальних вікон, особливо якщо вони мають складний контент (наприклад, форми з кількома елементами).

Одним із найважливіших рішень є використання порталів (React Portal), які дозволяють рендерити модальне вікно безпосередньо в DOM-дереві під <body>, тим самим уникати проблем із z-index або overflow. Це знижує навантаження на дерево компонентів і зменшує ризик повторного рендерингу батьківських вузлів.

Ще одним ефективним підходом є динамічне завантаження контенту модального вікна, тобто lazy loading або code-splitting. Замість того, щоб тримати важкий контент модального вікна постійно в DOM, його підвантажують лише при відкритті, що значно зменшує обсяг початкового рендерингу сторінки. Це корисно в проєктах, де модальне вікно містить складні форми, таблиці або інтерактивну графіку. У такому разі важливо реалізувати збереження стану або кешування, щоби уникнути повторного завантаження при кожному відкритті вікна.

Щодо анімацій, то тут важливо уникати важких CSS-анімацій, які блокують основний потік (main thread). Найкращим варіантом є використання бібліотек, які використовують GPU-оптимізовані трансформації, наприклад, Framer Motion. У складних інтерфейсах, де модальне вікно відкривається поверх великої

кількості динамічного контенту, продуктивність можна покращити шляхом попереднього приховування неактивного контенту за допомогою `aria-hidden`, `inert` або навіть від'єднання DOM-вузлів з основного потоку.

У випадках, де модальне вікно взаємодіє з великими обсягами даних, продуктивність також залежить від ефективного менеджменту стану. Використання локального стану замість глобального (наприклад, через `useState` замість `Redux`) зменшує кількість непотрібних ререндерів та ізолює модальне вікно від змін у зовнішньому інтерфейсі. Ще один підхід – мемоізація та використання `React.memo` або `useMemo` для обчислень всередині модального вікна.

У складних інтерфейсах із великою кількістю одночасних модальних елементів (наприклад, підтвердження дій, багаторівневі діалоги), можна реалізувати менеджер модальних вікон – централізовану систему, яка рендерить лише активну модальну компоненту, зберігаючи інші в «сплячому» стані. Це дозволяє зменшити кількість одночасно присутніх у DOM елементів, оптимізувати обсяг пам'яті та прискорити відповідь інтерфейсу на взаємодію користувача.

Отже, ефективність реалізації модальних вікон значною мірою залежить від поєднання рішень: архітектурних, поведінкових і технічних. Ключем до високої продуктивності є поетапне завантаження, ефективне керування рендерингом, правильна ізоляція модального вікна від решти DOM, а також делегування складних завдань перевіреним бібліотекам, які враховують специфіку браузерного оточення.

2.4. Переривання поточної взаємодії

Проблема переривання поточної взаємодії при реалізації модальних вікон у front-end виникає тоді, коли користувач виконує дію (наприклад, вводить дані у формі, читає вміст, прокручує сторінку), і раптове відкриття модального вікна призводить до втрати контексту або фокусу. У середовищі `React` та `Next.js` така ситуація часто пов'язана з некоректним або занадто агресивним керуванням станом, зокрема коли модальне вікно відкривається через глобальний стан, який синхронізується з маршрутом (`router.push`, `useSearchParams`) або приходить через пропси (`props`) від батьківських компонентів.

Щоб уникнути такого переривання, необхідно чітко контролювати умови відкриття модального вікна і зберігати поточний стан взаємодії. У `React` це досягається, завдяки локальному стану, наприклад, з `useState`, у поєднанні з `useRef`, щоб зберігати фокус або дані, які користувач уже ввів [14]. У `Next.js` важливо уникати повного перерендерингу сторінки під час відкриття модального вікна. Доцільний спосіб реалізації модальних вікон у цьому випадку – це інтеграція модальних вікон у маршрутизацію без перезавантаження контенту сторінки.

Запобігання перериванню взаємодії – це, в першу чергу, архітектурне питання, яке вирішується за рахунок локального або частково глобального стану, `router-based modals`, оптимізованого рендерингу та грамотного використання ефектів для збереження контексту користувача. Це забезпечує як технічну ефективність, так і відчуття неперервного досвіду.

2.5. Проблеми з розміткою та стилями

Коли йдеться про реалізацію модальних вікон у front-end засобами `React` та `Next.js`, однією з основних проблем є правильне керування розміткою і стилями, зокрема щодо накладання елементів, ізоляції фокусу, керування фоном, а також адаптивності модальних вікон для різних типів пристроїв. Складність полягає в тому, що модальне вікно часто накладається на інші елементи інтерфейсу, і неправильно налаштовані стилі можуть спричинити численні помилки: конфлікти `z-index`, некоректну поведінку при прокручуванні сторінки, проблеми з доступністю.

Одним з основних підходів до розв'язання цих проблем є використання `React Portal` зі вставкою модального вікна безпосередньо в тег `<body>`, що дозволить уникнути проблем із накладанням елементів та збереженням належних стилів.

З точки зору стилів, найпоширеніший підхід полягає в тому, щоб зробити модальне вікно фіксованим відносно вікна браузера, використовуючи властивості `CSS` на кшталт `position: fixed` або `position: absolute`, і встановити відповідні значення для `top`, `left`, `right`, і `bottom`. Це дає змогу модальному вікну залишатися поверх іншого контенту на сторінці, навіть при прокручуванні. Важливо заборонити прокручування основної сторінки, коли модальне вікно відкрите, наприклад так:

```
useEffect(() => {
  if (isOpen) {
    document.body.style.overflow = 'hidden'; // Забороняє прокручування
  } else {
    document.body.style.overflow = ''; // Відновлює прокручування
  }
}, [isOpen]);
```

Важливо також забезпечити, щоб фон за модальним вікном був затемнений або напівпрозорий для фокусу користувача, зазвичай це досягається через застосування покращення стилів у `CSS`:

```
.modal-overlay {
  position: fixed;
  top: 0;
  left: 0;
  right: 0;
  bottom: 0;
  background: rgba(0, 0, 0, 0.5); /* Темний фон */
  display: flex;
  justify-content: center;
  align-items: center;
  z-index: 1000; /* Важливий для перекриття основного контенту */
}
.modal-content {
  background: white;
  padding: 20px;
  border-radius: 8px;
  min-width: 300px;
  max-width: 500px;
}
```

Для адаптивного коригування розмірів та стилів модальних вікон на різних пристроях з різними розмірами екранів: від мобільних пристроїв до десктопів доцільно використати медіа-запити (CSS media queries):

```
@media (max-width: 768px) {
  .modal-content {
    width: 90%;
  }
}
@media (min-width: 769px) {
  .modal-content {
    width: 50%;
  }
}
```

Використовуючи розглянуті стилі, модальне вікно буде центроване, матиме темний фон для покращення видимості, відповідно адаптуватиметься до різних розмірів екрану, матиме керування прокручуванням фону та фокусом, для забезпечення кращого користувацького досвіду та доступності.

2.6. Проблеми з мобільною версією

Модальні вікна можуть некоректно відображатися на мобільних пристроях або не працювати належним чином на різних розмірах екрану. Модальне вікно може перекривати важливі елементи інтерфейсу або бути незручним для взаємодії на мобільних пристроях.

Проблема адаптації модальних вікон до мобільної версії зазвичай зводиться до обмеженого простору екрана, особливостей сенсорного управління та поведінки мобільного браузера (наприклад, появи віртуальної клавіатури або небажаного скролінгу фону). Щоб уникнути таких проблем, модальні вікна мають бути максимально гнучкими, займати весь екран або його велику частину, уникати фіксованих розмірів і коректно працювати з touch-подіями. Також важливо забезпечити, щоб після відкриття модального вікна інтерфейс не «стрибав» і не виникали конфлікти з виведенням екранної клавіатури. Такий підхід дозволяє уникати типових помилок – часткового виходу модального вікна за межі екрана, порушення фокусування на полях введення або перекривання елементів при зменшенні viewport. Він також забезпечує відповідність сучасним очікуванням користувача щодо мобільного UI.

Загалом для ефективної реалізації модальних вікон у вебзастосунках важливо враховувати різні фактори, серед яких: доступність, адаптивність, продуктивність, користувацький досвід, інтерактивність тощо. За допомогою різних підходів, серед яких використання ARIA-атрибутів, оптимізація рендерингу, управління фокусом та застосування адаптивного дизайну, можна значно покращити взаємодію користувача і забезпечити коректну роботу модальних вікон на всіх пристроях та в різних браузерах.

3. Специфіка тестування модальних вікон

Під час тестування UI/UX варто ретельно перевіряти коректність роботи модальних вікон, оскільки їхня специфіка може спричинити проблеми, які впливають на зручність користування та цілісність взаємодії з інтерфейсом. Однією з головних проблем, що виникають під час тестування, є перевірка коректності фокусування елементів. Модальні вікна мають автоматично фокусувати курсор або навігацію на перший інтерактивний елемент всередині себе, не дозволяючи користувачеві взаємодіяти з фоновими елементами.

У разі порушення цієї логіки користувач може опинитися в ситуації, коли навігація клавіатурою або читання екраном стає заплутаним і неочікуваним [15]. Окрім того, недоопрацьована логіка закриття вікна – зокрема, відсутність можливості закриття через клавішу Esc або натискання за межами вікна – може значно погіршити користувацький досвід і викликати фрустрацію.

Ще одним аспектом є тестування адаптивності та доступності модальних вікон. У разі використання на мобільних пристроях або при зміні розміру екрану модальне вікно має залишатися в центрі, масштабуватися відповідно до розміру екрана та зберігати логічну структуру. Тестування має враховувати різні сценарії: відкриття з клавіатури, підтримку технологій читання з екрана, коректне відображення на темній темі, а також уникнення перекриття важливих елементів інтерфейсу.

Також потребує перевірки ситуація, коли модальне вікно відкривається з помилками валідації форм або в момент критичних змін стану сторінки – це дозволяє виявити потенційні помилки синхронізації станів або недоступність певних елементів DOM.

З точки зору користувацького досвіду (User Experience, UX) модальні вікна можуть або покращити взаємодію, або суттєво її ускладнити, якщо не дотримано принципу мінімального втручання. Якщо модальне вікно не працює як органічна частина userflow: має надмірну кількість опцій або неочевидні способи закриття, це негативно впливає на загальне враження від продукту. Тому під час тестування важливо оцінити не лише технічну справність, а й логічність розміщення елементів, послідовність дій, наявність зрозумілих інструкцій, а також час, який користувач витрачає на завершення взаємодії з вікном.

Тому тестування модальних вікон у контексті UI/UX потребує комплексного підходу, який включає в себе не лише перевірку функціональності, а й глибоке розуміння логіки взаємодії користувача з інтерфейсом. Лише всебічне тестування дозволяє гарантувати, що модальні вікна не порушують загальну навігацію, не створюють когнітивного перевантаження і залишаються ефективним засобом комунікації в межах цифрового продукту.

Автоматизація тестування модальних вікон, попри переваги, має низку специфічних проблем, які можуть ускладнювати процес реалізації тестів і впливати на надійність результатів. Однією з ключових складностей є динамічність появи модальних вікон, адже вони зазвичай створюються в DOM під час виконання скриптів, а не завантажуються разом зі сторінкою. Це означає, що автоматизовані тести мають точно «впіймати момент» появи модального вікна, і якщо час очікування недостатній або неправильно налаштований, тест може завершитися невдачею. Крім того, модальні вікна можуть мати анімаційні ефекти із затримкою появи, що ще більше ускладнює синхронізацію в тестах.

Ще однією поширеною проблемою є конфлікти позиціонування на екрані (z-index) та фокусу: якщо модальне вікно не перекриває коректно всі елементи фону, або якщо елементи поза модальним вікном залишаються активними, це може ввести тестові фреймворки в оману й змусити їх взаємодіяти не з тими елементами. В таких випадках автоматизовані інструменти можуть втратити фокус або неправильно інтерпретувати структуру DOM, що призводить до хибнопозитивних або хибнонегативних результатів.

Крім технічних складностей, проблеми виникають і при тестуванні з точки зору UX. Автоматизовані фреймворки переважно орієнтуються на перевірку функціональності, але не завжди здатні оцінити логічність або зручність інтерфейсу. Наприклад, чи очевидно для користувача, як закрити модальне вікно, чи інтуїтивно зрозуміле його розміщення – ці аспекти залишаються поза межами традиційних автоматизованих тестів.

Що стосується використання штучного інтелекту для тестування модальних вікон, то тут відкриваються нові перспективи. ШІ може бути застосований для розпізнавання шаблонів поведінки користувачів, виявлення аномалій у поведінці інтерфейсу та прогнозування помилок. Наприклад, моделі комп'ютерного зору, інтегровані з інструментами автоматизації, можуть «бачити» інтерфейс так, як його бачить користувач, і виявляти проблеми у візуальному відображенні модального вікна – зокрема, його зміщення, перекривання, неправильну адаптацію тощо. ШІ також може допомагати в генерації тестових сценаріїв, автоматично ідентифікуючи модальні компоненти в DOM і формуючи тест-кейси для взаємодії з ними.

Ба більше, завдяки інтеграції з неймережами або алгоритмами машинного навчання можна автоматично пріоритизувати тестування найбільш критичних модальних вікон або сценаріїв, що найчастіше викликають помилки. Такі підходи не замінюють класичну автоматизацію, але суттєво покращують її гнучкість та ефективність.

Висновки. Реалізація модальних вікон у середовищі React та Next.js – це не лише технічне завдання, а комплексна інженерна проблема, яка поєднує вимоги до UX, доступності, архітектури та продуктивності. В статті, розглянуто різні проблеми при розробленні функціональних модальних вікон в інтерфейсі користувача. Зокрема це стосується проблем доступності, продуктивності та ефективності, інтеграції модальних вікон з маршрутизацією, проблем з мобільною версією, переривання поточної взаємодії, проблем з розміткою та стилями. Такий підхід до реалізації модального вікна не лише відповідає технічним вимогам WCAG, а й підвищує зручність користування для всіх користувачів, незалежно від їхніх фізичних можливостей. Він гарантує чітку структуру взаємодії, контроль над фокусом, підтримку клавіатурної навігації та повну сумісність з технологіями доступності. Усе це робить вебзастосунок більш інклюзивним і професійно

реалізованим. Систематизація підходів до реалізації цих компонентів дозволяє не лише забезпечити якість інтерфейсу, а й підвищити масштабованість та підтримуваність вебзастосунків у довгостроковій перспективі.

Оскільки традиційні засоби автоматизованого тестування подекуди мають проблеми з модальною взаємодією через їх тимчасовий характер і залежність від подій, ініційованих користувачем, автори дослідили питання тестування модальних вікон у динамічних вебсередовищах. У статті обговорюється те, як штучний інтелект (ШІ) здатен допомогти розв'язати ці складнощі, дозволяючи складний аналіз модальної поведінки, включно з динамічною адаптацією вмісту та реагування в режимі реального часу. Проведений аналіз може бути цінним як для новачків, так і для досвідчених розробників інтерфейсу, які прагнуть удосконалити свій підхід до модального дизайну в сучасних вебзастосунках.

Список використаних джерел:

1. Ruiz J., Serral E., Snoeck M. Unifying Functional User Interface Design Principles. *International Journal of Human-Computer Interaction*. 2020. Vol. 37(4). P. 1-21. DOI: <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1805876>
2. Cui H., Trimananda R., Markopoulou A. Understanding Privacy Norms through Web Forms. *arXiv*. 2024. Vol. 2408.16304. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.16304>.
3. Gellert U., Cristea A. Creating Modal Windows and External Windows. In: *Web Dynpro ABAP for Practitioners*. Springer, Berlin, Heidelberg. 2013. P. 361-379. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-38247-5_15
4. Knut H., Lars H., Vegard S., Frode S. Form Feedback on the Web: A Comparison of Popup Alerts and In-Form Error Messages. *Smart Innovation, Systems and Technologies (SIST)*. 2019. Vol. 145. P. 369-379. DOI: https://doi.org/10.1007/978-981-13-8566-7_35
5. Zhan C. File Upload and Popup Dialogs. In: *Selenium WebDriver Recipes in C#*. Apress, Berkeley, CA. 2024. P. 107-116. DOI: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0023-8_13
6. Visconti E., Tsigkanos Ch., Nenzi L. Automated Monitoring of Web User Interfaces. *ACM Transactions on the Web*. 2025. Vol. 19, Issue 2. No. 10. P. 1-27. DOI: <https://doi.org/10.1145/3708512>.
7. Трофименко О.Г., Пастернак Ю.Ю., Манаков С.Ю., Лобода Ю.Г. Автоматизація тестування вебсайтів електронної комерції. *Сучасна спеціальна техніка*. 2021. № 2(65). С. 46-59. DOI: [https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.2\(65\).5](https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.2(65).5)
8. Trofymenko O. H., Dyka A. I. Problems of testing e-commerce websites. *International scientific conference «Information technologies and management in higher education and sciences»* (November 28, 2022). Riga, Latvia: "Baltija Publishing", 2022. Part 3. P. 195-199. DOI: <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-277-7-230>
9. Boyev V. What is a modal in web design: all you need to know. 2024. URL: <https://www.halo-lab.com/blog/modal-web-design>
10. Peña N. S. Modals vs. Dialogs vs. Popups: How to Use Them Effectively in UX Design. 2025. URL: <https://surl.li/wkumrj>
11. The Dialog Element. Mdn web docs. URL: <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML/Element/dialog>
12. createPortal. React. URL: <https://react.dev/reference/react-dom/createPortal>
13. NextJS Docs. Routing. Parallel Routes. URL: <https://nextjs.org/docs/app/building-your-application/routing/parallel-routes#modals>
14. useRef. React. URL: <https://react.dev/reference/react/useRef>
15. Трофименко О.Г., Дика А.І., Лобода Ю.Г. Аналіз інструментів тестування вебзастосунків. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*. 2023. № 4(20). С. 62-71. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.6271>

References:

1. Ruiz, J., Serral, E., & Snoeck, M. (2020). Unifying Functional User Interface Design Principles. *International Journal of Human-Computer Interaction*, 37(4), 1-21. <https://doi.org/10.1080/10447318.2020.1805876>.
2. Cui, H., Trimananda, R., & Markopoulou, A. (2024). Understanding Privacy Norms through Web Forms. *arXiv*. 2408.16304. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2408.16304>.
3. Gellert, U. & Cristea, A.D. (2013). Creating Modal Windows and External Windows. In: *Web Dynpro ABAP for Practitioners*. Springer, Berlin, Heidelberg, 361-379. https://doi.org/10.1007/978-3-642-38247-5_15
4. Knut, H., Lars, H., Vegard, S., & Frode, S. (2019). Form Feedback on the Web: A Comparison of Popup Alerts and In-Form Error Messages. *Smart Innovation, Systems and Technologies (SIST)*, 145, 369-379. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8566-7_35.
5. Zhan, C. (2024). File Upload and Popup Dialogs. In: Zhan, Z. (eds) *Selenium WebDriver Recipes in C#*. Apress, Berkeley, CA, 107-116. https://doi.org/10.1007/979-8-8688-0023-8_13
6. Visconti, E., Tsigkanos, Ch., & Nenzi, L. (2025). Automated Monitoring of Web User Interfaces. *ACM Transactions on the Web*, 19, 2(10), 1-27. <https://doi.org/10.1145/3708512>.
7. Trofymenko, O., Pasternak, Yu., Manakov, S., & Loboda, Yu. (2021). Avtomatyzatsiia testuvannia vebseitiv elektronnoi komertsii [Automation of testing of e-commerce websites]. *Suchasna spetsialna tekhnika*, 2(65), 46-59. [https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.2\(65\).5](https://doi.org/10.36486/mst2411-3816.2021.2(65).5)

-
8. Trofymenko, O. H. & Dyka, A. I. (2022). Problems of testing e-commerce websites. *International scientific conference «Information technologies and management in higher education and sciences»* (November 28, 2022). Riga, Latvia: “Baltija Publishing”, Part 3, 195-199. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-277-7-230>.
 9. Boyev, V. (2024). What is a modal in web design: all you need to know. <https://www.halo-lab.com/blog/modal-web-design>
 10. Peña, N. S. (2025). Modals vs. Dialogs vs. Popups: How to Use Them Effectively in UX Design. <https://surl.li/wkumrj>
 11. The Dialog Element. Mdn web docs. <https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Web/HTML/Element/dialog>.
 12. NextJS Docs. Routing. Parallel Routes. <https://nextjs.org/docs/app/building-your-application/routing/parallel-routes#modals>
 13. useRef. React. <https://react.dev/reference/react/useRef>
 14. createPortal. React. <https://react.dev/reference/react-dom/createPortal>
 15. Trofymenko, O., Dyka, A., & Loboda, Yu. (2023). Analiz instrumentiv testuvannia vebzastosunkiv. *Kiberbezpeka: osvita, nauka, tekhnika*, 4(20), 62-71. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2023.20.6271>

Ульяновська Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії
програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5945-5251

Рудянова Т. М., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії
програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Рябоволенко Е. А., викладач кафедри комп'ютерних наук
та інженерії програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0005-7713-3287

Фесенко А. Р., магістр
Університету митної справи та фінансів

АНАЛІЗ ТА РЕАЛІЗАЦІЯ АЛГОРИТМІВ ПОШУКУ ОПТИМАЛЬНОГО ШЛЯХУ ДЛЯ ПРОГРАМОВАНИХ ОБ'ЄКТІВ У ЦИФРОВИХ ІГРОВИХ ПРОСТОРАХ

Дослідження присвячене розробці методів пошуку оптимального шляху для програмованих об'єктів у віртуальному ігровому середовищі. Розглядаються алгоритмічні підходи щодо визначення найкоротшого шляху та досліджується застосування алгоритму A^ у рушії Unity для реалізації ефективного пошуку найкоротших відстаней між початковою та цільовою точками переміщення ігрового персонажа. Особливу увагу приділено аналізу ключових параметрів алгоритму – $gCost$, $hCost$ та $fCost$, які визначають евристичну оцінку вартості переміщення та дозволяють забезпечити оптимальність маршрутів у контексті складної структури ігрового простору. У дослідженні також враховуються особливості віртуального середовища, такі як наявність перешкод, змінні умови навколишнього середовища та динаміка ігрового процесу, що впливають на прийняття рішень системою навігації.*

Особливу увагу в процесі програмної реалізації алгоритму A^ приділено механізму динамічного оновлення множини сусідніх вузлів для кожної вершини графа навігації. Такий підхід забезпечує гнучкість алгоритму в умовах змінного середовища, дозволяючи оперативно реагувати на появу нових перешкод або зміну топології ігрової сцени. Завдяки цьому вдалося підвищити адаптивність системи пошуку шляху до умов реального часу, що є критично важливим для сучасних ігрових застосунків.*

Результати дослідження підтверджують високу ефективність алгоритму A^ у вирішенні задач пошуку оптимального шляху, що зумовлює його актуальність для широкого спектра застосувань у сфері комп'ютерних технологій, зокрема в ігровому дизайні, віртуальних симуляціях та системах автономної навігації в робототехніці. Інтеграція алгоритму в середовище розробки Unity не лише розширює функціональні можливості цього рушія, але й створює передумови для подальшого вдосконалення інтелектуальних компонентів ігрових та симуляційних систем. Представлене дослідження підкреслює важливість впровадження адаптивних алгоритмів навігації та їхню роль у розвитку інноваційних технологій, результати можуть бути використані для підвищення адаптивності та продуктивності навігаційних систем у комп'ютерних іграх.*

Ключові слова: A^* , Unity, IDA*, SMA*, пошук оптимального шляху, графи.

Ulianovska Yu. V., Rudianova T. M., Riabovolenko E. A., Fesenko A. R. Analysis and implementation of algorithms for finding the optimal path for programmable objects in digital game spaces

The study is devoted to developing methods for finding the optimal path for programmable objects in a virtual game environment. Algorithmic approaches to determining the shortest path are considered, and the application of the A^ algorithm in the Unity engine is investigated for implementing an effective search for the shortest distances between the initial and target points of movement of a game character. Particular attention is paid to the analysis of the key parameters of the algorithm – $gCost$, $hCost$, and $fCost$, which determine the heuristic estimate of the cost of movement and ensure the optimality of routes in the*

context of the complex structure of the game space. The study also considers the features of the virtual environment, such as the presence of obstacles, variable environmental conditions, and the dynamics of the game process, which affect decision-making by the navigation system.

In the process of software implementation of the A* algorithm, special attention is paid to the mechanism of dynamic updating of the set of neighboring nodes for each vertex of the navigation graph. This approach provides flexibility for the algorithm in a changing environment, allowing it to quickly respond to the appearance of new obstacles or changes in the topology of the game scene. This allowed us to increase the adaptability of the pathfinding system to real-time conditions, which is critically important for modern gaming applications.

The results of the study confirm the high efficiency of the A* algorithm in solving the problems of finding the optimal path, which makes it relevant for a wide range of applications in the field of computer technology, in particular in game design, virtual simulations, and autonomous navigation systems in robotics. The integration of the algorithm into the Unity development environment not only expands the functionality of this engine but also creates the prerequisites for further improvement of the intelligent components of gaming and simulation systems. The presented study emphasizes the importance of implementing adaptive navigation algorithms and their role in the development of innovative technologies. The results can be used to increase the adaptability and performance of navigation systems in computer games.

Key words: A*, Unity, IDA*, SMA*, optimal path finding, graphs.

Постановка проблеми. Пошук оптимального шляху є однією з фундаментальних задач в галузі комп'ютерних наук, яка має широке практичне застосування у таких сферах людської діяльності, як штучний інтелект, робототехніка, комп'ютерні ігри, навігаційні системи, логістика, картографія та інших суміжних напрямках. Актуальність задачі пошуку шляху в програмованих об'єктах ігрового середовища обумовлюється кількома ключовими чинниками. По-перше, зростаюча складність цифрових середовищ та зростання вимог до інтелектуальної поведінки програмних об'єктів обумовлюють потребу в ефективних алгоритмах для визначення найкоротших або найменш витратних маршрутів у заданому просторі. Сучасні комп'ютерні ігри характеризуються високим ступенем складності та динамічності віртуальних просторів, що потребує використання адаптивних і ефективних алгоритмів навігації. По-друге, підвищення вимог до реалістичності поведінки ігрових агентів, зокрема в аспектах автономного пересування, ухилення від перешкод і взаємодії з динамічними об'єктами, стимулює розвиток інтелектуальних систем керування. Крім того, сфера застосування алгоритмів пошуку шляху значно розширюється поза межами індустрії відеоігор. Такі алгоритми знаходять широке застосування в системах автономної навігації мобільних роботів, у транспортній логістиці, у візуалізації віртуальних середовищ для навчальних і тренувальних симуляцій, а також у геоінформаційних системах. Це підкреслює міждисциплінарну важливість теми дослідження та обґрунтовує потребу у створенні універсальних та продуктивних інструментів пошуку оптимальних маршрутів.

Сучасні ігри ставлять перед персонажами складні задачі з навігації в віртуальних світах, де їм необхідно швидко та ефективно знаходити шлях до цілей, обминаючи перешкоди та реагуючи на зміни в середовищі. Гравці очікують, що персонажі в іграх будуть вести себе максимально реалістично, що робить алгоритми пошуку шляху незамінними інструментами для розробників. Забезпечення реалістичної та адаптивної навігації персонажів є важливим аспектом геймдизайну, що безпосередньо впливає на якість користувацького інтерфейсу. В умовах обмежених ресурсів мобільних пристроїв та інших платформ виникає потреба в оптимізації алгоритмів пошуку шляху для забезпечення плавної роботи ігрового процесу.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проблематика пошуку оптимального шляху в середовищах з обмеженнями активно досліджується впродовж останніх десятиліть, зокрема у контексті штучного інтелекту, робототехніки та комп'ютерної графіки. Пошук оптимального маршруту (англ. Pathfinding) – це складний процес визначення найбільш вигідного шляху між двома місцями гри. На перший погляд може здаватися, що це доволі проста задача, але вона ускладнюється, коли треба врахувати такі фактори, як наявність перешкод, складність території або час, необхідний для пересування. Відтак з'ясовується, що визначення найбільш вигідного шляху є більш складним завданням, ніж просто прокладення лінії між двома точками [1], [2].

Здається, що існує багато алгоритмів пошуку шляху для вирішення одного й того самого завдання – визначення найкоротшого маршруту між двома точками на карті, проте, методи, якими вони досягають цієї мети, можуть значно відрізнятися. З плином часу деякі алгоритми оптимізувались та стали кращими за своїх попередників з точки зору швидкості та ефективності. Слід також враховувати, що не завжди найвища ефективність пошуку є пріоритетом. В контексті відеоігор, особливо важливим стає реалістичне моделювання поведінки персонажів, керованих комп'ютером (NPC, англ. Non-Player Character). Розробники іноді віддають перевагу поведінці NPC, яка наближена до реалістичної замість того, щоб просто дотримуватись найкоротшого маршруту. Це означає, що вони можуть обирати алгоритми пошуку шляху, які не обов'язково є найефективнішими в плані використання ресурсів, але забезпечують більш природну поведінку персонажів [2], [3]. Таким чином, у сфері розробки ігор підбір алгоритму пошуку шляху може базуватися не лише на технічних характеристиках, а й на прагненні до створення більш занурюваного та реалістичного ігрового досвіду. Багато відомих ігор розробляють унікальні версії цих алгоритмів, модифікуючи та адаптуючи

існуючі рішення під свої специфічні потреби. Проведемо аналіз найпопулярніших алгоритмів пошуку найкоротшого шляху та визначмо особливості їхнього застосування в контексті відеоігор.

Пошук у ширину (BFS) рівномірно досліджує всі напрямки. Це надзвичайно корисний алгоритм, який використовується не тільки для знаходження шляхів, а й для генерації процедурних карт, пошуку шляхів за допомогою поля потоків, карт відстаней та іншого аналізу карт [4]. Алгоритм пошуку у ширину (BFS) є одним з основних інструментів для аналізу та навігації по графам. Він починає свою роботу з визначеного вузла, який називається кореневим, і поступово просувається через граф, обробляючи кожен вузол на однаковій відстані від кореня перед переходом до наступного рівня. Цей методичний підхід дозволяє BFS досліджувати граф шар за шаром, що робить його ідеальним для задач, де потрібно забезпечити рівномірне та повне охоплення простору графа. BFS використовує структуру даних у вигляді черги для зберігання вузлів, які потрібно обробити. Коли вузол обробляється, всі його сусідні вузли, які ще не були відвідані, додаються до черги. Ця особливість робить BFS особливо корисним для знаходження найкоротших шляхів у графах, де всі ребра мають однакову вагу, оскільки він гарантовано знайде найкоротший шлях від кореневого вузла до будь-якого іншого вузла [2]. Однак, BFS має свої обмеження, зокрема, він може бути ресурсномістким у великих графах, оскільки потребує зберігання всіх вузлів на поточному рівні перед переходом до наступного. У сфері ігрової індустрії BFS може використовуватися не тільки для пошуку шляхів, але й для генерації карт, створення полів потоків, карт відстаней та виконання інших видів аналізу карт, що робить його універсальним та цінним інструментом у руках геймдевелоперів [5]. Прикладами застосування алгоритму BFS є такі ігри, як «The Legend of Zelda: Breath of the Wild», «Diablo II», «Minecraft».

Алгоритм Дейкстри, також відомий як пошук із єдиною вартістю, дозволяє нам визначати пріоритети шляхів для дослідження. Видатний учений у сфері інформаційних технологій Едгер Дейкстра у 1959 році представив свій алгоритм, який пізніше був названий на його честь. Цей алгоритм, що відноситься до класу жадібних алгоритмів, здатен знаходити найкоротші шляхи від однієї обраної точки графу до усіх інших точок, а також може бути адаптований для знаходження найкоротшого шляху між будь-якою парою точок [5]. Замість дослідження всіх можливих шляхів однаково, він віддає перевагу шляхам з меншою вартістю. Протягом роботи алгоритм зберігає інформацію про найкоротші відстані від початкової точки до кожної з інших точок, при цьому дані оновлюються кожного разу, коли знаходиться більш короткий шлях. Алгоритм завершується, коли всі вузли були «відвідані» та найкоротші шляхи до них визначені, надаючи на виході повний набір найкоротших шляхів від стартового вузла до усіх інших точок графу. Базова версія алгоритму Дейкстри вимагає $O(V^2)$ операцій, де V – кількість вершин у графі [6]. На старті алгоритму дистанції ініціалізуються дуже великим числом, що перевищує будь-яку можливу довжину шляху в графі, а масив відміток заповнюється нулями. Дистанція до початкової вершини встановлюється як нуль, і розпочинається основний цикл алгоритму. У кожній ітерації циклу алгоритм вибирає вершину з найменшою дистанцією, що ще не була оброблена, при цьому прапорець рівний нулю. Встановлюючи прапорець в одиницю, він позначає цю вершину як оброблену та переглядає всі її сусідні вершини. Якщо знаходиться більш короткий шлях до сусідньої вершини через поточну вершину, алгоритм оновлює дистанцію до цієї сусідньої вершини. Процес триває до тих пір, поки всі вершини не будуть оброблені – прапорець кожної вершини стане рівним 1. Прикладами застосування алгоритму Дейкстри є ігри: «Pac-Man», «Diablo III», «Civilization».

Одним із найпоширеніших алгоритмів, що використовуються для вирішення таких задач, є алгоритм A^* , відомий також як «A star», який поєднує ефективність методу Дейкстри з евристичною оцінкою напрямку пошуку та широко застосовується для визначення найефективнішого маршруту між двома точками у графі з позитивною вагою кожного ребра. У науковій літературі [6] описано переваги алгоритму A^* при роботі у статичних та частково динамічних середовищах. У роботах [7], [8] підкреслюється застосовність A^* до задач планування руху у графових моделях середовища.

Значна кількість сучасних досліджень присвячена модифікаціям базового алгоритму A^* , таким як Hierarchical A^* , Jump Point Search, Theta* тощо, що спрямовані на зменшення обчислювальної складності та часу пошуку. У публікаціях [9] розглядається інтеграція таких алгоритмів в ігрові рушії, включаючи Unity та Unreal Engine, а також практичні аспекти реалізації інтелектуальних агентів.

Окрему нішу займають роботи, присвячені застосуванню A^* в динамічних ігрових середовищах. Зокрема, у роботах [10] розглядається підхід D^* (Dynamic A^*), який дозволяє адаптуватися до змін у структурі карти під час виконання.

У середовищі Unity дослідники та практики впроваджують власні системи навігаційної сітки – NavMesh [11], однак потреба в користувацькій реалізації A^* з гнучким управлінням вузлами та евристикою залишається актуальною, особливо у випадках, коли стандартні інструменти не задовольняють вимогам розробника.

Таким чином, незважаючи на наявність численних рішень і оптимізацій, завдання ефективної реалізації алгоритму A^* у середовищі Unity, з підтримкою оновлення структури графа в режимі реального часу, потребує подальших досліджень. Саме на цю проблематику орієнтовано представлене дослідження.

Особливість алгоритму A^* полягає у використанні спеціальної допоміжної функції, так званої евристики, яка спрямовує пошук у більш перспективні напрямки та допомагає зменшити час, необхідний для

знаходження рішення [12]. Цей алгоритм класифікує вузли графу на три категорії: невідомі вузли, відомі вузли та повністю досліджені вузли. Спочатку, усі вузли, за винятком стартового, є невідомими. Відомі вузли, зі своїм потенційним шляхом, зберігаються у списку з пріоритетом, де з кожним кроком вибираються найбільш обнадійливі вузли для подальшого дослідження. Такий підхід дозволяє оптимізувати швидкість виконання алгоритму. Коли вузол повністю досліджений, його сусідні вузли додаються до списку відомих вузлів, а сам вузол переміщується до списку повністю досліджених. Якщо сусідні вузли вже досліджені або є у списку відомих, алгоритм оновлює їхній статус, якщо через поточний вузол знайдений коротший шлях. Процес пошуку продовжується, поки кінцева вершина не опиниться у списку повністю досліджених вузлів, або ж поки список відомих вузлів не спорожніє, що свідчить про відсутність розв'язку. Шлях відновлюється у зворотньому порядку від кінцевої до стартової вершини, але може бути легко перевернутий для отримання шляху у правильному напрямку [2].

Припустима евристика оцінює вартість досягнення цільового вузла таким чином, що фактична вартість не перевищує оцінену. Це означає, що вона завжди дає нижню межу вартості шляху. Якщо евристика є припустимою, але не монотонною, то можуть виникати ситуації, коли доведеться повторно досліджувати деякі вузли. Монотонна евристика, крім умови непереоцінення вартості, також повинна задовольняти нерівність трикутника. Це означає, що оцінка вартості від поточного вузла до цілі завжди менша або рівна сумі вартості переходу до сусіднього вузла та оцінки вартості від цього сусіднього вузла до цілі. Швидкість виконання алгоритму значно залежить від точності евристичної функції та ефективності реалізації структур даних для зберігання відомих та повністю досліджених вузлів. Найбільшим недоліком алгоритму A^* є його вимоги до використання пам'яті, оскільки потрібно зберігати велику кількість вузлів, що може бути непридатним для задач з великою кількістю можливих станів [2]. Прикладами використання алгоритму A^* в іграх є: «StarCraft», «Warcraft III», «Half-Life».

Алгоритм Беллмана-Форда – це алгоритм пошуку найкоротшого шляху в зваженому графі, де вага дуг може бути як позитивною, так і негативною. Він названий на честь своїх розробників Річарда Беллмана та Лестера Форда. Цей алгоритм став фундаментальним у теорії графів та використовується у багатьох областях: від маршрутизації в мережах до розподілу ресурсів у логістичних системах [13]. Алгоритм має ряд переваг: враховує негативні ваги, може виявити наявність циклів з негативною вагою в графі, що є важливою властивістю при аналізі графів. До недоліків можна віднести:

- високу часову складність, алгоритм має часову складність $O(V \cdot E)$, де V – кількість вершин, а E – кількість ребер у графі, що робить алгоритм відносно повільним, особливо для графів з великою кількістю вершин і ребер;
- алгоритм є неефективним для густих графів, у густих графах, де кількість ребер наближається до V^2 , алгоритм може бути неефективним через високу часову складність;
- працює повільніше за інші алгоритми для специфічних задач.

Алгоритм Беллмана-Форда застосовують у комп'ютерних іграх для різних цілей, враховуючи його здатність працювати з графами, які містять ребра з негативною вагою, та виявляти цикли з негативною вагою [2]. В іграх з великими відкритими світами NPC можуть використовувати алгоритм Беллмана-Форда для знаходження найкоротшого шляху до персонажів, подорожей і інші.

У стратегічних іграх алгоритм може бути використаний для оптимізації розподілу ресурсів та логістичних маршрутів, особливо коли враховуються витрати та ризики переміщення через різні території. У процесі розробки гри алгоритм може допомогти розробникам в аналізі та балансуванні геймплею, виявляючи потенційно нескінченні цикли або інші аномалії, які можуть вплинути на геймплей.

Хоча основна ціль цих алгоритмів однакова – знайти найкоротший шлях між двома точками на карті, методи, за допомогою яких кожен з них досягає цієї мети, різняться. Це дає розробникам можливість вибрати алгоритм, що найбільш адаптований під конкретні потреби та особливості їхніх ігор.

У той же час, актуальним напрямом залишаються дослідження, спрямовані на підвищення продуктивності алгоритму в умовах реального часу, адаптацію до зміни топології середовища, а також використання у графічних рушіях для комп'ютерних ігор.

Мета дослідження. Метою даного дослідження є програмна реалізація алгоритму оптимізації пошуку найкоротшого шляху для підвищення продуктивності та точності навігації в комп'ютерних іграх в умовах змінної структури сцени.

Методи дослідження. У процесі дослідження використано методи алгоритмічного аналізу, моделювання та програмної реалізації з акцентом на практичну імплементацію в ігровому рушії Unity. В роботі використовувалися методи та технології розробки ігрових мовою програмування C#. Як основний підхід до побудови навігаційної системи було обрано алгоритм A^* , який базується на евристичному пошуку найкоротшого шляху у графі.

Виклад основного матеріалу. Алгоритм A^* є методом пошуку найкоротшого шляху в зваженому графі, що забезпечує знаходження оптимального маршруту від початкової вершини до кінцевої. Його робота базується на об'єднанні фактичної вартості вже пройденого шляху (g) та евристичної оцінки (h), яка наближено визначає вартість переміщення до цільової вершини. На кожному кроці алгоритм обирає для

подальшого розгляду вершину з мінімальним значенням сумарної оцінки ($f = g + h$). Параметр g відображає сукупну вартість переміщення від початкової точки до поточної, враховуючи всі пройдені клітинки. Параметр h є евристичною оцінкою вартості пересування від поточного положення до кінцевої вершини і використовується для наближеного прогнозування залишкової вартості шляху. Загальна оцінка f обчислюється як сума значень g та h , що дозволяє алгоритму ефективно спрямовувати пошук у напрямку до мети.

Алгоритм здійснює вибір напрямку пошуку, орієнтуючись на мінімальне значення функції f : на кожному етапі він обирає клітинку з найменшим значенням f та переходить у неї. Процес пошуку триває доти, доки не буде досягнута цільова клітинка (рисунок 1).

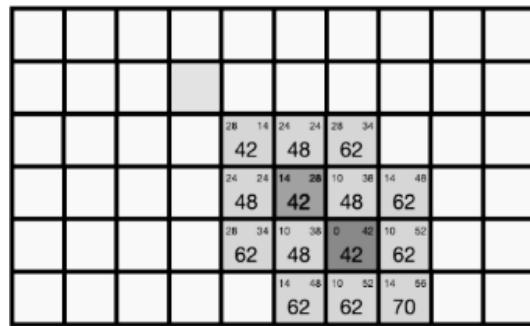


Рис. 1. Ілюстрація алгоритму пошуку шляху A^*

Алгоритм A^* у процесі виконання зберігає всі згенеровані вузли в оперативній пам'яті, що дозволяє ефективно використовувати наявну інформацію для побудови найкоротшого шляху. Однак така стратегія зумовлює високу пам'ятєву складність алгоритму, оскільки зі збільшенням розміру простору пошуку зростає і кількість вузлів, які необхідно зберігати. Це є одним із суттєвих недоліків A^* , особливо у випадках роботи з великими графами. Для подолання цієї обмеженості було запропоновано алгоритм ітеративного заглиблення A^* (IDA^*), який поєднує переваги евристичного пошуку A^* та економного за пам'яттю пошуку в глибину. IDA^* дозволяє знаходити оптимальні маршрути між початковим і кінцевим станами в графах або деревоподібних структурах, суттєво зменшуючи витрати пам'яті. На відміну від A^* , алгоритм IDA^* підтримує у пам'яті лише інформацію про поточний шлях і його вартість, що робить його придатним для вирішення задач у великих просторах станів із обмеженими ресурсами пам'яті [14].

З погляду просторової складності алгоритм ітеративного заглиблення A^* (IDA^*) є більш ефективним порівняно з класичним алгоритмом A^* . Під час виконання алгоритму A^* в оперативній пам'яті зберігається уся область пошуку, що при роботі з великими просторами станів призводить до істотних витрат пам'ятєвих ресурсів. Натомість алгоритм IDA^* оптимізує використання пам'яті шляхом збереження лише поточного вузла та відповідної вартості шляху, що дозволяє уникнути експоненційного зростання обсягу пам'яті при розширенні простору пошуку. Такий підхід забезпечує зменшення просторових витрат без істотного погіршення якості пошуку оптимального маршруту (рисунок 2).

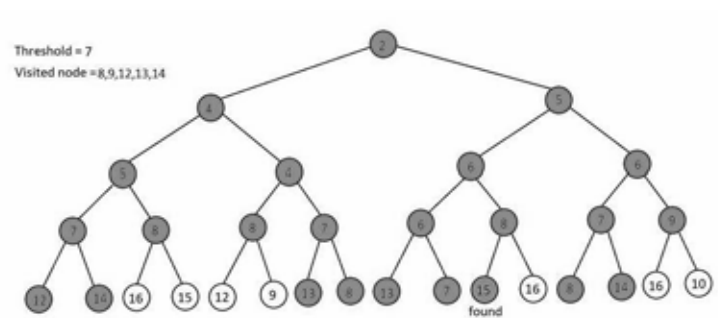


Рис. 2. Алгоритм IDA^*

Алгоритм ітеративного заглиблення A^* (IDA^*) здійснює дослідження простору станів за допомогою пошуку в глибину з обмеженням за вартістю. На початковому етапі задається порогове значення, яке дорівнює значенню евристичної оцінки f для початкового вузла, де $f(n) = g(n) + h(n)$. Під час пошуку алгоритм розширює лише ті вузли, для яких виконується умова $f(n) \leq \text{threshold}(n)$. Якщо у процесі пошуку знаходиться цільовий вузол, алгоритм завершує роботу. У випадку, коли для певного вузла значення $f(n)$ перевищує поточне порогове значення, алгоритм не розширює цей вузол, але фіксує мінімальне з перевищених значень.

Після завершення ітерації нове порогове значення встановлюється рівним мінімальному зафіксованому $f(n)$, яке перевищило попередній поріг. Цей ітеративний процес повторюється до тих пір, поки не буде знайдено оптимальне рішення, або доки простір пошуку не буде повністю вичерпано.

Алгоритм Weighted A* (вагований A*) являє собою модифікацію класичного алгоритму A* для задачі пошуку шляху в графах, де окремі ребра або дії мають різні вагові коефіцієнти або вартості. На відміну від базового варіанта A*, який зазвичай передбачає однакову вагу всіх ребер і спрямований на знаходження найкоротшого шляху, у вагованому варіанті кожне ребро або дія може мати індивідуальну вагу. Це дозволяє точніше моделювати, наприклад, різну вартість переміщення в залежності від напрямку або складність виконання певних дій.

Основна концепція роботи алгоритму Weighted A* зберігає структуру класичного A*, проте обчислення функції оцінки $f(n)$ доповнюється урахуванням вагових коефіцієнтів. У загальному вигляді функція $f(n)$ визначається за формулою:

$$f(n) = g(n) + w \cdot h(n),$$

де $g(n)$ – фактична вартість шляху від початкового вузла до поточного, $h(n)$ – евристична оцінка вартості шляху від поточного вузла до цільового, а w – коефіцієнт ваги, що відображає вартість переходу через відповідне ребро або виконання певної дії [15].

Алгоритм Weighted A* є ефективним засобом для розв'язання задач пошуку шляху в умовах, коли вартість переходів між вузлами варіюється, і виникає необхідність врахування цих відмінностей при прийнятті рішень щодо оптимального вибору маршруту.

Алгоритм D* (динамічний A*) є модифікацією класичного підходу до пошуку шляху, який використовує концепцію сенсорного сприйняття навколишнього середовища та здатний адаптуватися до змін, зокрема до появи динамічних перешкод, шляхом оновлення ваг ребер у реальному часі. На кожному етапі роботи D* розв'язує задачу знаходження найкоротшого шляху від поточного положення до стартового вузла, припускаючи, що вузли з невідомим статусом прохідності є доступними для пересування. Для обробки змін у вартості переходів алгоритм підтримує спеціальний список вузлів (OPEN list), який використовується для поширення оновленої інформації. Вузли, що беруть участь у процесі, класифікуються за кількома станами: NEW, OPEN, CLOSED, RAISE та LOWER. Робота алгоритму має ітеративний характер: на кожному кроці обирається вершина зі списку OPEN для оцінювання. Пошук у D* здійснюється у зворотному напрямку – від цільового вузла до початкового. Кожна розширювана вершина містить зворотний покажчик на наступну вершину маршруту до цілі та має доступ до точної вартості шляху до кінцевого вузла.

Алгоритм LPA* (Lifelong Planning A*) є розвитком класичного алгоритму A*, орієнтованим на довготривале планування шляхів у динамічних середовищах (рисунк 3). Ця інкрементна модифікація A* здатна адаптуватися до змін у структурі графа без необхідності повного перерахунку шляху. У процесі пошуку алгоритм оновлює значення функції g , що представляє собою відстань від стартового вузла, використовуючи дані, отримані під час попередніх обчислень, і за потреби коригує їх. Завдяки використанню накопиченої інформації LPA* суттєво зменшує кількість вершин, які потрібно обробити у порівнянні з класичним A*, оновлюючи лише ті значення g , що критично впливають на формування найкоротшого шляху. Це забезпечує значну економію обчислювальних ресурсів та підвищує ефективність роботи алгоритму.

Принцип роботи алгоритму LPA* ґрунтується на концепції довготривалого планування та інкрементного оновлення інформації у графовій структурі. Для реалізації модифікованої версії цього алгоритму необхідно сформувати базові елементи, зокрема поле ваг, яке відображає вартість переходу між суміжними вузлами графа. Наявність актуальної інформації про ваги дозволяє алгоритму своєчасно коригувати маршрут із мінімальними обчислювальними витратами у відповідь на зміни в середовищі.

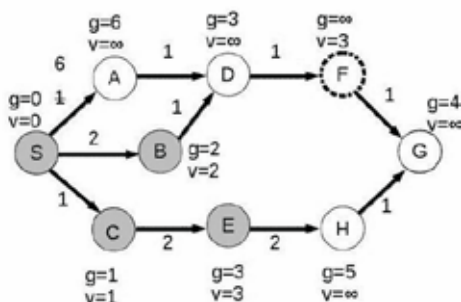


Рис. 3. Алгоритм LPA*

Алгоритм A* призначений для пошуку найкоротшого шляху у графі з ваговими коефіцієнтами ребер. На початковому етапі визначаються стартова та кінцева точки, після чого формуються два списки вузлів:

відкритий (OPEN) та закритий (CLOSED). Кожному вузлу призначаються три основні характеристики: gCost – фактична вартість пройденого шляху від стартової точки, hCost – евристична оцінка відстані від поточного вузла до цільового, та fCost, що є сумою gCost та hCost.

Алгоритм функціонує в циклі до тих пір, поки відкритий список не стане порожнім. На кожній ітерації обирається вузол із найменшим значенням fCost, який переноситься з відкритого списку до закритого. Для кожного суміжного вузла здійснюється перевірка його присутності у відкритому або закритому списку. Якщо сусідній вузол ще не оброблявся, його додають до відкритого списку з відповідним обчисленням значення fCost. Якщо вузол вже відомий, перевіряється можливість покращення шляху до нього, і за потреби відбувається оновлення відповідних характеристик. Процес пошуку завершується, коли досягнуто цільовий вузол або відкритий список спорожнів, що свідчить про відсутність шляху до мети. Блок-схема роботи алгоритму представлена на рисунку 4.

Програмна реалізація алгоритму була виконана у середовищі Unity, де в процесі роботи формується сітка, на якій визначаються стартова та кінцева точки (рисунок 5).

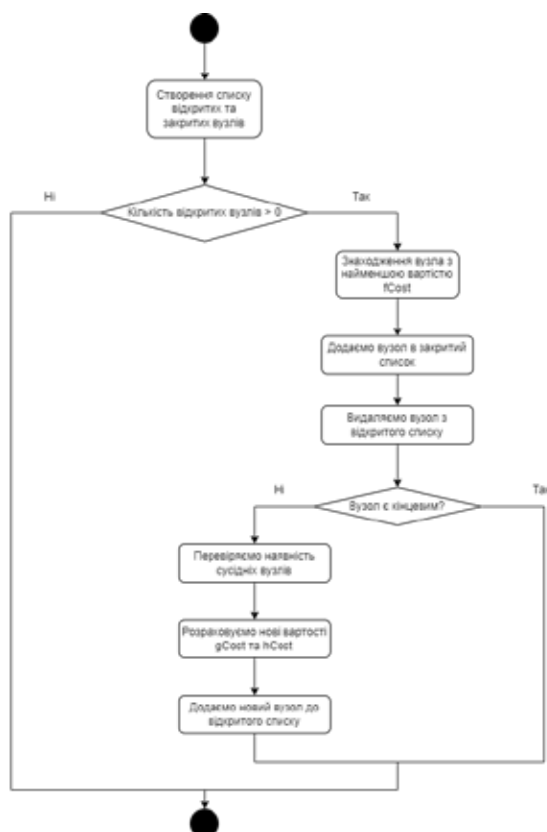


Рис. 4. Алгоритм пошуку шляху A*



Рис. 5. Створення сітки вузлів при реалізації алгоритму Алгоритм A* на рушії Unity

Після закінчення роботи алгоритму зображується повний шлях з відповідними сусідніми вузлами, що проілюстровано на рисунку 6.



Рис. 6. Зображення повного шляху

Додавлена можливість увімкнути режим показу величини «вартостей» при розрахунку шляху (рисунок 7).

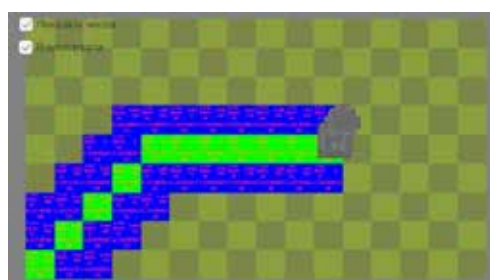


Рис. 7. Візуальне відображення чисел

При збільшенні масштабу зображення можна спостерігати всі величини, при яких обчислюється шлях (рисунок 8).

1.485	3.162	8.071	2.135	8.455	1.414
281	278	055	055	281	214
11.64755	10.30714	9.889454			
8.855	3.855	7.071	2.825	8.071	2.235
354	551	055	437	055	055
10.28241	9.889455	10.30714			
8.855	4.242	8.055	1.055	8.455	3.162
354	551	254	551	281	278
9.889454	10.28241	11.64755			

Рис. 8. Зображення всіх величин вузла

На кожному вузлі зображено перші 2 верхніх числа: gCost – відстань вузла від поточного та hCost – відстань вузла від кінцевого, а нижче зображено число fCost – сума величини gCost + hCost.

Висновки. В роботі проведений аналіз методів та алгоритмів пошуку найкоротшого шляху з визначення їхніх переваг і недоліків, а саме визначені найбільш ефективні методи для різних типів рішень, розглянути можливі модифікації методів та особливості їх практичної реалізації. Розроблена програмна реалізація алгоритму, яка заснована на модифікованому методі пошуку найкоротшого шляху, що дозволяє суттєво зменшувати час на прийняття рішень в комп'ютерній грі. Перевагою роботи є розроблення й тестування модифікованої версії алгоритму A*, реалізованого на рушії Unity з автоматичним коригуванням важелів під час динамічної зміни ігрового середовища.

Новизна дослідження полягає в імплементації алгоритму A* в рушії Unity, де було враховано параметри gCost, hCost і fCost для здійснення ефективної роботи алгоритму. Особливу увагу приділено реалізації динамічного оновлення сусідів для кожного вузла. Це дозволяє алгоритму адаптуватися до змін середовища в реальному часі, наприклад, при появі нових перешкод, зміні доступності ділянок мапи тощо. Реалізовано механізми перевірки актуальності сусідів у кожній ітерації пошуку, що підвищує надійність та гнучкість навігаційної системи. Для емпіричної перевірки ефективності розробленої моделі були створені ігрові сцени з різними сценаріями: статична карта, карта з мобільними перешкодами та динамічне оновлення структури середовища. Порівняльний аналіз проводився за кількома критеріями: кількість оброблених вузлів, час виконання пошуку, довжина знайденого маршруту.

Алгоритм демонструє високу ефективність у визначенні найкоротших шляхів, що має значення для задач, в яких критично важливою є мінімізація довжини маршруту. Така гнучкість та налаштованість робить алгоритм придатним для широкого спектру застосувань, включаючи ігрові проекти, симуляції та робототехніку. Відносна нескладність інтеграції в існуючі проекти рушію Unity є ще одним значущим внеском даної роботи, що спрощує використання та модифікацію алгоритму для розв'язання проблем інших досліджень. Розвиток штучного інтелекту, машинного навчання та інших передових технологій відкриває нові можливості для покращення алгоритмів пошуку шляху.

Список використаних джерел:

1. Daohong Liu. Research of the Path Finding Algorithm A* in Video Games. Highlights in Science, Engineering and Technology. Volume 39, 2023. 763-768 p.
2. Фесенко А.Р. Комп'ютерна реалізація аналізу пошуку шляху в програмованих об'єктах гри. URL: <https://surl.li/kgipri>
3. Гарт, П., Нільсен, Н., Раппапорт, Б. A Formal Basis for the Heuristic Determination of Minimum Cost Paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics. 1968. ol. 4, No. 2. С. 100–107.
4. Introduction to the A* Algorithm. URL: <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>.
5. Dijkstra's Algorithm – Shortest Path. URL: <https://surl.li/ysngqd>.
6. Алгоритм Дейкстри. URL: https://www.wikiwand.com/uk/articles/Алгоритм_Дейкстри.
7. Рассел, С., Норвіг, П. Штучний інтелект: сучасний підхід. Київ: Діалектика, 2020. 1168 с.
8. LaValle, S. M. Planning Algorithms. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 826 p.
9. Millington, I., Funge, J. Artificial Intelligence for Games. 2nd ed.
10. Koenig, S., Likhachev, M. D* Lite // Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence. 2002. Vol. 15, No. 1. С. 476–483.
11. Unity AI Navigation Docs, 2023.
12. A* Search: Concept, Algorithm, Implementation, Advantages, Disadvantages. URL: <https://surl.li/zazxtd>.
13. Krianto S. Bellman Ford algorithm – in Routing Information Protocol. Journal of Physics Conference Series, Volume 1007(1), 2018. 10 p.
14. Iterative Deepening A* Algorithm (IDA*). URL: <https://www.tpointtech.com/iterative-deepening-a-algorithm>.
15. D*, D* Lite & LPA*. URL: <https://surl.li/psneqo>

References:

1. Liu, D. (2023). Research of the Path Finding Algorithm A* in Video Games. Highlights in Science, Engineering and Technology, 39, 763–768.
2. Fesenko, A.R. (n.d.). Computer Implementation of Pathfinding Analysis in Programmed Game Objects. Retrieved from <https://surl.li/kgipri>
3. Hart, P., Nilsson, N., & Raphael, B. (1968). A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths. IEEE Transactions on Systems Science and Cybernetics, 4(2), 100–107.
4. Introduction to the A* Algorithm. (n.d.). Red Blob Games. Retrieved from <https://www.redblobgames.com/pathfinding/a-star/introduction.html>
5. Dijkstra's Algorithm – Shortest Path. (n.d.). SURL. Retrieved from <https://surl.li/ysngqd>
6. Alhorytm Deikstry [Dijkstra Algorithm]. (n.d.). Wikiwand – Wikiwand. Retrieved from https://www.wikiwand.com/uk/articles/Алгоритм_Дейкстри [in Ukrainian].
7. Russell, S., & Norvig, P. (2020). Shtuchnyi intelekt: suchasnyi pidkhyd (3rd Ukrainian ed.) [Artificial Intelligence: A Modern Approach]. Kyiv: Dialektyka. [in Ukrainian].
8. LaValle, S. M. (2006). Planning Algorithms. Cambridge University Press.
9. Millington, I., & Funge, J. (2009). Artificial Intelligence for Games (2nd ed.). Morgan Kaufmann.
10. Koenig, S., & Likhachev, M. (2002). D* Lite. Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence – AAAI Conference on Artificial Intelligence, 15(1), 476–483.
11. Unity AI Navigation Docs. (2023). Unity Documentation – Unity Documentation. Retrieved from <https://docs.unity3d.com/Manual/nav-BuildingNavMesh.html>
12. A* Search: Concept, Algorithm, Implementation, Advantages, Disadvantages. (n.d.). BrainKart – BrainKart. Retrieved from <https://surl.li/fvoczu>
13. Krianto, S. (2018). Bellman Ford algorithm – in Routing Information Protocol. Journal of Physics: Conference Series – Journal of Physics: Conference Series, 1007(1), 012055. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1007/1/012055>
14. Iterative Deepening A* Algorithm (IDA*). (n.d.). TpointTech – TpointTech. Retrieved from <https://www.tpointtech.com/iterative-deepening-a-algorithm>
15. D*, D* Lite & LPA*. (n.d.). JavaTpoint – JavaTpoint. Retrieved from <https://www.javatpoint.com/iterative-deepening-a-algorithm>

КІБЕРБЕЗПЕКА ТА ЗАХИСТ ІНФОРМАЦІЇ

UDC 343.532:004.056

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.13>

Haborets O. A., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Operational and Investigative Activities and Information Security, Faculty No. 3
Donetsk State University of Internal Affairs
ORCID: 0000-0001-7791-6795

Rybalchenko L. V., Ph.D, Associate Professor at the Department of Cyber Security and Information Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-0413-8296

TYPES, CHARACTERISTICS AND EXECUTION METHODS OF CYBER FRAUD

The article is dedicated to the study of cyber fraud characteristics and classification, methods of its execution. It examines key factors contributing to the rise of cybercrime, including the rapid digitalization of society, economic destabilization, the psycho-emotional vulnerability of the population, and the advancement of social engineering technologies.

In today's world, where technology has become an integral part of our daily lives, cyber fraud has become one of the biggest threats. With the growing use of the internet and mobile devices, cybercriminals are finding new ways to defraud people and organisations, causing them significant financial and reputational damage.

The process of cyber fraud often begins with fraudsters collecting information about their potential victims. This can be personal data, financial details, or even online behavioural history. Using this data, criminals create convincing fake platforms or messages.

The purpose of the article is to examine the current state of cyber fraud in the country and offer advice on protecting personal data and finances.

The main types of fraud are analyzed, including phishing, manipulative schemes in e-commerce, cryptocurrency fraud, and cyberbullying. Special attention is given to the specifics of fraudulent schemes in wartime conditions, including fake charitable initiatives and fraud involving disinformation.

Cyber fraud is a real threat that is growing every year, and protecting yourself from it requires care and caution. It is important not only to choose reliable online platforms, but also to have a strategic approach to online security. It is necessary to be vigilant and use modern protection methods to minimise risks and avoid them. Combating cyber fraud is one of the most important tasks for modern organisations and Internet users.

The study proposes approaches to combating cybercrime, which include improving digital security mechanisms, enhancing public cyber literacy, and implementing effective measures for detecting and counteracting fraudulent schemes.

Key words: cybercrime, fraud, phishing, social engineering, cryptocurrency fraud, digital security, disinformation.

Габорець О. А., Рибальченко Л. В. Види, характеристики та способи вчинення кібершахрайства

Стаття присвячена дослідженню шахрайств у кіберпросторі, їх особливостей, класифікації та методів здійснення. Розглянуто ключові фактори, що сприяють зростанню кіберзлочинності, зокрема, інтенсивну цифровізацію суспільства, економічну дестабілізацію, психоемоційну вразливість населення та розвиток технологій соціальної інженерії.

У сучасному світі, де технології стали невід'ємною частиною нашого повсякденного життя, кібершахрайство стало однією з найбільших загроз. Зі зростанням використання інтернету і мобільних пристроїв, кіберзлочинці знаходять нові способи обману людей та організацій, завдаючи їм значних фінансових та репутаційних збитків.

Процес кібершахрайства часто починається з того, що шахраї збирають інформацію про своїх потенційних жертв. Це можуть бути персональні дані, фінансові реквізити або навіть історія онлайн-поведінки. Використовуючи ці дані, злочинці створюють переконливі фальшиві платформи чи повідомлення.

Метою статті є дослідження сучасного стану кібершахрайства в країні та запропоновано поради щодо захисту особистих даних та фінансів.

Проаналізовано основні види шахрайства, включаючи фішинг, маніпулятивні схеми у сфері електронної комерції, криптовалютні шахрайства та кібербулінг.

Окрему увагу приділено специфіці шахрайських схем в умовах воєнного стану, включаючи фіктивні благодійні ініціативи та шахрайство з використанням дезінформації.

Кібершахрайство – це реальна загроза, яка зростає з кожним роком, і захист від нього вимагає уважності та обережності. Важливо не тільки обирати надійні онлайн-платформи, а й мати стратегічний підхід до безпеки в інтернеті. Необхідно бути пильними і використовувати сучасні методи захисту для мінімізації ризиків та їх уникнення. Протидія кібершахрайству є однією з найважливіших задач для сучасних організацій та користувачів Інтернету.

Запропоновано підходи до боротьби з кіберзлочинністю, що включають вдосконалення механізмів цифрової безпеки, підвищення кіберграмотності населення та впровадження ефективних заходів з виявлення та протидії шахрайським схемам.

Ключові слова: кіберзлочинність, шахрайство, фішинг, соціальна інженерія, криптовалютні шахрайства, цифрова безпека, дезінформація.

Problem Raising. Execution of cyber fraud has become particularly relevant in the context of global challenges such as the COVID-19 pandemic and the war waged by Russia against Ukraine. Criminal activities in cyberspace are driven by the unique nature of the digital environment and its ability to adapt to socio-economic changes, creating new opportunities for manipulation and illicit financial gain.

One of the key factors contributing to the spread of cybercrime is the intensive digitalization of society. The increased use of the Internet, prompted by quarantine restrictions, martial law, and the transition of a significant part of socio-economic activities to digital formats, has substantially expanded the volume of online interactions among citizens. The widespread adoption of remote work, e-commerce, and digital communication platforms has acted as a catalyst for the development of fraudulent schemes aimed at exploiting users' trust and stealing their personal data.

Another crucial factor is the psycho-emotional vulnerability of the population, which has been exacerbated by both the pandemic and wartime conditions. Mass fears, anxiety, and a general sense of instability have become tools actively used by fraudsters for manipulative purposes. For instance, they create fraudulent charitable initiatives, offer pseudo-medical services or fake protective measures against the virus, enabling them to gain unlawful access to citizens' financial resources.

Economic destabilization also plays a significant role in the rise of cybercrime, as financial hardships have affected a considerable portion of the population. Cybercriminals exploit this context by offering fraudulent job vacancies, false promises of quick earnings, or fake "financial assistance" programs. These methods are particularly prevalent due to their ability to take advantage of individuals' financial needs during crises.

Disinformation serves as another powerful tool for cyber fraud. During armed conflicts and information warfare, the spread of fake news, chain messages, and other forms of misleading content has become a key method of gaining access to personal data and financial resources. Fraudsters use disinformation to create an atmosphere of distrust and chaos, making it more difficult to identify real threats.

A significant transformation in user behavior online has also contributed to the proliferation of cyber fraud. The mass shift to e-commerce, the growing popularity of online services, and increased social media engagement have substantially heightened the risks of falling victim to fraudulent websites. Cybercriminals create phishing websites that mimic legitimate platforms or use social engineering techniques to gain unauthorized access to users' confidential information.

Thus, cyber fraud is a multifaceted phenomenon influenced by social, psychological, and economic factors. Criminal activities in the digital space are characterized by a high degree of adaptability, the use of advanced information technologies, and the capacity to target a vast audience of potential victims. All of these aspects underscore the urgent need for the development of scientifically grounded approaches to detecting and combating cyber fraud, taking into account the specific methods used by cybercriminals and the scale of their impact on society.

Analysis of recent research and publications. The problems of frauds committed in cyberspace in Ukraine have been paid attention to by such national scholars as O. V. Byshevets, O. S. Belytskyi, T. S. Vaida, V. V. Vynnyk, V.M. Galunko, L.P. Hrynko, N.O. Dumanskyi, O.M. Dzhezha, L.M. Ivashko, O.V. Klyuvak, T.V. Korshykova, O.I. Kryvenko, A.B. Mizerak, L.M. Prudka, D.V. Perepelytsia, T.V. Romanenko, Y.P. Rudenko, V.P. Sabadash, O.A. Samoilenko, I.V. Sabadash, N.V. Smetanina, I.A. Fedchak, I.M. Chekmariova, S.S. Cherniavskyi, S.V. Shapochka, O.M. Yurchenko and others. In their studies, they considered general aspects of crimes committed in cyberspace, in particular, Internet fraud in peacetime. The study of frauds committed on the Internet under martial law was carried out by such scholars as O. M. Bryskovska, M. O. Helemey, Y. V. Levkivska, M. E. Sobachenko and V. H. Teliychuk.

The purpose of the article. The purpose of the study is to systematise and analyse frauds in cyberspace, their types, features and methods of commission, and to identify the key factors contributing to their spread. Particular attention is paid to frauds that have arisen or intensified as a result of socio-economic crises, the COVID-19 pandemic and martial law in Ukraine. Based on the analysis of existing fraudulent schemes, the author proposes effective mechanisms for their prevention and counteraction, including legal, technological and educational measures.

Summary of the main material. Fraud is one of the most common types of criminal offences against property in many criminal law systems, including in Ukraine. Given the trend towards an increase in the number of cases of

property encroachments through fraudulent actions, combating these offences remains one of the key tasks of law enforcement agencies. The commission of such crimes not only threatens the property rights of individuals, but also harms the stability of the state's economic system, jeopardising its effective functioning.

According to Article 190 of the Criminal Code of Ukraine, fraud is defined as the misappropriation of another's property or the acquisition of rights to it by deception or breach of trust [1]. This criminal offence is characterised by a special focus, which may relate to both material assets and rights to such assets. An important feature of fraud is the presence of direct intent, which implies that the perpetrator is aware of the unlawfulness of his or her actions, and a mercenary motive aimed at obtaining an unlawful benefit.

The development of digital technologies and the widespread use of the Internet in Ukraine have created new conditions for committing fraud. Due to the accessibility of the Internet for citizens of different age groups, criminals have received new tools to implement their illegal intentions. The peculiarity of Internet fraud is the absence of direct contact between the offender and the victim, which not only facilitates concealment of the offender's identity but also encourages him to develop more complex and sophisticated schemes for seizing other people's property or financial resources.

Frauds committed in cyberspace include numerous types of crimes that use digital technologies to manipulate, deceive and illegally obtain benefits. According to the Law of Ukraine "On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine" [3] (hereinafter – the Law), "cyberspace" is defined as an environment (virtual space) that provides opportunities for communication and implementation of social relations, formed through the functioning of interconnected communication systems and electronic communications using the Internet and/or other global data networks.

The main subcategory observed in this context is the non-delivery of orders placed through online resources. This phenomenon includes transactions for the purchase and sale of goods on digital trading platforms, placement of advertisements for the provision of certain services and receipt of advance partial or full payment for such services or goods. Such cases pose a significant threat to e-commerce and pose risks to the financial security of users, as unfair practices may be accompanied by intentional fraudulent schemes and breach of contractual obligations. The growth in the activity of such schemes is due to the large-scale transition of business entities to online platforms. This format allows optimising operating costs, in particular, eliminating the need to lease physical commercial premises, which, in turn, contributes to more affordable and competitive prices for goods and services, increasing their attractiveness to end users.

Among the most common methods of cybercrime, along with the failure to deliver goods or services, a special place is occupied by social engineering techniques used to manipulate the minds of users. One of the most dangerous manifestations of such techniques is phishing, which allows attackers to access victims' confidential information through deception. This type of fraud has become particularly popular due to the growing use of digital platforms and the lack of cyber literacy among the population.

Phishing is a type of fraud based on manipulative techniques that allow users to obtain personal data, such as passwords, bank card numbers, account logins, etc. Phishing attacks are based on misleading the user into voluntarily handing over their data to the attackers. Phishing can be implemented in various forms and targets both individuals and organisations.

The main types of phishing attacks:

1. Email Phishing.

Email phishing attacks are the most common type of cybercrime used for both mass and targeted attacks. The basic scheme involves sending fake emails on behalf of banks, government agencies, online services or social networks. Such emails may contain:

Fake links that lead to fake web pages that look like genuine banking sites or authorisation platforms;

Malicious attachments (.pdf,.docx,.xls files) that contain viruses, spyware or macros for data theft;

Phishing forms that mimic user account login pages, but send the entered data to the attackers.

The most dangerous attacks are Spear Phishing, which targets specific individuals (company executives, government officials, journalists, etc.). Such emails contain personalised information, which increases their credibility and effectiveness.

2. Smishing.

Smishing is SMS and messenger phishing, where fraudsters use text messages to get the victim to perform certain actions. Attackers send messages on behalf of banks, delivery services, mobile operators, or even government agencies with a demand:

Click on a fraudulent link to confirm a transaction, update an account, or view an 'important message';

Provide confidential information in response to the message (e.g. a verification code for financial transactions);

Download a fake application that is actually malware.

Modern spear phishing attacks actively use fake messages about problems with bank accounts, blocked cards, or winnings in promotions. The victim, panicking, is more likely to act in favour of the attackers without checking the authenticity of the information.

3. Vishing.

Vishing is a method of fraud through telephone calls, during which attackers pretend to be representatives of banks, law enforcement agencies, tax authorities or technical support. The main scenarios of such attacks include:

Imitation of bank employees who inform the victim of “suspicious activity” on the account and could block the card, forcing the owner to hand over passwords or one-time access codes;

Fraudulent calls on behalf of law enforcement agencies, which scare the victim that their account is being “checked for financial crimes”, demanding that they transfer funds to a ‘safe account’;

Tech support-related vishing, where attackers tell the user that a virus has been ‘detected’ on their device and offer to install ‘security’ software that is actually a Trojan.

Some vishing attacks are based on collecting public information about the victim (e.g. from social media), which allows fraudsters to be more convincing and use personalised details during the conversation.

4. Social media phishing

On social media, fraudsters create fake accounts or hack into the accounts of real people, using them to commit fraud. The main schemes include:

Sending personal messages asking for money (on behalf of a hacked friend or relative);

Fake sweepstakes and contests that require the victim to click on a link and enter bank card details to “claim the prize”;

Fraudulent job offers, where criminals pretending to be HR managers promise easy money by demanding an advance payment or transfer of personal data.

Given the popularity of social media, this method of phishing is particularly dangerous, as people trust messages from friends more than emails or calls.

5. Web Phishing.

Phishing websites are created to imitate legitimate resources in order to collect personal data from users. They can look like:

Fake login pages (banks, postal services, online stores, social networks);

Fake payment systems that steal credit card data.

Phishing remains one of the most serious cyber threats nowadays, requiring comprehensive protection measures and continuous improvement of defensive tactics.

It is also worth paying attention to malware, which is often an integral tool for phishing attacks. Malware is one of the most common threats used to achieve various criminal goals, such as stealing confidential information, disrupting systems or blackmailing. Typically, PUPs are distributed via phishing links or attachments that masquerade as legitimate files or programs. When combined with personalised phishing messages created with the help of artificial intelligence, PUP becomes particularly dangerous as it can infiltrate the systems of even experienced users.

According to the statistics of the Prosecutor General’s Office of Ukraine, in 2024, the number of criminal proceedings opened under Article 190 of the Criminal Code of Ukraine ‘Fraud’ was 64,978. Compared to 2022, this is 2.7 times more, but 21% less than in 2023 (82,609 cases). Almost every fourth case goes to court: in 2023 – 14838 cases, in 2024 – 15607 cases [6].

By the end of 2024, 62% of Ukrainians had become victims of cyber fraud, while at the beginning of 2024, there were about 21% of such cases. 30% of Ukrainians have not encountered such fraudsters but have heard of such cases, and only 8% have neither encountered nor heard of such cases. Since the beginning of 2025, almost 40% of Ukrainians have become the most aware and informed about cases of fraud and have a better understanding of how to protect their data from cybercriminals. The most common cases involve the purchase and sale of goods when the seller, having received money for the goods, does not provide certain services, i.e. failure to deliver online orders by pseudo-sellers. The second most common type is phishing, where social engineering and software tools are used to create malicious links for users to steal their personal data, accounts, etc. In third place are ‘bank calls’, when fraudsters pose as bank representatives and obtain the necessary information for abuse.

In 2025, cybercriminals have become even more inventive, using new methods of data theft and fake bank websites that ask you to click on a link and provide your card details. Phone fraudsters use AI-generated voices of relatives or bank employees to steal data. Scammers create fake, fake photos and extort money. Therefore, it is necessary to follow safety rules, protect yourself and your finances, take your time to trust strangers and always check the information.

Cyberbullying is a complex social phenomenon that has arisen as a result of the rapid development of information and communication technologies and the growing integration of digital platforms into everyday life. It is a form of aggressive behaviour that is implemented through the online environment with the aim of psychological pressure, humiliation or discrediting a person.

This form of aggression is manifested through the use of digital platforms to intimidate, humiliate, blackmail or discredit a person. The characteristic features of cyberbullying are its systematic nature, public nature and the possibility of anonymity of offenders, which creates additional challenges for detecting and preventing this phenomenon.

Its consequences can be profound and have a serious impact on the victim, including emotional exhaustion, social isolation and reduced self-esteem. Factors that contribute to the spread of cyberbullying include the growing availability of digital technologies, low awareness of cybersecurity basics, and the lack of effective legal mechanisms to combat such phenomena.

There are several key types of fraudulent schemes in the cryptocurrency sector. First, it is deception through social media, where attackers create fake accounts imitating famous people or companies to convince users to invest in fraudulent projects. Secondly, social engineering is widely used, when criminals manipulate the emotions of victims to force them to transfer access to their cryptocurrency wallets.

Manipulations with initial coin offerings (ICOs) are particularly noteworthy. Attackers create fictitious projects promising high profits but disappear as soon as the funds are raised. In addition, under the guise of crypto investment funds, fraudsters promise users a guaranteed profit, which is often part of pyramid schemes.

Cloud mining fraud also poses a serious threat when, under the pretext of providing cryptocurrency mining services through cloud platforms, criminals obtain users' funds without performing any real operations. All these schemes require special attention and improved cybersecurity methods to protect crypto assets.

In the context of military conflict, criminals actively exploit the vulnerabilities of society to implement specific fraudulent schemes that have become widespread due to the current circumstances. Such schemes include fictitious fundraising for the army, manipulation of reports of missing or captured persons, and distribution of fake evacuation notices requiring advance payment or "financial assistance".

These fraudulent activities are aimed at exploiting the emotional state of victims caused by fear, anxiety or a desire to help in a crisis. Criminals are actively adapting their methods to current realities, using social platforms, mobile applications and other digital communication tools to achieve their goals. Fraud is often based on social engineering techniques, such as creating trusting situations or influencing a sense of responsibility that forces citizens to transfer funds or personal data.

The key tools used by fraudsters are computers, mobile devices, bank accounts registered in the names of front men, and specialised software. In addition, online platforms are actively used to implement such schemes, allowing for the rapid dissemination of disinformation, fake websites and ads. The effectiveness of fraud is often reinforced by the high level of technological equipment of criminals, which allows them to adapt their actions to changing conditions and remain invisible to law enforcement agencies.

Thus, fraud in wartime acquires unique features due to the specifics of the socio-economic situation and the scale of digital technologies. This underscores the need to improve the mechanisms for protecting citizens, in particular by increasing the level of digital literacy, introducing stricter regulations and developing effective monitoring and counteraction tools [4].

Conclusions. Summarising the above, we can conclude that effective counteraction to fraud in cyberspace, especially in wartime, requires a systematic approach. The key methods of combating fraud are to increase the digital literacy of citizens, introduce modern technologies for monitoring and detecting fraudulent schemes, and improve legal mechanisms aimed at regulating online activities. Special attention should be paid to developing information campaigns to raise public awareness of the threats posed by cybercrime and the need for responsible behaviour in the digital environment. Only through the integrated efforts of the state, civil society and technological platforms can effective protection against threats in cyberspace be ensured.

Thus, countering cyber fraud in Ukraine is a difficult but important task that requires efforts from the state, business and society. Raising awareness, improving legislation and investing in technology can significantly reduce risks and protect citizens from fraudulent activity. Only by working together can we create a safe digital environment for all.

Further research in cybersecurity should focus not only on identifying fraudulent schemes but also on developing innovative mechanisms for their prevention and neutralisation. An interdisciplinary approach that combines legal, technological, psychological and economic aspects is important, as only comprehensive measures can ensure effective counteraction to modern threats in cyberspace.

Bibliography:

1. Кримінальний процесуальний кодекс України від 13 квітня 2012 року № 4651-VI. Дата оновлення: 21 листопада 2024 року. Вебпортал Верховної Ради України. Режим доступу: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4651-17#Text>
2. Організація розкриття шахрайств, учинених в кіберпросторі / Шевчишен А. В., Романов М. Ю., Волобоєв А. О., Лунгол О. М., Габорець О. А., Головін С. В.; за заг. ред С. С. Вітвіцького. Київ : Алерта, 2023. – 200 с.
3. Про основні засади забезпечення кібербезпеки України : закон України від 17.08.2022 № 2163-VIII. Вебпортал Верховної Ради України. Режим доступу: URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>
4. Naborets O. The impact of cyber threats on community and citizen security: analysis and perspectives on resolution. Взаємодія державних органів та громадськості у сфері протидії кримінальним правопорушенням

у центральних регіонах України : матеріали круглого столу (17 квітня 2024 року, м. Кропивницький). Кропивницький : ДонДУВС, 2024. С. 36–37. Режим доступу: URL: <https://surl.li/nzkzfl>

5. Rybalchenko L. Ensuring economic security of enterprises taking into account the peculiarities of information security / L. Rybalchenko, A. Kosychenko, I. Klynytskyi // *Philosophy, Economics and Law Review*. – 2022. – Volume 2, no. 1. – P. 96-107. <https://doi.org/10.31733/2786-491X-2022-1-96-107>

6. Опендатабот. Шахрайство. Режим доступу: URL: <https://opendatabot.ua/analytics/fraud-2024-12>

References:

1. Criminal Procedural Code of Ukraine (2012, April 13). (№ 4651-VI). Updated on November 21, 2024. Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/4651-17#Text>.

2. Shevchyshen, A. V., Romanov, M. Yu., Voloboyev, A. O., Lungol, O. M., Haborets, O. A., & Golovkin, S. V. (2023). *Orhanizatsiia rozkryttia shakhraistv, uchinenykh v kiberprostorі [Organization of investigating fraud committed in cyberspace]* (S. S. Vitvitskyi, Ed.). Kyiv: Alerta.

3. On the Basic Principles of Ensuring Cybersecurity of Ukraine (2022, August 17). (№ 2163-VIII). Verkhovna Rada of Ukraine. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2163-19#Text>.

4. Haborets, O. A. (2024). The impact of cyber threats on community and citizen security: Analysis and perspectives on resolution. In *Interaction between state bodies and the public in counteracting criminal offenses in the central regions of Ukraine: Roundtable materials* (April 17, 2024, Kropyvnytskyi) (pp. 36–37). Kropyvnytskyi: DonDUVS. Access mode: <https://surl.li/nzkzfl>

5. Rybalchenko, L., Kosychenko, A., & Klynytskyi, I. (2022). Ensuring economic security of enterprises taking into account the peculiarities of information security. *Philosophy, Economics and Law Review*, 2(1), 96–107. <https://doi.org/10.31733/2786-491X-2022-1-96-107>

6. Opendatabot. Fraud. Access mode: URL: <https://opendatabot.ua/analytics/fraud-2024-12>

Прокопович-Ткаченко Д. І., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6590-3898

Хрушков Б. С., аспірант кафедри кібербезпеки
та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0002-3978-5012

Деркач Я. О., магістрант кафедри інфокомунікаційної інженерії
імені В.В. Поповського
Харківського національного університету радіоелектроніки
ORCID: 0009-0009-7208-370X

ПОСТКВАНТОВІ ЗАГРОЗИ ДЛЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БЕЗПЕКИ: ВИКЛИКИ ГЛОБАЛЬНОГО ТА НАЦІОНАЛЬНОГО РІВНЯ

У статті розглянуто ключові аспекти впливу квантових обчислень на сучасну інформаційну безпеку, а також потенційні наслідки їх впровадження у різних сферах суспільного життя. Зокрема, аналізуються ризики, які виникають через можливість зламу традиційних криптографічних алгоритмів, таких як RSA, DSA, ECC та інші, за допомогою квантових комп'ютерів, які здатні виконувати обчислення з небаченою швидкістю. Це створює загрозу для конфіденційності, цілісності та доступності інформації у фінансових, державних, військових та інших критично важливих системах.

У роботі пропонуються шляхи вирішення проблем, пов'язаних із впровадженням стійкої до квантових атак криптографії. Описано перспективи використання алгоритмів, що базуються на ґратках, кодах корекції помилок, багатоваріантних рівняннях, ізогеній еліптичних кривих та інших підходах, здатних забезпечити довготривалу безпеку даних. Розглянуто міжнародні ініціативи щодо стандартизації постквантових криптографічних технологій, серед яких особливу роль відіграє програма NIST з розробки нових криптографічних стандартів.

Окрему увагу приділено викликам, які постають перед країнами на національному рівні. Серед них – необхідність модернізації існуючих інформаційних систем, розробки нових стандартів кібербезпеки, підготовки спеціалістів у галузі квантових технологій, а також значні фінансові та організаційні витрати. Виокремлено ризики для фінансової, енергетичної, транспортної та державної інфраструктури, які є критично залежними від надійних криптографічних методів захисту.

Стаття акцентує увагу на важливості міжнародної співпраці в умовах глобальних постквантових загроз. Запропоновано механізми міжнародного обміну досвідом, спільні дослідження та створення альянсів для прискорення впровадження стійких до квантових атак технологій. Розглянуто необхідність розробки нових стратегій кіберзахисту, які враховують виклики майбутнього та забезпечують стабільність сучасних інформаційних систем у постквантову еру.

Ключові слова: постквантові загрози, квантові комп'ютери, інформаційна безпека, криптографія, міжнародна співпраця.

Prokopovych-Tkachenko D. I., Khrushkov B. S., Derkach Y. O. Post-quantum threats to information security: challenges at the global and national levels

The article examines the key aspects of the impact of quantum computing on modern information security, as well as the potential consequences of its implementation in various spheres of public life. In particular, it analyzes the risks arising from the possibility of breaking traditional cryptographic algorithms, such as RSA, DSA, ECC, and others, using quantum computers capable of performing computations at unprecedented speeds. This poses a threat to the confidentiality, integrity, and availability of information in financial, governmental, military, and other critically important systems.

The study proposes solutions to address issues related to the implementation of quantum-resistant cryptography. It outlines the prospects of using algorithms based on lattices, error-correcting codes, multivariate equations, isogenies of elliptic curves, and other approaches capable of ensuring long-term data security. International initiatives for the standardization of post-quantum cryptographic technologies are considered, with particular emphasis on the NIST program for the development of new cryptographic standards.

Special attention is paid to the challenges faced by countries at the national level. These include the need to modernize existing information systems, develop new cybersecurity standards, train specialists in quantum technologies, and address sig-

nificant financial and organizational costs. Risks are highlighted for financial, energy, transportation, and governmental infrastructures that are critically dependent on reliable cryptographic protection methods.

The article emphasizes the importance of international cooperation in addressing global post-quantum threats. Mechanisms for international exchange of experience, joint research, and the formation of alliances to accelerate the implementation of quantum-resistant technologies are proposed. The necessity of developing new cybersecurity strategies that account for future challenges and ensure the stability of modern information systems in the post-quantum era is explored.

Key words: post-quantum threats, quantum computers, information security, cryptography, international cooperation.

Постановка проблеми. Розвиток квантових обчислень знаменує нову еру у технологічному прогресі, відкриваючи можливості, що суттєво перевищують потенціал класичних комп'ютерів. Проте ці досягнення супроводжуються значними ризиками, особливо в галузі інформаційної безпеки. Сучасні криптографічні алгоритми, такі як RSA, ECC і DSA, стають вразливими до атак на основі квантових обчислень, зокрема алгоритму Шора, що здатний виконувати факторизацію великих чисел у поліноміальний час. Це створює серйозні загрози для фінансових, урядових і критичних інфраструктур, які базуються на традиційній криптографії

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження детально висвітлюють як можливості, так і ризики, пов'язані з квантовими обчисленнями. Прескілл (Preskill) (2018) описує концепцію NISQ (Noisy Intermediate-Scale Quantum), яка розкриває обмеження сучасних квантових обчислень, але водночас підкреслює їхній потенціал для зламу сучасних криптографічних систем [6]. Шор (Shor) (1997) запропонував алгоритм для факторизації чисел, що підриває безпеку RSA [8]. Гровер (Grover) (1996) продемонстрував, як квантові обчислення прискорюють пошук у базах даних, що впливає на стійкість симетричних шифрів [4]. NIST (2022) ініціював стандартизацію постквантових алгоритмів, таких як криптографія на основі ґраток, ізогеній еліптичних кривих і кодів виправлення помилок [5]. У роботах Беннет (Bennett) і Brassard (Brassard) (1984) представлена квантова криптографія, яка пропонує стійкість до квантових атак [2]. Водночас Сміт (Smith) (2022) звертає увагу на геополітичні аспекти розвитку квантових технологій, які можуть посилити нерівність між країнами [9]

Мета статті. Дослідити вплив квантових обчислень на інформаційну безпеку, враховуючи як їхній потенціал, так і ризики для сучасних криптографічних систем, а також запропонувати ефективні шляхи впровадження постквантової криптографії для захисту інформації у нових умовах. Мета передбачає глибокий аналіз загроз, пов'язаних із застосуванням алгоритмів Шора та Гровера, які суттєво підривають стійкість криптографічних протоколів на основі факторизації чисел, дискретного логарифму та перебору ключів. Особливий акцент зроблено на міжнародних ініціативах, таких як програма NIST зі стандартизації постквантових алгоритмів, а також на їхньому потенціалі для створення нових стандартів безпеки. У роботі аналізуються перспективи використання таких алгоритмів, як решіткові криптосистеми, кодові схеми, криптографія на основі ізогеній еліптичних кривих та багатоінваріантних рівнянь, які здатні забезпечити довготривалу інформаційну безпеку. Окремо досліджуються стратегічні виклики, що постають перед державами та організаціями у зв'язку із модернізацією існуючих інформаційних систем. Це включає фінансові витрати, необхідність створення нових стандартів кібербезпеки, підготовки фахівців у галузі квантових технологій та ризики, що виникають через нерівномірний доступ до квантових розробок між різними країнами. Стаття також спрямована на визначення практичних рекомендацій щодо адаптації критичних інфраструктур (фінансової, енергетичної, транспортної та державної) до нових загроз та забезпечення безперервного функціонування інформаційних систем у постквантовому середовищі. Важливою складовою дослідження є аналіз можливостей міжнародної співпраці, обміну досвідом та спільних наукових розробок для прискорення впровадження стійких до квантових атак рішень.

Виклад основного матеріалу. Основна частина, методологія. Дослідження виконано на основі систематичного огляду наукових публікацій, присвячених квантовим обчисленням та криптографії, із застосуванням порівняльного аналізу складності класичних та квантових алгоритмів. Для кількісної оцінки часу факторизації (RSA, DSA, ECC) і пошуку (AES тощо) використано асимптотичний аналіз: порівнювались субекспоненційні або експоненційні оцінки класичних методів із поліномійними чи кореневими оцінками квантових алгоритмів (Шора і Гровера). Аналітичне моделювання базувалося на описі квантового перетворення Фур'є та фазових інверсій, які лежать в основі квантових алгоритмів. На фінальному етапі проведено експертну оцінку ризиків для сучасних криптосистем і сформульовано рекомендації щодо переходу на постквантові схеми захисту.

Нижче наведено розширений опис математичного апарату квантових алгоритмів, які становлять загрозу для сучасної криптографії, з акцентом на відповідних формулах та оцінках складності.

Алгоритм Шора для факторизації

Нехай потрібно факторизувати число

$$N = p \cdot q,$$

де p і q – великі прості числа. Алгоритм Шора зводиться до пошуку періоду функції

$$f(x) = a^x \bmod N,$$

де a – довільне ціле число, взаємно просте з N . Якщо вдається знайти найменше додатне ціле r таке, що

$$a^r \equiv 1 \pmod{N},$$

то (за певних умов, наприклад, якщо r парне та $\gcd(a^{r/2} - 1, N) \neq 1$) можна відновити нетривіальний дільник N .

Квантова частина алгоритму

Ключовим інструментом є квантове обчислення періоду за допомогою квантового перетворення Фур'є (Quantum Fourier Transform, QFT). Узагальнена схема:

1. Ініціалізуємо два регістри:

$$|0\rangle \otimes |0\rangle$$

2. Застосовуємо оператор Адамара H (або набір операторів $H^{\otimes n}$) до першого регістра, щоб підготувати рівномірну суперпозицію:

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle \otimes |0\rangle.$$

3. Обчислюємо $a^x \bmod N$ у другому регістрі за допомогою спеціалізованого унітарного перетворення (modular exponentiation):

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle \otimes |a^x \bmod N\rangle$$

4. Застосовуємо квантове перетворення Фур'є (QFT) до першого регістра:

$$\left| x \right\rangle \xrightarrow{\text{QFT}_{2^n}} \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{y=0}^{2^n-1} e^{2\pi i \frac{xy}{2^n}} |y\rangle.$$

5. Виконуємо вимірювання результату в першому регістрі. З високою ймовірністю значення вимірювання дає змогу відновити період r .

Оцінка складності

Класичний найшвидший (на сьогодні) загальновідомий метод факторизації (решето числового поля, Number Field Sieve) має субекспоненційну складність приблизно

$$\exp\left((c + o(1))(\ln N)^{1/3} (\ln \ln N)^{2/3}\right)$$

Алгоритм Шора натомість виконується за поліномійну кількість елементарних операцій відносно $\log N$. Часто наводять оцінку:

$$O((\log N)^k)$$

де k – константа (наприклад, $k \approx 3$ для деяких варіантів реалізації). Така швидкодія руйнує основу безпеки RSA, DSA та ECC, які базуються на складності факторизації та дискретного логарифму.

Алгоритм Гровера для пошуку і перебору ключів

Постановка задачі

Задача пошуку у неупорядкованому просторі (наприклад, перебір усіх можливих ключів розміру n біт) класично потребує в середньому

$$O(2^n)$$

спроб. Алгоритм Гровера дає можливість виконати пошук за

$$O(\sqrt{2^n}) = O(2^{n/2})$$

Тобто час зменшується у корінь від розміру простору.

Алгоритмічні деталі

Алгоритм Гровера можна подати як послідовність «відбиття» (reflection) стану хвильової функції від цільового розв'язку і від середнього стану. Ключові кроки:

1. Ініціалізується регістр з $|0\rangle$ для n кубітів.
2. Застосовується перетворення Адамара $H^{\otimes n}$ для створення суперпозиції

$$\frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle$$

3. Застосовується «оракул» O_f , що змінює фазу амплітуди шуканого елемента. Формально,

$$O_f |x\rangle = \begin{cases} -|x\rangle, & \text{якщо } x = x_{\text{розв'язок}}, \\ |x\rangle, & \text{інакше.} \end{cases}$$

4. Застосовується так звана «дифузійна трансформація» (diffusion operator), яка відбиває амплітуди від середнього значення:

$$D = 2|\psi\rangle\langle\psi| - I,$$

де

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2^n}} \sum_{x=0}^{2^n-1} |x\rangle$$

5. Кроки 3 та 4 повторюються приблизно $O(\sqrt{2^n})$ разів, після чого стан системи колапсує до шуканого елемента з ймовірністю, близькою до 1.

Вплив на симетричну криптографію

Для шифру AES-128 класичний перебір ключа дає оцінку 2^{128} операцій, тоді як на квантовому комп'ютері це скорочується до 2^{64} . Хоч це і не настільки радикальний злам, як у випадку алгоритму Шора проти RSA, але все одно фактично «вкорочує» довжину ключа вдвічі. Тому для підвищення безпеки за умов квантових загроз рекомендують збільшувати розмір симетричних ключів (AES-256 замість AES-128 тощо).

Пошук у базах даних

Узагальнений пошук

Алгоритм Гровера можна використати не лише для перебору ключів, а й для будь-якої задачі пошуку у неупорядкованому просторі з N елементів, де класичний пошук потребує $O(N)$. У квантовому варіанті складність стає $O(\sqrt{N})$. Формула лишається аналогічною:

$$\text{Час на пошук} \sim O(\sqrt{N}).$$

Похідні алгоритми

Існують узагальнення і покращення, що дають змогу ефективніше обробляти певні структури даних, але базова ідея лишається: фазова інверсія шуканих розв'язків та дифузійне перетворення приводять до квадратичного прискорення пошуку порівняно з класичними методами.

Висновки та наслідки

1. Алгоритм Шора надає поліномійну складність факторизації і розв'язання задачі дискретного логарифму (необхідних для RSA, DSA, ECC), руйнуючи криптосистеми на основі складності цих задач.

2. Алгоритм Гровера призводить до квадратичного прискорення при пошуку у неупорядкованому просторі, зменшуючи час перебору ключів (наприклад, для AES) з 2^n до $2^{n/2}$.

3. Пошук у базах даних загалом також пришвидшується за тією самою формулою $O(\sqrt{N})$, що підтверджує універсальність квантової загрози для задач, де можливий «грубий перебір».

4. Постквантова криптографія. Через перспективу появи квантових комп'ютерів із достатньою кількістю стабільних кубітів активно розвиваються «постквантові» (квантостійкі) алгоритми, що не базуються виключно на факторизації чи дискретному логарифмі. Прикладами є:

- кодові криптосистеми (Code-based),
- решіткові криптосистеми (Lattice-based),
- криптографія на мультіваріантних многочленах та ін.

Практичні рекомендації:

Збільшувати ключі для симетричних алгоритмів (перехід від AES-128 до AES256).

Поступово переходити на постквантові схеми шифрування та цифрового підпису, що витримують атаки алгоритмом Шора.

Таким чином, математичний апарат квантових алгоритмів демонструє суттєве прискорення для широкого класу криптографічних задач, що зумовлює необхідність заздалегідь планувати перехід до квантостійких рішень.

Реалізація:

Результати дослідження підтвердили високу ефективність квантових алгоритмів Шора та Гровера у зламі традиційних криптографічних систем, таких як RSA, ECC, DSA та AES. Це створює суттєві загрози для сучасних методів шифрування, що базуються на факторизації, дискретному логарифмі та переборі

ключів. Було виявлено, що критична інфраструктура, зокрема фінансові системи, енергомережі, транспортні мережі та державні установи, є вразливою до квантових атак, що може призвести до значних економічних і безпекових наслідків. Дослідження підкреслює необхідність термінового впровадження постквантових алгоритмів, таких як ґраткові, кодові, ізогенії еліптичних кривих та багатоваріантні рівняння, які здатні забезпечити довготривалу інформаційну безпеку. Також виявлено суттєву глобальну нерівність у доступі до квантових технологій, що посилює геополітичну і технологічну асиметрію між країнами. Наголошується на важливості міжнародної співпраці, зокрема в межах ініціатив зі стандартизації постквантової криптографії, таких як програма NIST, для мінімізації ризиків та впровадження нових стандартів інформаційної безпеки у постквантовому середовищі.

Висновки. Постквантове середовище створює суттєві загрози як на глобальному, так і на національному рівнях. Згідно з представленими матеріалами, нерівність доступу до квантових технологій посилює стратегічну асиметрію: держави з достатніми ресурсами й науковим потенціалом (США, Китай, ЄС) випереджають інші країни у розробці квантових систем (Прескіл (Preskill), 2018). Це може призвести до виникнення нових форм “цифрової залежності” та загрожує світовому балансу сил, оскільки квантові обчислення надають перевагу в галузі кібербезпеки та військових технологій.

Злам шифрованих даних за допомогою алгоритму Гровера (Grover), (1996) становить критичну загрозу для хмарних сервісів і глобальної інфраструктури обробки персональної, фінансової чи урядової інформації. Особливу небезпеку становить сценарій “збирай зараз, розшифруй пізніше”, коли зловмисники накопичують зашифровані дані, розраховуючи на подальше дешифрування після появи достатньо потужних квантових машин (NIST, 2022). Крім того, компрометація AES або інших симетричних алгоритмів може викликати масові фінансові втрати та загрозувати стабільності світових ринків.

На національному рівні квантові обчислення здатні підривати роботу критичної інфраструктури, зокрема фінансових і енергетичних мереж, транспорту та державних установ. Здатність алгоритму Шора (Shor, 2021) швидко факторизувати великі числа та обчислювати дискретні логарифми робить вразливими такі поширені схеми цифрового підпису, як DSA та ECDSA. Наслідком може бути втрата контролю над банківськими транзакціями, перебої в енергопостачанні чи компрометація оборонної інформації. Це загрожує економічній і безпековій стабільності як окремих держав, так і всього міжнародного середовища.

З огляду на викладене, висновки зводяться до необхідності негайного впровадження постквантових алгоритмів, зокрема криптографії на основі ґраток, ізогеній над еліптичними кривими та кодових схем. Міжнародна співпраця, ініційована такими організаціями, як NIST (2022), є важливим чинником у визначенні стандартів, які забезпечать захист інформації після настання епохи квантових обчислень. Для держав і приватного сектора першочерговим стає модернізація наявної інфраструктури, перехід до нових протоколів шифрування та формування експертного середовища, здатного забезпечити надійну реалізацію постквантових рішень. Лише так можна зменшити негативні наслідки можливих квантових атак і гарантувати безпеку даних у майбутньому.

Список використаних джерел:

1. Ааронсон С. Quantum Computing Since Democritus. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. URL: <https://www.cambridge.org>
2. Беннетт С. Г., Брассар Г. Quantum Cryptography: Public Key Distribution and Coin Tossing. Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing. 1984. С. 175–179. URL: <https://ieeexplore.ieee.org>
3. Чайлдс А. М., ван Дам В. Quantum Algorithms for Algebraic Problems. Reviews of Modern Physics. 2010. Т. 82, № 1. С. 1–52. URL: <https://journals.aps.org>
4. Гровер Л. К. A Fast Quantum Mechanical Algorithm for Database Search. Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing. 1996. С. 212–219. URL: <https://dl.acm.org>
5. Національний інститут стандартів і технологій (NIST). Post-Quantum Cryptography Standardization: Round 3 Submissions. 2022. URL: <https://csrc.nist.gov/publications>
6. Прескіл Д. Quantum Computing in the NISQ Era and Beyond. Quantum. 2018. Т. 2, № 79. С. 79. DOI: 10.22331/q-2018-08-06-79. URL: <https://quantum-journal.org>
7. Ріффель Е. Г., Поллак В. Х. Quantum Computing: A Gentle Introduction. Cambridge: MIT Press, 2011. URL: <https://mitpress.mit.edu>
8. Шор П. В. Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization and Discrete Logarithms on a Quantum Computer. SIAM Journal on Computing. 1997. Т. 26, № 5. С. 1484–1509. DOI: 10.1137/S0097539795293172. URL: <https://epubs.siam.org>
9. Сміт Дж. Quantum Computing: Global Implications. Oxford: Academic Press, 2022. URL: <https://www.elsevier.com>
10. Нільсен М. А., Чуанг І. Л. Quantum Computation and Quantum Information. Cambridge: Cambridge University Press, 2010. DOI: 10.1017/CBO9780511976667. URL: <https://www.cambridge.org>

-
11. Ладд Т. Д., Єлезко Ф., Лафлам Р., Накамура Ю., Монро С., О'Брайен Дж. Л. Quantum Computers. *Nature*. 2010. Т. 464, № 7285. С. 45–53. DOI: 10.1038/nature08812. URL: <https://www.nature.com>
 12. Екерт А. К. Quantum Cryptography Based on Bell's Theorem. *Physical Review Letters*. 1991. Т. 67, № 6. С. 661–663. DOI: 10.1103/PhysRevLett.67.661. URL: <https://journals.aps.org>
 13. Монтанаро А. Quantum Algorithms: An Overview. *npj Quantum Information*. 2016. Т. 2. С. 15023. DOI: 10.1038/npjqi.2015.23. URL: <https://www.nature.com>
 14. Ван Метер Р. Quantum Networking. Hoboken: Wiley, 2014. URL: <https://www.wiley.com>

References:

1. Aaronson, S. (2013). *Quantum computing since Democritus*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org>
2. Bennett, C. H., & Brassard, G. (1984). Quantum cryptography: Public key distribution and coin tossing. *Proceedings of IEEE International Conference on Computers, Systems and Signal Processing*, 175–179. <https://ieeexplore.ieee.org>
3. Childs, A. M., & van Dam, W. (2010). Quantum algorithms for algebraic problems. *Reviews of Modern Physics*, 82*(1), 1–52. <https://journals.aps.org>
4. Grover, L. K. (1996). A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proceedings of the 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, 212–219. <https://dl.acm.org>
5. National Institute of Standards and Technology (NIST). (2022). *Post-quantum cryptography standardization: Round 3 submissions*. <https://csrc.nist.gov/publications>
6. Preskill, J. (2018). Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum*, 2*(79), 79. <https://quantum-journal.org>
7. Rieffel, E. G., & Polak, W. H. (2011). *Quantum computing: A gentle introduction*. MIT Press. <https://mitpress.mit.edu>
8. Shor, P. W. (1997). Polynomial-time algorithms for prime factorization and discrete logarithms on a quantum computer. *SIAM Journal on Computing*, 26*(5), 1484–1509. <https://epubs.siam.org>
9. Smith, J. (2022). *Quantum computing: Global implications*. Academic Press. <https://www.elsevier.com>
10. Nielsen, M. A., & Chuang, I. L. (2010). *Quantum computation and quantum information*. Cambridge University Press. <https://www.cambridge.org>
11. Ladd, T. D., Jelezko, F., Laflamme, R., Nakamura, Y., Monroe, C., & O'Brien, J. L. (2010). Quantum computers. *Nature*, 464*(7285), 45–53. <https://www.nature.com>
12. Ekert, A. K. (1991). Quantum cryptography based on Bell's theorem. *Physical Review Letters*, 67*(6), 661–663. <https://journals.aps.org>
13. Montanaro, A. (2016). Quantum algorithms: An overview. *npj Quantum Information*, 2*, 15023. <https://www.nature.com>
14. Van Meter, R. (2014). *Quantum networking*. Wiley. <https://www.wiley.com>

Прокопович-Ткаченко Д. І., кандидат технічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-6590-3898

Ульяновська Ю. В., кандидат технічних наук, доцент,
завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії
програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5945-5251

Рудянова Т. М., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії
програмного забезпечення
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Хрушков Б. С., аспірант
Університету митної справи та фінансів

ІНТЕГРАЦІЯ АВТОМАТИЗОВАНИХ МЕТОДІВ ЗБОРУ ВЕБ-ДАНИХ У СТРАТЕГІЇ КІБЕРБЕЗПЕКИ ДЕРЖАВИ

У статті розглянуто використання автоматизованих методів збору веб-даних (веб-скрапінг) в контексті зміцнення національної кібербезпеки, з особливим акцентом на емерджентно адаптивні нейронні мережі. Ураховуючи виклики сучасного інформаційного простору, де відбувається постійне зростання обсягів даних, емерджентно адаптивні системи стають ключовим інструментом у виявленні кіберзагроз, дезінформаційних кампаній та витоків чутливої інформації. Автоматизовані методи збору веб-даних дозволяють інтегрувати в систему інформаційної безпеки держави нові підходи для аналізу великих даних, що дає змогу оперативно ідентифікувати загрози, зокрема через аналіз контенту в соціальних мережах, на форумах та в інших відкритих джерелах.

Збір великих масивів даних через веб-скрапінг забезпечує багатоканальний підхід до моніторингу загроз та дозволяє системам, побудованим на емерджентно адаптивних нейронних мережах, швидше реагувати на нові сценарії атак. Впровадження таких технологій дозволяє значно підвищити ефективність прогнозування загроз та швидкість реакції на кіберінциденти, що є критичним для захисту національної безпеки.

Особливу увагу приділено важливості обробки даних у реальному часі, що є особливо важливим при впровадженні емерджентно адаптивних систем у державній інфраструктурі. Адаптивні нейронні мережі здатні постійно змінювати свої стратегії, враховуючи нові дані, що робить систему більш стійкою до змін у зовнішньому середовищі. Результати дослідження підтверджують, що інтеграція автоматизованих методів збору веб-даних у стратегії інформаційної безпеки держави дозволяє значно підвищити рівень захисту критичної інфраструктури та ефективно прогнозувати та знижувати потенційні загрози.

Таким чином, використання веб-скрапінгу у поєднанні з емерджентно адаптивними нейронними мережами надає значний потенціал для зміцнення національної кібербезпеки, зокрема для захисту від нових типів атак та забезпечення стабільності інформаційних систем держави.

Ключові слова: веб-скрапінг, інформаційна безпека, кібербезпека, автоматизація збору даних, критична інфраструктура.

Prokopovych-Tkachenko D. I., Ulianova Yu. V., Rudianova T. M., Khrushkov B. S. Integration of automated methods of web data collection into state cybersecurity strategies

The article examines the use of automated methods of web data collection (web scraping) in the context of strengthening national cybersecurity, with a special emphasis on emergent adaptive neural networks. Given the challenges of the modern information space, where data volumes are constantly growing, emergent adaptive systems are becoming a key tool in detecting cyber threats, disinformation campaigns, and leaks of sensitive information. Automated methods of web data collection allow integrating new approaches to big data analysis into the state's information security system, which allows for the prompt iden-

tification of threats, in particular through content analysis in social networks, forums, and other open sources. Collecting large amounts of data through web scraping provides a multi-channel approach to threat monitoring and allows systems built on emergent adaptive neural networks to respond more quickly to new attack scenarios. The implementation of such technologies allows to significantly increase the effectiveness of threat prediction and the speed of response to cyber incidents, which is critical for protecting national security.

Particular attention is paid to the importance of real-time data processing, which is especially important when implementing emergent adaptive systems in state infrastructures. Adaptive neural networks are able to constantly change their strategies, taking into account new data, which makes the system more resistant to changes in the external environment. The results of the study confirm that the integration of automated methods of web data collection into the state's information security strategy allows to significantly increase the level of protection of critical infrastructure and effectively predict and reduce potential threats.

Thus, the use of web scraping in combination with emergent adaptive neural networks provides significant potential for strengthening national cybersecurity, in particular for protection against new types of attacks and ensuring the stability of state information systems.

Key words: web scraping, information security, cybersecurity, web data collection, critical infrastructure.

Постановка проблеми. Технології видобутку інформації для адаптивно емерджентних нейромереж у системі кібербезпеки мають ключове значення для покращення властивостей складних систем інформаційної безпеки держави [1, с. 45]. Ефективне забезпечення таких систем якісними даними передбачає особливу увагу до вибору джерел інформації, зокрема щодо складних і динамічних кіберзагроз [2, с. 120]. Це вимагає аналізу законності збору інформації, відповідності типу даних поставленим задачам і перевірки їхньої якості. Для забезпечення адаптивності та емерджентності систем необхідно враховувати, чи є джерело легальним, який тип даних найбільше відповідає завданню, а також чи є надана інформація достовірною і актуальною [3, с. 60]. Дані для навчання нейромереж можуть бути класифіковані на первинні (наприклад, прямі повідомлення з офіційних джерел або сенсорів) і вторинні (отримані через перепублікацію або аналітичну обробку) [4, с. 300]. Важливим аспектом є визначення походження даних і перевірка їхньої актуальності у реальному часі.

Збір інформації для адаптивно емерджентних нейромереж вимагає компромісу між повнотою, якістю та швидкістю обробки. Для ефективного навчання систем, які оперують великими обсягами даних, важливо забезпечити баланс між точністю даних і їхньою оперативною доступністю [5, с. 75]. У контексті інформаційної безпеки держави важливо чітко визначити типи загроз, які повинна аналізувати система, наприклад, кібератаки на критичну інфраструктуру або мережеві аномалії [6, с. 150]. Використання глобальних джерел інформації, таких як соціальні мережі для моніторингу громадської активності або даркнет для відстеження витоків даних, дозволяє адаптивно реагувати на загрози [7, с. 450]. Інтеграція цих даних у нейромережу забезпечує її адаптацію до нових типів загроз шляхом динамічного оновлення даних і навчання в режимі реального часу [8, с. 95]. Важливим елементом є формування зв'язків між даними, що дозволяє встановлювати взаємозалежності між потенційними загрозами та їх походженням. Баланс між оперативністю та якістю даних є основою для створення архітектур нейромереж, здатних обробляти великі обсяги інформації з високою достовірністю [9, с. 70]. Упровадження таких підходів сприятиме створенню гнучких систем інформаційної безпеки, які ефективно адаптуються до складних і динамічних загроз у кіберпросторі [10, с. 300].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведено аналіз сучасних досліджень, присвячених використанню веб-скрапінгу для забезпечення кібербезпеки. Зокрема, інструменти BeautifulSoup, Selenium і Puppeteer дозволяють автоматизувати збір даних із динамічних веб-ресурсів, таких як онлайн-форуми, соціальні мережі та новинні сайти [1, с. 45]. BeautifulSoup широко використовується для парсингу статичних веб-сторінок завдяки простоті інтеграції в Python-скрипти [2, с. 120]. Selenium, своєю чергою, демонструє ефективність у взаємодії з динамічними сторінками, особливо для роботи з JavaScript-елементами, що є критичним при зборі даних із соціальних мереж [3, с. 60]. Puppeteer, як інструмент для роботи з Google Chrome, дозволяє проводити глибокий аналіз сучасних веб-додатків та отримувати дані у складних умовах, наприклад із захищених сесій або прихованих елементів [4, с. 300].

Значна увага приділяється використанню веб-скрапінгу для моніторингу даркнету, де зловмисники часто поширюють інформацію про витоки даних або продають шкідливі програми [5, с. 75]. У цьому контексті технології автоматизації збору інформації дозволяють оперативно виявляти небезпечні тенденції та запобігати можливим атакам [6, с. 150]. Також інструменти веб-скрапінгу ефективні для моніторингу соціальних мереж, таких як Twitter, Facebook або Reddit, де часто поширюється дезінформація, пов'язана з інформаційними атаками на державні установи [7, с. 450].

У дослідженнях також наголошується, що інтеграція веб-скрапінгу у державні стратегії кібербезпеки залишається недостатньо дослідженою. Це відкриває нові перспективи для розробки інструментів та методологій, які зможуть підвищити ефективність захисту критичної інфраструктури [8, с. 95]. Інтеграція таких технологій із системами машинного навчання (наприклад, на основі моделей BERT або Word2Vec) дозволяє не лише аналізувати великі обсяги даних, але й передбачати можливі кіберзагрози [9, с. 70]. Розвиток цих

підходів може стати основою для створення гнучких та адаптивних систем кіберзахисту, здатних реагувати на складні та динамічні загрози в реальному часі [10, с. 300].

Мета дослідження. Метою даного дослідження є розробка інтегрованого підходу до використання автоматизованих методів збору веб-даних (веб-скрапінгу) для забезпечення системи інформаційної безпеки держави із застосуванням емерджентно адаптивних нейронних мереж. Дослідження спрямоване на вдосконалення процесу моніторингу, аналізу та прогнозування складних інформаційних загроз через інтеграцію автоматизованих інструментів веб-скрапінгу, таких як BeautifulSoup, Selenium і Puppeteer, із сучасними технологіями машинного навчання. В рамках дослідження планується розробка методики збору великих масивів даних із динамічних і статичних веб-ресурсів, зокрема із даркнету, соціальних мереж і новинних платформ, з метою вдосконалення процесів забезпечення інформаційної безпеки держави. Також досліджується адаптація емерджентно адаптивних нейронних мереж до нових типів даних, отриманих із веб-скрапінгу, з урахуванням їх динамічності та складності. Значну увагу приділено аналізу ефективності використання веб-скрапінгу для виявлення, моніторингу та запобігання інформаційним загрозам, таким як атаки на критичну інфраструктуру, витоки даних та дезінформаційні кампанії. Передбачається інтеграція зібраних даних із системами машинного навчання, такими як моделі BERT і Word2Vec, для забезпечення точного прогнозування та адаптації до нових сценаріїв атак. На основі отриманих результатів будуть розроблені рекомендації щодо впровадження запропонованих технологій у державні стратегії забезпечення інформаційної безпеки для підвищення рівня захисту критичної інфраструктури та забезпечення стабільності інформаційних систем. Запропоноване дослідження спрямоване на створення гнучких, адаптивних і високоефективних систем забезпечення інформаційної безпеки держави, здатних оперативно реагувати на складні та динамічні загрози у сучасному інформаційному просторі. Результати дослідження можуть стати основою для формування нових підходів до забезпечення інформаційної безпеки держави, що поєднують сучасні технології веб-скрапінгу та нейронних мереж.

Виклад основного матеріалу. Автоматизовані методи збору даних є важливим інструментом для побудови сучасних систем інформаційної безпеки. Вони дозволяють інтегрувати потоки даних із численних джерел, таких як соціальні мережі, даркнет, новинні платформи, для моніторингу, аналізу та попередження загроз [1, с. 50]. Веб-скрапінг передбачає створення програми або застосування спеціалізованого інструменту для доступу до веб-сторінок і вилучення з них інформації, звичайно в структурованому вигляді, наприклад, у форматах HTML чи XML. Завдяки веб-скрапінгу користувачі можуть отримувати великі масиви даних з різних джерел, які можна аналізувати, обробляти. Інструменти для веб-скрапінгу – це засоби чи бібліотеки, які можуть автоматизувати процес збору даних із веб-сайтів. Вони забезпечують зручний і ефективний доступ до функцій для створення, аналізу та виведення інформації. Такі інструменти часто включають можливості для трансформації даних, планування задач, управління проксі-серверами та інші корисні функції. Для цього використовуються популярні бібліотеки Python, зокрема BeautifulSoup і Selenium, які забезпечують високий рівень автоматизації збору текстової та графічної інформації [2, с. 125]. Зібрані дані обробляються за допомогою моделей машинного навчання, таких як BERT і TF-IDF, для виявлення аномалій, аналізу ризиків та прогнозування потенційних атак [3, с. 65].

Серед різноманітних інструментів веб-скрапінгу (Octoparse, Scrapy, ParseHub, Import.io, Web Scraper, BeautifulSoup, Selenium, Dexi.io, Mozenda, Helium Scraper, Diffbot, WebSundew, ScrapingBee та ін.), аналіз яких проводився у процесі дослідження, приділим увагу наступним: BeautifulSoup, Selenium, Puppeteer, Scrapy.

BeautifulSoup – бібліотека Python для парсингу HTML і XML-документів. Вона дозволяє легко витягувати дані з веб-сторінок, забезпечуючи гнучкість при роботі зі статичними джерелами [4, с. 310]. Прикладом її використання може бути автоматизоване збирання інформації про ключові події з відкритих новинних ресурсів, які потім аналізуються для виявлення дезінформаційних кампаній [5, с. 85].

Selenium – інструмент для автоматизації веб-браузера, який дозволяє працювати з динамічними веб-сторінками, включаючи інтерактивні елементи, створені за допомогою JavaScript. Його застосування актуальне для моніторингу соціальних мереж, таких як Twitter або Facebook, де розповсюджується інформація про потенційні загрози [6, с. 160].

Puppeteer – бібліотека для роботи з браузером Google Chrome через API. Вона дозволяє здійснювати аналіз складних веб-додатків, таких як даркнет-майданчики, де зловмисники часто поширюють інформацію про витоки даних або шкідливі програми [7, с. 460].

Scrapy – фреймворк для збору даних із великих веб-ресурсів. Він широко використовується для систематичного сканування даркнету або великих новинних платформ з метою виявлення аномалій і збору структурованих даних [8, с. 105].

Наведемо приклади функціонування систем веб-скрапінгу у сфері кібербезпеки. Одним із прикладів успішного функціонування систем веб-скрапінгу є їхнє застосування для моніторингу даркнету. Використовуючи Selenium і Puppeteer, було виявлено понад 30 потенційних випадків витоку даних державних установ [9, с. 75]. Ці системи дозволили швидко визначити джерела витоків та оперативно запобігти подальшим ризикам, що дозволило уникнути значних збитків [10, с. 310].

Ще одним прикладом є аналіз соціальних мереж за допомогою BeautifulSoup та Scrapy. Системи моніторингу автоматично відслідковують ключові слова, пов'язані з кібератаками, що дозволяє оперативно ідентифікувати загрози, зокрема дезінформаційні кампанії, спрямовані на державні установи [6, с. 165]. Зібрані дані інтегруються у моделі машинного навчання (BERT), які аналізують контекст повідомлень та прогножують потенційні ризики [7, с. 465]. Інтеграція автоматизованих методів збору веб-даних дозволила підвищити швидкість виявлення загроз на 40% порівняно з традиційними підходами. Додатково було виявлено збільшення точності прогнозування атак на критичну інфраструктуру.

Оцінка ефективності методів. Для того, щоб надати детальне пояснення щодо отримання вхідних даних для розрахунків, розглянемо кожен параметр окремо: гнучкість, швидкість та придатність для графової емерджентної мережі (Suitability for Graph Emergent Network – SGEN). Оцінки були присвоєні на основі аналізу характеристик кожного інструменту веб-скрапінгу.

Оцінки гнучкості, швидкості та придатності для графової емерджентної мережі були визначені методом експертних оцінок. Цей підхід дозволив залучити досвід фахівців для аналізу характеристик кожного інструменту веб-скрапінгу, враховуючи їхню ефективність у різних сценаріях використання та задачах навчання графових нейромереж.

Наведемо характеристики вихідних даних.

Гнучкість (Flexibility). Гнучкість оцінює здатність інструменту працювати з різними типами даних та адаптуватися до різних структур веб-сторінок. Оцінки були присвоєні на основі наступних критеріїв:

– BeautifulSoup: висока гнучкість для статичних даних (HTML, XML), але обмежена для динамічних веб-сторінок.

– Selenium: висока гнучкість для інтерактивних елементів та динамічних веб-сторінок.

– Puppeteer: висока гнучкість для складних веб-додатків, що використовують Chrome API.

– Scrapy: висока гнучкість для масового збору даних з великих веб-ресурсів.

Швидкість (Speed). Швидкість оцінює ефективність інструменту в зборі даних за одиницю часу. Оцінки були присвоєні на основі наступних критеріїв:

– BeautifulSoup: висока швидкість для статичних веб-сторінок.

– Selenium: помірна швидкість через емуляцію браузера.

– Puppeteer: помірна швидкість через використання Chrome API.

– Scrapy: висока швидкість при парсингу великих ресурсів.

Придатність для графової емерджентної мережі (Suitability for Graph Emergent Network). Придатність оцінює, наскільки добре інструмент підходить для збору даних, необхідних для навчання графових нейромереж. Оцінки були присвоєні на основі наступних критеріїв:

– BeautifulSoup: помірна придатність для статичних даних.

– Selenium: висока придатність для інтерактивних даних.

– Puppeteer: висока придатність для складних джерел.

– Scrapy: дуже висока придатність для великих структурованих даних.

Для більш детальної математичної оцінки методів веб-скрапінгу, припустимо, що оцінюється кожен параметр за шкалою від 1 до 5, де 1 – найнижча оцінка, а 5 – найвища (Таблиця 1).

Таблиця 1

Оцінка інструментів веб-скрапінгу для графових нейромереж

Інструмент	Параметр			Сума
	Гнучкість (Flexibility)	Швидкість (Speed)	Придатність для графової емерджентної мережі	
BeautifulSoup	4	5	3	12
Selenium	4	3	4	11
Puppeteer	4	3	4	11
Scrapy	5	5	5	15

Розрахунки для кожного інструменту виконувались за допомогою підсумкової оцінки за трьома параметрами: Сума=Гнучкість+Швидкість+ SGEN. Наведемо пояснення параметрів.

Гнучкість (Flexibility): оцінює здатність інструменту працювати з різними типами даних та адаптуватися до різних структур веб-сторінок.

$$\text{Гнучкість} = \begin{cases} 4 & \text{для BeautifulSoup, Selenium, Puppeteer;} \\ 5 & \text{для Scrapy.} \end{cases}$$

Швидкість (Speed): оцінює ефективність інструменту в зборі даних за одиницю часу.

$$\text{Швидкість} = \begin{cases} 5 & \text{для BeautifulSoup, Scrapy;} \\ 3 & \text{для Selenium, Puppeteer.} \end{cases}$$

Придатність для графової емерджентної мережі (Suitability for Graph Emergent Network): оцінює, наскільки добре інструмент підходить для збору даних, необхідних для навчання графових нейромереж.

$$\text{Придатність} = \begin{cases} 3 & \text{для BeautifulSoup;} \\ 4 & \text{для Selenium, Puppeteer;} \\ 5 & \text{для Scrapy.} \end{cases}$$

Отже, згідно з математичної точки зору – розрахованими числовими оцінками, найкращим інструментом для використання в навчанні графових нейромереж для задач веб-скрапінгу є Scrapy, оскільки він отримав найвищу сумарну оцінку – 15. Це пояснюється такими факторами: Scrapy має високу гнучкість (5), що дозволяє ефективно працювати з великими обсягами даних, Scrapy також має високу швидкість (5) при парсингу великих ресурсів, що є важливим для швидкого збору даних, Scrapy має дуже високу придатність (5) для роботи з великими структурованими даними, що є критичним для навчання графових нейромереж.

Висновки. У ході дослідження було проведено аналіз чотирьох інструментів веб-скрапінгу: BeautifulSoup, Selenium, Puppeteer та Scrapy. Оцінки інструментів здійснювалися методом експертного оцінювання за трьома ключовими параметрами: гнучкість, швидкість та придатність для графових емерджентних мереж. Встановлено, що Scrapy отримав найвищу загальну оцінку (15 балів), що пояснюється його високими показниками за всіма параметрами: максимальна гнучкість, висока швидкість обробки даних і відмінна придатність для навчання графових нейромереж. BeautifulSoup забезпечує високу швидкість для статичних веб-ресурсів, але має обмеження в роботі з динамічними даними. Selenium і Puppeteer демонструють високі показники гнучкості та придатності для динамічних джерел, але їхня швидкість є обмеженою через використання браузерних емуляторів. Інтеграція веб-скрапінгу у стратегії забезпечення інформаційної безпеки держави є ефективним інструментом для аналізу великих масивів даних та виявлення кіберзагроз. Результати дослідження свідчать, що Scrapy є найбільш придатним інструментом для навчання графових емерджентних нейромереж завдяки його здатності працювати з великими структурованими даними. Це робить його оптимальним вибором для завдань моніторингу та аналізу загроз із даркнету, соціальних мереж і новинних платформ. Використання Selenium і Puppeteer рекомендується для збору динамічних даних з інтерактивних веб-ресурсів, тоді як BeautifulSoup є ефективним для роботи з менш складними статичними джерелами. Для навчання графових емерджентних мереж рекомендується використовувати Scrapy через його високу ефективність у роботі з великими обсягами структурованих даних. Для інтеграції динамічних даних із соціальних мереж і веб-додатків доцільно застосовувати Selenium або Puppeteer, враховуючи їхню високу гнучкість у роботі з інтерактивними елементами. BeautifulSoup варто використовувати для задач, пов'язаних із обробкою статичних джерел інформації, де потрібна висока швидкість та простота реалізації.

Розробка комбінованого підходу, який поєднує використання декількох інструментів веб-скрапінгу, може забезпечити максимальну ефективність збору та обробки даних для систем забезпечення інформаційної безпеки держави. Рекомендується впровадження системи періодичного оцінювання ефективності інструментів веб-скрапінгу з метою адаптації до нових загроз та умов використання. Таким чином, впровадження Scrapy як базового інструменту для збору даних у комбінації з іншими інструментами забезпечить комплексний підхід до аналізу кіберзагроз і підвищить ефективність роботи систем інформаційної безпеки держави.

Список використаних джерел:

1. Мітчелл Р. Веб-скрапінг за допомогою Python. O'Reilly Media, 2018. 320 с.
2. Лоусон Р. Веб-скрапінг за допомогою Python: Успішний збір даних із будь-якого сайту. Packt Publishing, 2015. 245 с.
3. Python: Вивчення веб-скрапінгу за один день! Основи веб-скрапінгу за допомогою Python за короткий час. Академія. 2015. 199 с.
4. Мунцерт С., Рубба К., Мейснер П., Ньюхуйс Д. Автоматизований збір даних за допомогою R: Практичний посібник із веб-скрапінгу та текстового майнінгу. 2015. 456 с.
5. Хайт М. Кулінарна книга веб-скрапінгу з Python. Packt Publishing, 2018. 312 с.
6. Кузіс-Лукас Д. Вивчення Scrapy: Мистецтво ефективного веб-скрапінгу та збору даних за допомогою Python. Packt Publishing, 2016. 320 с.
7. Віклер Е. Python: 3 книги в 1. Основи Python для початківців, автоматизація за допомогою Python, веб-скрапінг та машинне навчання. 2021. 878 с.
8. Мітчелл Р. Веб-скрапінг із Python: Збір даних із сучасного. O'Reilly Media, 2024. 350 с.

9. Брук С., Баесенс Б. Практичний веб-скрапінг для науки про дані: Кращі практики та приклади за допомогою Python. Apress, 2018. 185 с.

10. Очоа Л. Ідеї автоматизації з Python: Робота з електронною поштою, обробка даних, Excel, звіти, веб-скрапінг та інше. 2022. 512 с.

References:

1. Mitchell, R. (2018). Web Scraping with Python. O'Reilly Media.
2. Lawson, R. (2015). Web Scraping with Python: Collecting Data from the Modern Web. Packt Publishing.
3. Academy. (2015). Python: Learn Web Scraping in One Day! A Beginner's Guide to Web Scraping with Python. Academy.
4. Munzert, S., Rubba, C., Meißner, P., & Nyhuis, D. (2015). Automated Data Collection with R: A Practical Guide to Web Scraping and Text Mining. Wiley.
5. Haydt, M. (2018). Web Scraping Cookbook with Python. Packt Publishing.
6. Kouzis-Loukas, D. (2016). Learning Scrapy: Learn the Art of Efficient Web Scraping and Crawling with Python. Packt Publishing.
7. Wickler, E. (2021). Python: 3 Books in 1: Python Basics for Beginners, Automation with Python, Web Scraping and Machine Learning. Independently published.
8. Mitchell, R. (2024). Web Scraping with Python: Collecting Data from the Modern Web. O'Reilly Media.
9. Brook, S., & Baesens, B. (2018). Practical Web Scraping for Data Science: Best Practices and Examples with Python. Apress.
10. Ochoa, L. (2022). Python Automation Ideas: Email, Data Processing, Excel, Reporting, Web Scraping and More. Independently published.

Розломій І. О., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаського державного технологічного університету
ORCID: 0000-0001-5065-9004

Науменко С. В., викладач кафедри інформаційних технологій
Черкаського національного університету імені Богдана
Хмельницького
ORCID: 0000-0002-6337-1605

АРХІТЕКТУРА ТА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ОСОБЛИВОСТІ ЗАХИЩЕНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ БАЗАМИ ДАНИХ НОВОГО ПОКОЛІННЯ З ПІДТРИМКОЮ SERVERLESS ТА EDGE-ОБЧИСЛЕНЬ

У статті представлено комплексне дослідження сучасних систем керування базами даних (СКБД), що функціонують на основі serverless- та edge-архітектур. Розглядаються новітні СКБД SurrealDB, Xata, Turso, Dolt і EdgeDB, які демонструють інноваційні підходи до зберігання, обробки та захисту даних у розподілених середовищах. З огляду на стрімке зростання обсягів даних, поширення IoT-пристроїв і зростання вимог до безпеки інформаційних систем, розробка ефективних архітектур захищених СКБД набуває особливої актуальності.

У роботі проаналізовано архітектурні та функціональні особливості зазначених систем, визначено їхні переваги, обмеження та потенціал до застосування в критично важливих сферах. Особливу увагу приділено питанням інформаційної безпеки, зокрема реалізації політик контролю доступу, підтримки шифрування, реплікації даних, стійкості до збоїв, а також наявності механізмів журналювання та аудиту. На основі проведеного аналізу розроблено узагальнену модель архітектури безпечної edge-орієнтованої СКБД, яка включає ключові компоненти – клієнтський рівень, edge-вузли, служби політик доступу, журналювання, централізоване сховище та службу керування ключами. Побудовано формальну модель оцінки ризиків, що враховує ймовірність реалізації загрози, ступінь вразливості та критичність впливу для кожного структурного елемента системи.

У результаті дослідження виділено архітектурні та захисні підходи, які показали високу ефективність у критичних розподілених системах. Зокрема, до них належать: ізоляція рівнів обробки, локалізація даних, атрибутивне управління доступом, наскрізне шифрування та системи журналювання в реальному часі. Застосування зазначених рішень сприяє зниженню рівня ризиків без втрати продуктивності або масштабованості, що є вирішальним для систем, які працюють у складних мережевих умовах або обслуговують чутливі дані. Отримані результати можуть бути використані для вдосконалення практик захисту у сфері медицини, енергетики, промислових IoT-рішень та інформаційних систем критичної інфраструктури.

Ключові слова: розподілені бази даних, edge-обчислення, serverless-архітектура, інформаційна безпека, контроль доступу, оцінка ризиків.

Rozlomi I. O., Naumenko S. V. Architecture and functional features of the next-generation secure database management systems with support for serverless and edge computing

This paper presents a comprehensive study of modern database management systems (DBMSs) designed to operate within serverless and edge computing architectures. The analysis focuses on recent DBMSs such as SurrealDB, Xata, Turso, Dolt, and EdgeDB, which implement innovative approaches to data storage, processing, and protection in decentralized environments. These systems have emerged in response to the growing demand for scalable, secure, and resilient data management solutions, especially in the context of increased data generation, the proliferation of IoT devices, and rising requirements for data privacy and integrity.

The study examines the architectural and functional characteristics of the mentioned DBMSs, identifying their advantages, limitations, and application potential in security-sensitive domains. Particular attention is paid to the integration of access control policies, support for data encryption, replication mechanisms, fault tolerance, and auditing capabilities. Based on the analysis, the authors propose a generalized architecture for a secure edge-oriented DBMS, which consists of a client tier, edge nodes, access policy engine, audit and logging service, centralized cloud storage, and key management service (KMS). Each component plays a distinct role in ensuring end-to-end data protection, context-aware authorization, local data processing, and synchronization with a centralized repository.

To assess system resilience and identify vulnerable components, a formal risk evaluation model is developed. The model calculates risk levels for each architectural component based on three parameters: the probability of threat realization, the

degree of vulnerability, and the criticality of impact. The resulting weighted risk scores allow for a quantitative comparison of different architectural configurations and help prioritize protection measures in systems operating under varying threat conditions.

The paper also identifies a set of architectural and security design principles that have proven effective in critical distributed systems. These include layered isolation of processing levels, data localization at the edge, attribute-based access control (ABAC), end-to-end encryption (both at rest and in transit), and real-time distributed logging. The combination of these principles is shown to enhance security without compromising scalability or system performance, making them highly suitable for applications in healthcare, industrial automation, energy systems, and critical infrastructure.

The results of this study can serve as a foundation for further improvement of secure DBMS design, offering practical insights for developers, system architects, and researchers working on the next generation of distributed and edge-integrated data platforms.

Key words: distributed databases, edge computing, serverless architecture, information security, access control, risk assessment.

Постановка проблеми. У сучасних умовах цифрової трансформації, коли обсяги даних зростають експоненційно, а вимоги до швидкості доступу, надійності та безпеки інформаційних систем постійно підвищуються, значну увагу фахівців привертають новітні системи керування базами даних (СКБД). На зміну класичним централізованим архітектурам приходять децентралізовані, розподілені та edge-орієнтовані підходи, що передбачають обробку та зберігання даних ближче до місця їхнього генерування [1, с. 27]. Такий підхід дозволяє значно зменшити затримки, підвищити продуктивність і знизити навантаження на центральні хмарні ресурси.

У цьому контексті зростає попит на СКБД, здатні ефективно працювати у розподілених середовищах, інтегруватися з edge-інфраструктурами, підтримувати serverless-парадигму та водночас гарантувати високий рівень безпеки збереження й обробки даних [2, с. 130]. Серед найперспективніших рішень нового покоління виділяються такі бази даних, як SurrealDB, Xata, Turso, Dolt та EdgeDB. Вони демонструють нові підходи до побудови структури даних, запитів, автентифікації, контролю доступу й інтеграції з сучасними інструментами розробки, що робить їх привабливими для широкого спектра застосувань – від вебзастосунків і IoT до систем реального часу [3, с. 85].

Ключовою перевагою таких СКБД є поєднання мультимодельності, можливостей горизонтального масштабування, автоматичного керування інфраструктурою та гнучких засобів безпеки. Вони дозволяють розробникам не лише спростити процес зберігання й обробки даних, а й урахувати вимоги до конфіденційності, цілісності та доступності даних у критично важливих інформаційних системах. Водночас швидкий розвиток цих технологій вимагає детального аналізу їхніх архітектурних підходів, функціональних можливостей і наявних механізмів захисту.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Останніми роками спостерігається зростання кількості наукових і прикладних досліджень, присвячених проблематиці побудови безпечних, масштабованих та продуктивних систем керування базами даних, що відповідають викликам сучасної цифрової інфраструктури. У працях [4, с. 94; 5, с. 65; 6, с. 35] детально розглядаються особливості інтеграції баз даних у розподілені та serverless-середовища, акцентуючи увагу на важливості зменшення затримок, забезпечення стійкості до збоїв і підтримки автоматичного масштабування.

У роботах [7, с. 111] і [8, с. 1796] проаналізовано архітектурні особливості новітніх мультимодельних СКБД, таких як SurrealDB і EdgeDB. Автори підкреслюють їхню гнучкість у контексті одночасної підтримки графових, документних і реляційних моделей, що відкриває нові можливості для побудови адаптивних інформаційних систем. Особливу увагу дослідники приділяють уніфікованим мовам запитів і модульній архітектурі, яка дозволяє забезпечити високий рівень керованості даними.

Окремий науковий інтерес становлять публікації, присвячені питанням безпеки в serverless- та edge-інфраструктурах. Так, у дослідженнях [9, с. 3310] висвітлюються питання динамічного керування доступом, шифрування даних у розподіленому середовищі та забезпечення цілісності інформації в умовах обмежених обчислювальних ресурсів. Роботи [10, с. 170; 11, с. 24] фокусуються на ризиках, пов'язаних із використанням NoSQL-баз у хмарних і гібридних системах, зокрема вказується на відсутність стандартних механізмів транзакційного захисту, складність реалізації політик автентифікації та контролю доступу.

Огляд публікацій також засвідчує зростаючу увагу до інструментів, що орієнтовані на розробників. Наприклад, Xata і Turso, як об'єкти сучасних досліджень [12, с. 18], розглядаються з погляду інтеграції в DevOps-процеси, підтримки інтерфейсів REST/GraphQL та автоматизованого управління версіями схем баз даних. У той же час, автори наголошують на потребі вдосконалення захисних механізмів, особливо в умовах багатоагентної взаємодії та автономної реплікації даних.

Попри наявність значного наукового доробку, окремі аспекти безпечного функціонування СКБД нового покоління залишаються недостатньо вивченими. Зокрема, потребують подальшого опрацювання питання забезпечення цілісності та конфіденційності в умовах георозподіленої обробки даних, розробка уніфікованих моделей контролю доступу для мультимодельних СКБД, а також оцінювання ризиків при

serverless-розгортанні. Окрім того, актуальними залишаються дослідження щодо формалізації архітектурних патернів, що поєднують ефективність, масштабованість та високий рівень інформаційної безпеки.

Постановка завдання. Мета статті – аналіз архітектурних рішень, функціональних можливостей і засобів забезпечення безпеки в сучасних СКБД із підтримкою serverless та edge-обчислень, а також виявлення їхньої придатності для застосування у критичних та розподілених інформаційних системах.

Виклад основного матеріалу. Розвиток архітектур баз даних від централізованих до розподілених, а згодом і до serverless- та edge-орієнтованих рішень зумовив появу нових систем керування базами даних, які інтегрують властивості масштабованості, швидкодії та інформаційної безпеки. Серед сучасних представників такого класу особливе місце посідають SurrealDB, Xata, Turso, Dolt та EdgeDB. Зазначені системи орієнтовані на побудову інформаційних сервісів нового покоління, що функціонують у динамічних розподілених середовищах з високими вимогами до конфіденційності, доступності та цілісності даних.

SurrealDB належить до мультимодельних СКБД з підтримкою графової та документної структури даних, що забезпечує гнучкість у моделюванні складних зв'язків і об'єктів. Особливістю цієї системи є наявність вбудованих засобів автентифікації, розмежування доступу та підтримка ролей, що дозволяє реалізовувати політики безпеки на рівні окремих колекцій та записів. Платформа орієнтована на використання у високонавантажених середовищах, зокрема в edge-інфраструктурах, де критичною є мінімізація затримок доступу до даних.

Xata є хмарною документо-реляційною СКБД, що поєднує елементи класичних реляційних підходів із гнучкістю NoSQL. Особливу увагу в її реалізації приділено автоматичному масштабуванню, підтримці serverless-архітектури, а також вбудованим механізмам розмежування доступу, ізоляції середовищ та керування правами користувачів. Враховуючи орієнтацію на розробників вебзастосунків, система має зручні інтерфейси для інтеграції з популярними фреймворками, що забезпечує збереження безпеки при мінімізації зусиль на налаштування.

Turso позиціонується як легка база даних для edge-обчислень, побудована на основі libSQL – модифікованої версії SQLite [13, с. 9]. Основною ідеєю є забезпечення швидкого доступу до даних у географічно розподілених вузлах за рахунок наближення обробки до кінцевого користувача. Turso реалізує реплікацію, контроль доступу на основі токенів, ізоляцію регіональних інстанцій, що в сукупності дозволяє використовувати її в задачах, де критично важливими є локальність і безперервність доступу до даних.

Dolt поєднує можливості СКБД і системи контролю версій. Вона зберігає повну історію змін на рівні таблиць, дозволяє створювати гілки, виконувати злиття та відновлення стану, що робить її зручною для колективної роботи з даними, аналітичних досліджень і побудови систем із високими вимогами до прозорості змін. Серед механізмів безпеки – аудит дій, контроль відповідальності за зміни, а також підтримка автентифікації та прав доступу до окремих версій.

EdgeDB реалізує концепцію пост-SQL і поєднує реляційну модель з об'єктно-орієнтованими підходами до опису даних. Система вирізняється можливістю декларативного проектування складних структур із чітким визначенням типів, автоматичним генеруванням API та контрольованим доступом до даних [14, с. 2010]. Безпека досягається за рахунок типізованості, контролю запитів, обмеження на доступ до полів і реалізації правил авторизації.

Узагальнення архітектурних і функціональних характеристик розглянутих СКБД представлено в таблиці 1, що дозволяє здійснити порівняльний аналіз їхніх можливостей з огляду на тип моделі даних, особливості архітектури, реалізацію механізмів захисту доступу, сферу застосування та ключові функціональні переваги. Аналіз порівняльних характеристик свідчить про те, що сучасні системи керування базами даних, орієнтовані на serverless- та edge-архітектури, демонструють високу гнучкість у реалізації моделей даних, масштабованості та безпеки.

Таблиця 1

Порівняльна характеристика сучасних СКБД з підтримкою serverless та edge-обчислень

СКБД	Тип моделі	Архітектура	Безпека доступу	Орієнтація	Особливості
SurrealDB	Графова + документна	Edge-ready	Ролі, автентифікація, ACL	Real-time, IoT	SQL-подібна мова, мультимодельність
Xata	Документо-реляційна	Serverless	RBAC, ізоляція середовищ	Вебзастосунки, JAMstack	Простота інтеграції, схеми, пошук
Turso	Key-value (libSQL)	Edge-distributed	Токени, реплікація	Mobile, geo-distributed	Легка вага, edge-розгортання
Dolt	Реляційна + контроль версій	Self-hosted/ serverless	Контроль змін, історія, права	Спільна робота, аналітика	Git-подібна модель керування
EdgeDB	Об'єктно-реляційна	Serverless	Типізація, правила доступу	Web, API-driven	Пост-SQL, декларативність

SurrealDB і EdgeDB вирізняються підтримкою складних структур даних із можливістю типізованого доступу та інтегрованих механізмів авторизації, що сприяє побудові систем з підвищеним рівнем керованості. Xata та Turso фокусуються на швидкій інтеграції з хмарною інфраструктурою та edge-оточеннями, надаючи прості у використанні інтерфейси для управління доступом і масштабування, що робить їх придатними для реалізації вебзастосунків та мобільних сервісів. У свою чергу, Dolt пропонує унікальну концепцію контролю версій даних, що відкриває нові можливості для реалізації безпечної командної роботи та аналітики зі збереженням історії змін.

Попри високу функціональність розглянутих СКБД, актуальними залишаються питання формалізації єдиних підходів до розмежування прав доступу у мультимодельних структурах, забезпечення наскрізного шифрування на рівні окремих запитів, а також створення типових рішень для автоматизованого контролю цілісності даних у розподілених і гібридних середовищах. Ці аспекти потребують подальшого дослідження з урахуванням специфіки побудови сучасних інформаційних систем.

Незважаючи на численні переваги розглянутих систем, поглиблений аналіз їхньої архітектури виявляє низку обмежень і технічних викликів, що можуть мати критичне значення при впровадженні в розподілених середовищах з підвищеними вимогами до безпеки, цілісності та безперервності обробки даних [15, с. 293].

У системі SurrealDB основним викликом є обмежена зрілість реалізації вбудованих засобів захисту. Незважаючи на підтримку механізмів автентифікації та розмежування доступу, відсутність повноцінної багатофакторної авторизації, детальної конфігурації прав на рівні атрибутів об'єктів і централізованого журналювання дій ускладнює її використання в умовах, що передбачають високий рівень аудиту та відповідності стандартам. Крім того, відсутність формалізованої моделі консистентності в умовах паралельного доступу до графових структур даних створює ризики конфліктів при одночасному оновленні.

Xata, зважаючи на свою cloud-native архітектуру, демонструє обмежену контрольованість з боку кінцевого користувача щодо налаштування середовищ безпеки, оскільки значна частина інфраструктури прихована за serverless-абстракціями. Це обмежує можливості інтеграції з існуючими системами автентифікації та політиками безпеки підприємства. Також слід зазначити відсутність підтримки повноцінного шифрування на рівні окремих запитів або політик шифрування на рівні колонок, що є критично важливим у сфері зберігання персональних або фінансових даних.

Turso, як легковагова база з орієнтацією на edge-середовища, забезпечує швидку доставку й обробку даних, однак її спрощена модель доступу через токени має обмежену гнучкість в адмініструванні складних ієрархій прав. Реплікація між інстанціями не забезпечує гарантій строгої консистентності, що унеможливує використання цієї СКБД у задачах, де важлива узгодженість оновлень, наприклад, у фінансових системах. Також відсутність вбудованих засобів аналізу аномалій чи аудиту ускладнює контроль доступу в реальному часі.

У випадку Dolt головним недоліком є високі обчислювальні витрати на операції злиття (merge) при великій кількості паралельних гілок або складній історії змін. Через це система втрачає продуктивність при роботі в режимі високонавантажених транзакційних систем. Крім того, механізм контролю версій має низький рівень абстракції захисту – хоча історія змін зберігається, вона не захищена від модифікації без зовнішніх засобів перевірки, таких як цифрові підписи чи блокчейн-нотаріат. Відсутність тонкої конфігурації прав доступу до окремих версій чи гілок також знижує рівень гнучкості з погляду захисту інформації.

EdgeDB, попри свою типізовану структуру та декларативну модель даних, стикається з обмеженнями в реалізації складних схем розмежування доступу, зокрема у випадках, коли потрібна динамічна зміна політик на основі поведінкових факторів. У системі також бракує гнучких механізмів шифрування з підтримкою апаратного прискорення або роботи з розподіленими ключами. У випадках глибоко вкладених об'єктних структур складність управління дозволами може призводити до порушення принципів найменших привілеїв або до помилок у проектуванні безпечної схеми доступу.

Усі зазначені обмеження свідчать про наявність актуальних задач, що потребують подальшого дослідження. Для формалізації та порівняння рівня захищеності таких СКБД доцільним є побудова узагальненої моделі оцінювання ефективності систем у контексті критичних параметрів безпеки. Нехай система S характеризується множиною параметрів $P = \{p_1, p_2, \dots, p_n\}$, де кожен параметр описує окремий аспект безпеки (наприклад, p_1 – підтримка шифрування, p_2 – рівень розмежування доступу, p_3 – контроль змін, тощо). Для кожної системи S_i визначається вектор безпеки $v_i = (v_{i1}, v_{i2}, \dots, v_{in})$, а загальна ефективність може бути оцінена за допомогою зваженої норми:

$$E(S_i) = \sum_{j=1}^n w_j \cdot v_{ij}$$

де $w_j \in [0,1]$ – коефіцієнти вагомості параметрів безпеки відповідно до задачі. Застосування такої моделі дозволяє кількісно порівнювати СКБД між собою у визначеному контексті (наприклад, для систем з підвищеною відповідальністю, персональними даними або розподіленим обчисленням на периферії).

Аналіз наявних обмежень дозволяє окреслити вимоги до архітектури безпечної системи керування базами даних, орієнтованої на edge-обчислення [16, с. 65]. Така система має забезпечувати децентралізовану

обробку запитів, адаптивне масштабування, наскрізний захист даних та стійкість до втрат зв'язку з центральними вузлами. Її архітектура повинна підтримувати ізольовану обробку на периферійних вузлах, синхронізацію зі сховищем у хмарі, гнучке розмежування доступу та автоматизований аудит.

Формалізуючи архітектурну модель, можна визначити такі основні компоненти:

1. Клієнтський рівень (Client Tier) – включає мобільні, браузерні або вбудовані пристрої користувача, що взаємодіють із локальним edge-вузлом через захищені API (HTTPS, gRPC). Доступ контролюється за допомогою токенів або сертифікатів, з урахуванням контексту (геолокація, тип пристрою, поведінкові патерни).

2. Edge-вузол (Edge Node) – автономний обчислювальний компонент, розміщений ближче до джерел даних. Забезпечує локальне зберігання та обробку запитів, реалізує механізми кешування, валідації, розмежування доступу та шифрування. У разі втрати зв'язку з центральним сховищем може функціонувати у відключеному режимі з подальшою синхронізацією.

3. Менеджер політик доступу (Access Policy Engine) – модуль, який обслуговує запити авторизації на основі атрибутивної або ролейної моделі (ABAC/RBAC). Підтримує конфігурацію динамічних політик доступу, з урахуванням рівня чутливості даних та поточного контексту.

4. Журнальне сховище (Audit & Logging Service) – служба, що акумулює інформацію про всі події доступу, запити, оновлення та дії користувачів. Дані журналювання синхронізуються з центральною системою без втрати записів, навіть у разі нестабільного з'єднання.

5. Центральне сховище (Cloud Storage Core) – репозиторій, який зберігає повні резервні копії, агреговану аналітику, історію змін і виконує періодичну синхронізацію з edge-вузлами. Реалізує політики зберігання, реплікації та регламентованого доступу.

6. Служба керування ключами (KMS) – модуль, що забезпечує шифрування даних як у стані спокою, так і при передачі. Ключі зберігаються в апаратних сховищах (HSM) або програмно розділені за географічною ознакою.

Взаємодія основних компонентів безпечної системи керування базами даних, орієнтованої на edge-обчислення, представлена у вигляді узагальненої архітектурної моделі на рис. 1.



Рис. 1. Архітектура безпечної edge-орієнтованої СКБД

Описана архітектура дозволяє забезпечити баланс між продуктивністю та безпекою, характерний для критичних розподілених систем. Децентралізованість обробки, підтримка локального доступу, гнучке розмежування прав і журналювання створюють основу для побудови стійких до збоїв і атак баз даних, які відповідають сучасним вимогам щодо захисту інформації. Далі доцільно розглянути, як особливості цієї архітектури впливають на стійкість до загроз, та сформувані формальну модель для оцінки ризиків, характерних для кожного з компонентів системи.

Оцінка ризиків в архітектурі безпечної edge-орієнтованої системи керування базами даних потребує формалізованого підходу, що дозволяє враховувати вплив зовнішніх загроз, внутрішніх вразливостей та обмежень, пов'язаних з обчислювальними та мережевими ресурсами. З цією метою доцільно використувати узагальнену модель, в якій рівень ризику для певного компонента системи визначається на основі ймовірності реалізації загрози, ступеня вразливості елемента та критичності потенційних наслідків.

Нехай архітектура системи складається з множини компонентів $C = \{c_1, c_2, \dots, c_n\}$, а для кожного компонента c_i визначено відповідну трійку оцінок:

- $T_i \in [0, 1]$ – ймовірність реалізації загрози;
- $V_i \in [0, 1]$ – ступінь вразливості компонента;
- $I_i \in [0, 1]$ – інтенсивність (критичність) впливу при реалізації загрози.

Формальний рівень ризику для кожного компонента визначається як:

$$R_i = T_i \cdot V_i \cdot I_i$$

Загальний ризик системи можна оцінити як агреговану функцію:

$$R_{total} = \sum_{i=1}^n \alpha_i \cdot R_i$$

де α_i – ваговий коефіцієнт для кожного компонента, який враховує його значущість для системи в цілому (наприклад, для edge-вузла або KMS ці значення можуть бути вищими, ніж для клієнтського рівня).

Для практичного використання така модель дозволяє: – ідентифікувати критичні точки, у яких ризики перевищують допустимі порогові значення; – обґрунтовано перерозподіляти ресурси безпеки між компонентами; – порівнювати різні варіанти архітектурних рішень щодо їхньої стійкості до загроз.

У процесі аналізу ефективності архітектурних підходів виявлено кілька принципів, які демонструють найкращі результати в критичних розподілених системах:

1. Ізоляція рівнів обробки. Розділення обчислень між клієнтським, edge- та хмарним рівнями з чітко визначеними інтерфейсами взаємодії дозволяє мінімізувати наслідки успішної атаки на окремий рівень, локалізуючи її вплив.

2. Локалізація доступу до даних. Зберігання та обробка даних на edge-вузлах з періодичною синхронізацією з центральним сховищем забезпечує зменшення обсягу переданих конфіденційних даних, що знижує ризики перехоплення та несанкціонованого доступу під час передачі.

3. Впровадження політик доступу на основі атрибутів (ABAC). Підхід до динамічного контролю доступу, який враховує контекст запиту, роль користувача, геолокацію, пристрій і поточний стан системи, дає змогу більш точно визначати дозволені дії та підвищувати адаптивність системи до загроз.

4. Наскрізне шифрування. Забезпечення шифрування даних як під час зберігання (at rest), так і під час передачі (in transit), із використанням незалежної служби керування ключами (KMS), дозволяє дотримуватись вимог безпеки навіть у разі компрометації окремих вузлів.

5. Журналювання та аудит у реальному часі. Запровадження розподілених механізмів журналювання подій з гарантованою доставкою до центральної системи аудиту дозволяє своєчасно виявляти аномалії, аналізувати спроби несанкціонованого доступу та підвищувати загальну стійкість системи до внутрішніх загроз.

Застосування описаних підходів у рамках запропонованої архітектури дозволяє підвищити рівень інформаційної безпеки без істотного зниження продуктивності або ускладнення масштабування. Саме комбінація децентралізованого зберігання, динамічного управління доступом і наскрізного контролю на рівні кожного компонента є визначальною для забезпечення стійкості до загроз у сучасних критичних розподілених системах.

Висновки. У ході дослідження проаналізовано архітектурні та функціональні особливості сучасних систем керування базами даних, зосереджених на підтримці serverless- та edge-обчислень. Розглянуто актуальні СКБД нового покоління – SurrealDB, Xata, Turso, Dolt та EdgeDB – з позиції їхньої здатності забезпечувати захист даних у розподілених середовищах. Встановлено, що ці системи пропонують інноваційні підходи до обробки запитів, зберігання даних та контролю доступу, однак мають певні обмеження, пов’язані з конфігурацією політик безпеки, підтримкою шифрування та аудитом дій користувачів.

На основі проведеного аналізу запропоновано узагальнену архітектуру безпечної edge-орієнтованої СКБД, яка передбачає інтеграцію локальної обробки даних, гнучкого управління доступом, наскрізного шифрування та централізованого журналювання. Побудовано формальну модель оцінки ризиків для таких систем, що дозволяє кількісно оцінити вплив потенційних загроз на кожен структурний компонент.

Сформульовано ключові архітектурні захисні підходи, поєднання яких є доцільним для побудови сучасних захищених інформаційних систем з високими вимогами до надійності, масштабованості та стійкості до зовнішніх і внутрішніх загроз.

Результати дослідження можуть бути використані як основа для подальшого вдосконалення підходів до захисту даних у новітніх СКБД, зокрема при проєктуванні платформ для IoT, медицини, фінансових систем і критичної інфраструктури.

Список використаних джерел:

1. Sulieman N. A., Ricciardi Celsi L., Li W., Zomaya A., Villari M. Edge-oriented computing: A survey on research and use cases. *Energies*. 2022. Vol. 15, No. 2. P. 452.
2. Xie R., Tang Q., Qiao S., Zhu H., Yu F. R., Huang T. When serverless computing meets edge computing: Architecture, challenges, and open issues. *IEEE Wireless Communications*. 2021. Vol. 28, No. 5. P. 126–133.
3. Wang S., Zhao Y., Xie Y., Liu Z., Hou X., Zou Q., Wang H. Towards Reliable Vector Database Management Systems: A Software Testing Roadmap for 2030. *arXiv preprint*. 2025. arXiv:2502.20812.
4. Sabbioni A., Rosa L., Bujari A., Foschini L., Corradi A. DIFFUSE: A DIstributed and decentralized platForm enabling Function composition in Serverless Environments. *Computer Networks*. 2022. Vol. 210. Article ID: 108993.

5. Magham R. K. Cloud-native distributed databases: a comprehensive overview. *Management*. 2024. Vol. 15, No. 2. P. 60–74.
6. De Heus M., Psarakis K., Fragkoulis M., Katsifodimos A. Distributed transactions on serverless stateful functions. *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems*. 2021. P. 31–42.
7. Lengweiler D., Vogt M., Schuldt H. MMSBench-Net: Scenario-Based Evaluation of Multi-Model Database Systems. *International Journal of Data Management and Analytics*. 2023. Vol. 8, No. 3. P. 145–158.
8. Kim J., Kim C., Son B., Ryu J., Kim S. A study on Time-series DBMS Application for EdgeX-based lightweight edge gateway. *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)*. IEEE, 2020. P. 1795–1798.
9. Huang H., Zhang J., Hu J., Fu Y., Qin C. Research on distributed dynamic trusted access control based on security subsystem. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*. 2022. Vol. 17. P. 3306–3320.
10. Mansouri Y., Prokhorenko V., Babar M. A. An automated implementation of hybrid cloud for performance evaluation of distributed databases. *Journal of Network and Computer Applications*. 2020. Vol. 167. Article ID: 102740.
11. Zhang L., Pang K., Xu J., Niu B. JSON-based control model for SQL and NoSQL data conversion in hybrid cloud database. *Journal of Cloud Computing*. 2022. Vol. 11, No. 1. P. 23.
12. Goriparthi S. Streamlining API development: a comparative analysis of GraphQL and RESTful web services. *Journal of Web Engineering and Services*. 2023. Vol. 12, No. 4. P. 4587.
13. Enberg P., Tarkoma S., Rao A. Towards Database and Serverless Runtime Co-Design. *Proceedings of the CoNEXT Student Workshop 2023*. 2023. P. 9–10.
14. Katikeri R., Pepakayala A. N. R., Kuncham L., Barla R., Tarun K., Charan S., Vaid A. EVOLVE: Evaluation of Language-to-SQL Validity and Effectiveness – A Detailed Review Framework for Complex Text-to-SQL Queries. *2024 IEEE International Conference on Big Data (BigData)*. 2024. P. 1999–2004.
15. Voievodin Y., Rozlomii I., Yarmilko A. Approach to Evaluate Scheduling Strategies in Container Orchestration Systems. *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference*. 2023. No. 6. P. 292–295.
16. Voievodin Y. V., Rozlomii I. O. Advanced software framework for comparing balancing strategies in container orchestration systems. *Proceedings of the International Scientific Conference «DOORS»*. 2024. April. P. 60–69.

References:

1. Sulieman, N. A., Ricciardi Celsi, L., Li, W., Zomaya, A., & Villari, M. (2022). Edge-oriented computing: A survey on research and use cases. *Energies*, 15(2), 452. <https://doi.org/10.3390/en15020452>
2. Xie, R., Tang, Q., Qiao, S., Zhu, H., Yu, F. R., & Huang, T. (2021). When serverless computing meets edge computing: Architecture, challenges, and open issues. *IEEE Wireless Communications*, 28(5), 126–133. <https://doi.org/10.1109/MWC.001.2000458>
3. Wang, S., Zhao, Y., Xie, Y., Liu, Z., Hou, X., Zou, Q., & Wang, H. (2025). Towards Reliable Vector Database Management Systems: A Software Testing Roadmap for 2030. *arXiv Preprint*. arXiv:2502.20812
4. Sabbioni, A., Rosa, L., Bujari, A., Foschini, L., & Corradi, A. (2022). DIFFUSE: A DIstributed and decentralized platForm enabling Function composition in Serverless Environments. *Computer Networks*, 210, 108993. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2022.108993>
5. Magham, R. K. (2024). Cloud-native distributed databases: A comprehensive overview. *Management*, 15(2), 60–74.
6. De Heus, M., Psarakis, K., Fragkoulis, M., & Katsifodimos, A. (2021). Distributed transactions on serverless stateful functions. In *Proceedings of the 15th ACM International Conference on Distributed and Event-based Systems* (pp. 31–42). <https://doi.org/10.1145/3465481.3469195>
7. Lengweiler, D., Vogt, M., & Schuldt, H. (2023). MMSBench-Net: Scenario-Based Evaluation of Multi-Model Database Systems. *International Journal of Data Management and Analytics*, 8(3), 145–158.
8. Kim, J., Kim, C., Son, B., Ryu, J., & Kim, S. (2020). A study on Time-series DBMS Application for EdgeX-based lightweight edge gateway. In *2020 International Conference on Information and Communication Technology Convergence (ICTC)* (pp. 1795–1798). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICTC49870.2020.9289193>
9. Huang, H., Zhang, J., Hu, J., Fu, Y., & Qin, C. (2022). Research on distributed dynamic trusted access control based on security subsystem. *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, 17, 3306–3320. <https://doi.org/10.1109/TIFS.2022.3171182>
10. Mansouri, Y., Prokhorenko, V., & Babar, M. A. (2020). An automated implementation of hybrid cloud for performance evaluation of distributed databases. *Journal of Network and Computer Applications*, 167, 102740. <https://doi.org/10.1016/j.jnca.2020.102740>
11. Zhang, L., Pang, K., Xu, J., & Niu, B. (2022). JSON-based control model for SQL and NoSQL data conversion in hybrid cloud database. *Journal of Cloud Computing*, 11(1), 23. <https://doi.org/10.1186/s13677-021-00270-y>

-
12. Goriparthi, S. (2023). Streamlining API development: A comparative analysis of GraphQL and RESTful web services. *Journal of Web Engineering and Services*, 12(4), 4587.
 13. Enberg, P., Tarkoma, S., & Rao, A. (2023). Towards Database and Serverless Runtime Co-Design. In *Proceedings of the CoNEXT Student Workshop 2023* (pp. 9–10).
 14. Katikeri, R., Pepakayala, A. N. R., Kuncham, L., Barla, R., Tarun, K., Charan, S., & Vaid, A. (2024). EVOLVE: Evaluation of Language-to-SQL Validity and Effectiveness – A Detailed Review Framework for Complex Text-to-SQL Queries. In *2024 IEEE International Conference on Big Data (BigData)* (pp. 1999–2004). IEEE.
 15. Voievodin, Y., Rozlomii, I., & Yarmilko, A. (2023). Approach to Evaluate Scheduling Strategies in Container Orchestration Systems. In *Modeling, Control and Information Technologies: Proceedings of the International Scientific and Practical Conference* (No. 6, pp. 292–295).
 16. Voievodin, Y. V., & Rozlomii, I. O. (2024). Advanced software framework for comparing balancing strategies in container orchestration systems. In *Proceedings of the International Scientific Conference «DOORS»* (April, pp. 60–69).

МЕНЕДЖМЕНТ

UDC 004.75

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.17>

Merinova S. V., Candidate of Economical Sciences,
Associate Professor, Associate Professor of the Department
of Information Systems and Technologies
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University
of Trade and Economics
ORCID: 0000-0001-6563-5320

Romanuke V. V., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor of the Department of Information Systems and Technologies
Vinnytsia Institute of Trade and Economics of State University
of Trade and Economics
ORCID: 0000-0001-9638-9572

PERSPECTIVES OF BLOCKCHAIN TECHNOLOGY IN BUSINESS AND MANAGEMENT: ADVANTAGES AND CHALLENGES

Blockchain is a decentralized and distributed digital ledger technology that records transactions across multiple computers. The key idea is that once information is recorded on a blockchain, it is extremely difficult to alter or tamper with because each block in the chain contains a cryptographic hash of the previous block, a timestamp, and transaction data. This creates a secure, transparent, and immutable system. In this paper, we review the key features of blockchain and examples of its particular application in business and management. In Ukraine, while blockchain technology has a huge potential to change many business sectors, providing security, transparency and efficiency of processes, it is necessary to solve the issues of scalability, regulatory barriers, as well as optimize energy consumption for full implementation. The future of blockchain in business and management looks promising, especially given the opportunities offered by smart contracts, decentralized finance, and asset tokenization. The today's leading trend is energy trading whose blockchains have been increasingly used to record and publish local and regional electricity market data. This is believed to produce a significant impact on establishing and solidifying transparency of pricing and investing in energy sector. Solving current problems will allow blockchain technology to become the main tool for creating transparent and reliable business processes. However, scalability still remains the most serious and pressing problem in blockchain implementation. While significant advancements are being made to address it, the unsolved balance between scalability, security, and decentralization (the blockchain trilemma) presents ongoing technical, economic, and environmental challenges.

Key words: blockchain, business, management, smart contracts, tokenization of assets, decentralized finance.

Мерінова С. В., Романюк В. В. Перспективи технології блокчейн у бізнесі та менеджменті: переваги та виклики

Блокчейн – це децентралізована та розподілена технологія цифрової книги, яка записує транзакції на кількох комп'ютерах. Ключова ідея полягає в тому, що коли інформацію записано в блокчейн, її надзвичайно важко змінити або підробити, оскільки кожен блок у ланцюжку містить криптографічний хеш попереднього блоку, мітку часу та дані транзакції. Це створює безпечну, прозору та незмінну систему. У цій статті ми розглядаємо ключові особливості блокчейну та приклади його конкретного застосування в бізнесі та управлінні. В Україні, хоча технологія блокчейн має величезний потенціал змінити багато секторів бізнесу, забезпечуючи безпеку, прозорість та ефективність процесів, для повноцінного впровадження необхідно вирішити питання масштабованості, регуляторних бар'єрів, а також оптимізувати енергоспоживання. Майбутнє блокчейну в бізнесі та управлінні виглядає багатообіцяючим, особливо враховуючи можливості, які пропонують смарт-контракти, децентралізоване фінансування та токенизація активів. Провідною тенденцією сьогодні є торгівля енергією, блокчейни якої все частіше використовуються для запису та публікації даних місцевого та регіонального ринку електроенергії. Вважається, що це матиме значний вплив на встановлення та зміцнення прозорості ціноутворення та інвестування в енергетичний сектор. Вирішення актуальних проблем дозволить технології блокчейн стати основним інструментом створення прозорих і надійних бізнес-процесів. Однак масштабованість все ще залишається найсерйознішою та актуальною проблемою впровадження блокчейна.

© S. V. Merinova, V. V. Romanuke, 2025

Незважаючи на значні успіхи, щоб вирішити цю проблему, невирішений баланс між масштабованістю, безпекою та децентралізацією (трилема блокчейну) створює постійні технічні, економічні та екологічні проблеми.

Ключові слова: блокчейн, бізнес, менеджмент, смарт-контракти, токенизація активів, децентралізовані фінанси.

Problem statement. Blockchain technology is one of the most revolutionary innovations of contemporary era, which has the potential to fundamentally change the approach to doing business in various industries [1]. The ability of blockchain technology to provide transparency, security, and decentralization of processes makes this technology indispensable in areas such as finance, logistics, healthcare, and commerce [2]. In today's business environment, where digitization is becoming a key factor in competitiveness, blockchain is a tool that can considerably improve efficiency and significantly reduce fraud risks [3].

Despite its great potential, blockchain technology faces several unsolved challenges [4]. Blockchain systems often have limited bandwidth, which makes them difficult to deploy on a large scale. Insufficient legal regulation and legal uncertainty in many countries limit the implementation of blockchain in business processes. The technology, especially in Proof-of-Work algorithms, consumes significant amounts of energy, which raises environmental and economic issues. Implementing blockchain solutions into existing systems is often technically complex and requires significant investment.

Implementing a blockchain requires specific equipment and computational resources depending on the type of blockchain (public, private, or consortium) and its intended use (e. g., cryptocurrency, smart contracts, supply chain management). The essential equipment and computational resources needed are nodes, mining equipment, blockchain client software and platforms, cloud-based solutions, networking infrastructure, power and cooling, blockchain developers and engineers, system administrators, network engineers, and security experts [1], [2]. Implementing a blockchain involves a combination of computing hardware (nodes, storage, processors), software (blockchain clients, smart contract platforms), networking equipment, and significant power and cooling resources. The choice of equipment and resources depends on whether the blockchain is public (requiring more decentralized and secure setups) or private/consortium (where the setup can be more centralized and managed).

State-of-the-art motivation and purpose. As in many countries, the study of blockchain technology is a topical field of computer science in Ukraine. Many scientists from various scientific institutions and fields are engaged in this topic, attempting to cover a specific domain of knowledge in building distributed ledgers with growing lists of records that are securely linked together via cryptographic hashes. As of 2024, there are a lot of open questions still being studied. Among them: the use of blockchain in economics and financial technologies [5], the implementation of blockchain in business processes and decentralized financial systems [6], data security and algorithms for decentralized networks [7], the use of blockchain in public administration [8], decentralized financial systems based on the blockchain [9], the impact of blockchain on digital economies [10], the impact of blockchain on international financial systems and smart contracts [11], etc. Many scientists and international research groups are actively working on the development and improvement of blockchain technology in various fields, including economics, logistics, finance, and public administration.

The most serious problem in blockchain implementation is the scalability issue. Scalability refers to a blockchain's ability to handle a growing number of transactions and nodes without compromising speed, efficiency, or security. As blockchain networks expand and the number of transactions increases, achieving scalability while maintaining decentralization and security (the so called blockchain trilemma) becomes a significant challenge [12], [13].

The purpose of this study is to analyze the prospects for the development of blockchain technology in business and management, to identify the main problems that prevent their full implementation, and to find ways to solve them. Special attention is paid to the analysis of the impact of blockchain on various business sectors and the possibilities of its application to increase efficiency.

Analysis. Blockchain technology gained wide popularity with the appearance of the first cryptocurrency, Bitcoin, in 2009. Its creator, known under the pseudonym Satoshi Nakamoto, presented the blockchain as the basis for a digital currency that does not require the involvement of banks or governments to carry out transactions. This decentralized approach to data storage and record keeping was a breakthrough in the financial field. In subsequent years, blockchain began to be actively used in various industries: finance, logistics, health care, and others.

In Ukraine, blockchain technology is at an early stage of implementation, but it has a huge potential for development in various sectors of the economy. One of the most promising areas for the application of blockchain is public administration. Thanks to decentralized systems, Ukraine can significantly increase the transparency of government processes, including land registration, state registers and public procurement. For example, there are already projects using blockchain for electronic voting, which can reduce the risks of fraud and make the process more accessible to citizens.

Blockchain has great potential to transform business processes. First of all, this applies to the financial sector, where blockchain allows you to speed up transactions, reduce fees and increase data security. Smart contracts are one of the key features of the blockchain, which can automate and simplify transactions, reducing the need for intermediaries [11].

The most striking example is cryptocurrencies (Bitcoin, Ethereum). In addition, blockchain is used for international transfers, providing instant transactions without intermediaries and reducing fees (for example, the Ripple system).

In logistics, blockchain helps ensure full transparency of supply chains. The technology allows you to track every step of the movement of goods, which reduces opportunities for counterfeiting and ensures faster and more efficient delivery. Maersk together with IBM introduced a blockchain platform for tracking container shipments. This made it possible to automate the accounting of goods and significantly increase the transparency of supply chains.

In healthcare, blockchain can be used to ensure the safety and security of patient medical data. This allows for the creation of reliable decentralized data storage systems, which reduces the risk of loss or unauthorized access to information [7].

However, scaling blockchain technology remains a key challenge. To achieve mass adoption, solutions are needed that will increase the bandwidth of blockchain networks without increasing energy consumption and transaction costs.

Blockchain technology is rapidly developing and becoming increasingly attractive to businesses due to their ability to optimize processes, increase transparency and data security. The main prospects of blockchain are its applications for transparent transactions, asset management and automation of operations. It is expected that in the coming years, more and more companies will use blockchain to optimize business processes.

The key aspects of blockchain technology in business and management, their advantages, development prospects and challenges that blockchain implementation may face are presented in Table 1.

Table 1

Prospects of blockchain technology in business and management

Field	Blockchain application	Advantages	Prospects for development	Future challenges
Financial sector	Decentralized finance (DeFi), cryptocurrencies, smart contracts	Elimination of intermediaries, automation of deals, faster transactions	Development of DeFi, integration of cryptocurrencies into traditional systems	Scalability, regulation
Logistics and supply chains	Supply transparency, process automation, product tracking	Transparency, resource savings, real-time tracking	Full supply chain automation, customer transparency	Integration into existing systems
State services	Electronic registers, transparency of government processes, e-voting	Minimization of corruption risks, speed of processes, accessibility	Transparency of state processes, simplification of bureaucratic procedures	Legal aspects, legal regulation
Healthcare	Protection of medical data, exchange of information between institutions	Protection of personal data, secure exchange of information	Creation of secure platforms for data exchange between doctors and patients	Protection of privacy, compatibility of systems
Property registration and accounting	Tokenization of assets, registration of ownership	Transparency of registration processes, increase in liquidity of assets	Faster registration, transparency in the field of real estate and other assets	Legal regulation of tokenization of assets
Industry 4.0	Internet of Things (IoT), industrial systems	Automation, transparency of production processes	Use of blockchain for the development of IoT and industrial automation	Energy efficiency, scalability of systems

Currently in Ukraine, blockchain technology is relevantly used for the following aspects and processes in business:

1. Smart contracts.
2. Tokenization of assets.
3. Decentralized finance.

Smart contracts are one of the most promising areas of blockchain application. A smart contract is a program that automatically executes the terms of the agreement when all its conditions are met. This eliminates the need for intermediaries (such as lawyers or notaries), which reduces the time and costs of concluding transactions.

For example, in real estate, smart contracts can be used to automate sales. In this case, the money is transferred automatically after fulfilling all the conditions of the agreement, such as proof of ownership and payment. This not only simplifies the process, but also significantly reduces the risk of fraud.

With the help of this perspective, companies can save up to 10 to 15% of costs that previously went to legal services and drafting agreements. Automating transactions can reduce the time it takes to execute them from days or weeks to minutes. Automatic execution of transactions reduces the risk of errors or manipulation.

The next perspective is tokenization of assets.

Asset tokenization refers to the conversion of real assets (such as real estate, securities, commodities) into digital tokens on a blockchain platform. This allows assets to become more liquid and traded on digital platforms.

For example, instead of selling an entire building, an owner can issue tokens, each representing a portion of the property. These tokens can be sold to investors, allowing you to raise capital faster and more efficiently.

Asset owners can quickly sell ownership shares, which increases their liquidity by 20 to 30%. Tokenization allows you to reduce the costs of IPOs or attracting investments through stock markets by 10 to 20%. With the help of asset tokenization, companies can attract investors from all over the world.

As for decentralized finance, these are financial instruments that use the blockchain to provide services such as credits, loans and currency exchange without the need for intermediaries (banks, credit institutions). DeFi allows users to directly interact with each other through smart contracts.

This significantly reduces the costs of financial services and increases the speed of transactions. For example, a user can take out a loan on a blockchain platform, where the terms of the loan are regulated by smart contracts, without the involvement of the bank.

With the help of DeFi platforms, interest rates on loans can be 2 to 5% lower compared to traditional banks. Blockchain transactions can be carried out instantly, reducing waiting time, allowing transactions to be completed faster. DeFi opens up financial services to millions of people in the world who do not have access to traditional banking systems.

Therefore, the introduction of blockchain for business in Ukraine will allow:

1. Implementation of blockchain in public services to increase transparency and reduce bureaucracy.
2. Growth of investments in blockchain startups in the field of financial services, agriculture and IT.
3. Use of smart contracts to automate business processes in large and medium-sized companies.
4. The possibility of blockchain integration in the field of energy for transparent accounting of consumption and sale of energy resources.

On a global level, blockchain is already impacting industries such as finance, logistics, healthcare and digital identity. A special part takes game industry (Fig. 1), which is at the top along with financial sector. The latter, nevertheless, is the leader continuing to make significant progress since 2010s. One of the loudest trends in recent years is the development of decentralized finance (DeFi), which enables users to receive credits, loans and other financial services without the involvement of traditional banks. Many companies, such as Walmart and Maersk, are already using blockchain to track the supply of goods in real time, which can reduce losses and increase the transparency of supply chains [10], [13].

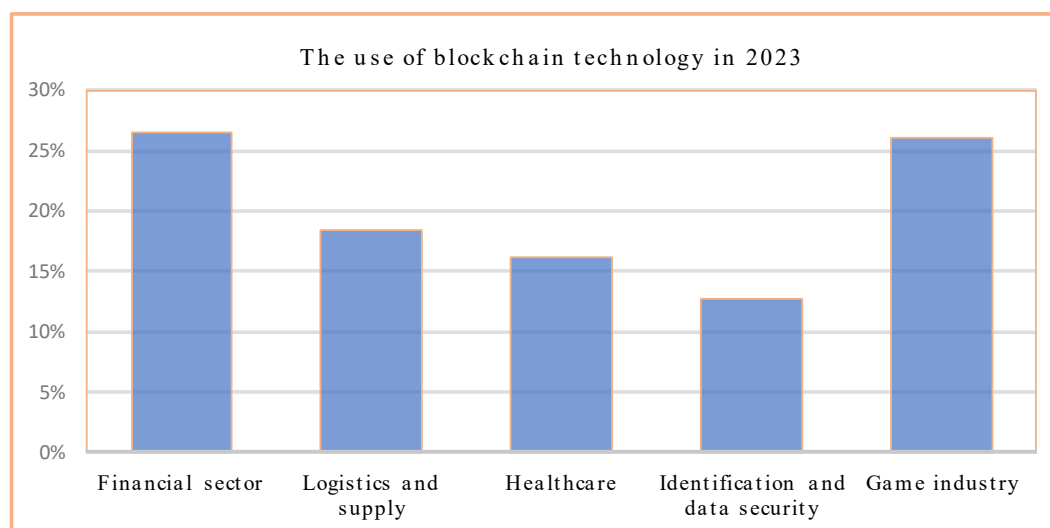


Fig. 1. Impact of blockchain technology on top-5 industries

Another comprehensive analysis carried out on reviews of the current state of blockchain in business and management has shown that supply chain models lead. For instance, Fig. 2 presents a word cloud of bigrams in recent scientific publications devoted to the use of blockchain in business and management. Apart from bigram “blockchain technology”, whose highly-rated appearance is quite obvious, other frequently appearing bigrams are “supply chain”, “smart contract(s)” (the Porter stemmer has not been applied here to normalize the words usage), “chain management”, and “energy trading”. Fields of big data, data management, and access control appear to have impressive interest from researchers.



Fig. 4. Three underlying topics in the recent scientific publications devoted to the use of blockchain in business and management

Obviously, blockchain is not just a fashionable technology, but a tool capable of fundamentally changing many sectors of the economy, both in Ukraine and worldwide. Its implementation will contribute to the transparency of business processes, automation of operations and increased data security. In Ukraine, blockchain can become an important factor in fighting corruption, developing financial technologies and improving business efficiency. Another perspective is the use of smart contracting in ensuring local and global safety, whose violations being properly registered would automatically impose restrictions and fining on violators and their accomplices.

Conclusion. Blockchain technology has a huge potential to change many business sectors, providing security, transparency and efficiency of processes. However, for their full implementation, it is necessary to solve the issues of scalability, regulatory barriers, as well as optimize energy consumption. The future of blockchain in business looks promising, especially given the opportunities offered by smart contracts, decentralized finance, and asset tokenization. The today's leading trend is energy trading whose blockchains have been increasingly used to record and publish local and regional electricity market data. This is believed to produce a significant impact on establishing and solidifying transparency of pricing and investing in energy sector.

Solving current problems will allow blockchain technology to become the main tool for creating transparent and reliable business processes. However, scalability still remains the most serious and pressing problem in blockchain implementation. While significant advancements are being made to address it, the unsolved balance between scalability, security, and decentralization (the blockchain trilemma) presents ongoing technical, economic, and environmental challenges. Solving these problems is crucial for blockchain technology to achieve mass adoption in business and management and, in general, to implement it across industries and applications. In particular, approaches to overcoming the blockchain trilemma, where it is extremely challenging for a blockchain network to achieve three key properties of decentralization, security, and scalability simultaneously, are actively developed. Innovative technologies and consensus models continue to evolve, potentially bringing us closer to overcoming the trilemma.

Bibliography:

1. Van Looy A. Blockchain Technology. In: From Emerging Technologies to Business Opportunities, pp. 121–145. Springer, Cham, 2024.
2. Pennekamp J., Bader L., Wagner E., Hiller J., Matzutt R., Wehrle K. Blockchain Technology Accelerating Industry 4.0. In: Ruj S., Kanhere S. S., Conti M. (eds.). *Blockchains. Advances in Information Security*, vol. 105, pp. 531–564. Springer, Cham, 2024.
3. Zhuo S., Wu W., Zhou Y., Cao R., Bian J. Research on Comprehensive Blockchain Regulation and Anti-fraud System. In: Chen J., Wen B., Chen T. (eds.). *Blockchain and Trustworthy Systems. BlockSys 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1896, pp. 133–146. Springer, Singapore, 2024.
4. Abrar I., Sheikh J. A. Current trends of blockchain technology: architecture, applications, challenges, and opportunities. *Discover Internet of Things*. 2024, no. 4, Art. no. 7.
5. Wan H., Li K., Huang Y., Zhang L. Blockchain and Financial E-services. In: Nof S. Y. (ed.). *Springer Handbook of Automation. Springer Handbooks*, pp. 1371–1383. Springer, Cham, 2023.
6. Tumasjan A. The Promise and Prospects of Blockchain-Based Decentralized Business Models. In: Glückler J., Panitz R. (eds.). *Knowledge and Digital Technology. Knowledge and Space*, vol. 19, pp. 203–224. Springer, Cham, 2024.
7. Yunusova R. Decentralized Blockchain Networks and Economic Security: Balancing Scalability and Security Tradeoffs. In: Koucheryavy Y., Aziz A. (eds.). *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14542, pp. 244–252. Springer, Cham, 2024.

-
8. Rot A., Sobińska M., Hernes M., Franczyk B. Digital Transformation of Public Administration Through Blockchain Technology. In: Hernes M., Rot A., Jelonek D. (eds.). *Towards Industry 4.0 – Current Challenges in Information Systems. Studies in Computational Intelligence*, vol. 887, pp. 111–126. Springer, Cham, 2020.
 9. Joshi S., Choudhury A., Minu R. I. Quantum blockchain-enabled exchange protocol model for decentralized systems. *Quantum Information Processing*. 2023, no. 22, Art. no. 404.
 10. Hong Z., Xiao K. Digital economy structuring for sustainable development: the role of blockchain and artificial intelligence in improving supply chain and reducing negative environmental impacts. *Scientific Reports*. 2024, no. 14, Art. no. 3912.
 11. Singh G. Blockchain-Based Smart Contracts: Technical and Usage Aspects. In: Kaushik K., Sharma I. (eds.). *Next-Generation Cybersecurity. Blockchain Technologies*, pp. 99–115. Springer, Singapore, 2024.
 12. Reno S., Haque M. M. Utilizing Off-Chain Storage Protocol for Solving the Trilemma Issue of Blockchain. In: Dutta P., Bhattacharya A., Dutta S., Lai W. C. (eds.). *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1348, pp. 169–179. Springer, Singapore, 2023.
 13. Teoh B. P. C. Navigating the Blockchain Trilemma: A Supply Chain Dilemma. In: Ismail A., Dahalan W. M., Öchsner, A. (eds.). *Advanced Maritime Technologies and Applications. Advanced Structured Materials*, vol. 166, pp. 291–300. Springer, Cham, 2022.

References:

1. Van Looy A. (2024). Blockchain Technology. In: From Emerging Technologies to Business Opportunities, pp. 121–145. Springer, Cham.
2. Pennekamp J., Bader L., Wagner E., Hiller J., Matzutt R., Wehrle K. (2024). Blockchain Technology Accelerating Industry 4.0. In: Ruj S., Kanhere S. S., Conti M. (eds.). *Blockchains. Advances in Information Security*, vol. 105, pp. 531–564. Springer, Cham.
3. Zhuo S., Wu W., Zhou Y., Cao R., Bian J. (2024). Research on Comprehensive Blockchain Regulation and Anti-fraud System. In: Chen J., Wen B., Chen T. (eds.). *Blockchain and Trustworthy Systems. BlockSys 2023. Communications in Computer and Information Science*, vol. 1896, pp. 133–146. Springer, Singapore.
4. Abrar I., Sheikh J. A. (2024). Current trends of blockchain technology: architecture, applications, challenges, and opportunities. *Discover Internet of Things*, 4, Art. no. 7.
5. Wan H., Li K., Huang Y., Zhang L. (2023). Blockchain and Financial E-services. In: Nof S. Y. (ed.). *Springer Handbook of Automation. Springer Handbooks*, pp. 1371–1383. Springer, Cham.
6. Tumasjan A. (2024). The Promise and Prospects of Blockchain-Based Decentralized Business Models. In: Glückler J., Panitz R. (eds.). *Knowledge and Digital Technology. Knowledge and Space*, vol. 19, pp. 203–224. Springer, Cham.
7. Yunusova R. (2024). Decentralized Blockchain Networks and Economic Security: Balancing Scalability and Security Tradeoffs. In: Koucheryavy Y., Aziz A. (eds.). *Internet of Things, Smart Spaces, and Next Generation Networks and Systems. Lecture Notes in Computer Science*, vol. 14542, pp. 244–252. Springer, Cham.
8. Rot A., Sobińska M., Hernes M., Franczyk B. (2020). Digital Transformation of Public Administration Through Blockchain Technology. In: Hernes M., Rot A., Jelonek D. (eds.). *Towards Industry 4.0 – Current Challenges in Information Systems. Studies in Computational Intelligence*, vol. 887, pp. 111–126. Springer, Cham.
9. Joshi S., Choudhury A., Minu R. I. (2023). Quantum blockchain-enabled exchange protocol model for decentralized systems. *Quantum Information Processing*, 22, Art. no. 404.
10. Hong Z., Xiao K. (2024). Digital economy structuring for sustainable development: the role of blockchain and artificial intelligence in improving supply chain and reducing negative environmental impacts. *Scientific Reports*, 14, Art. no. 3912.
11. Singh G. (2024). Blockchain-Based Smart Contracts: Technical and Usage Aspects. In: Kaushik K., Sharma I. (eds.). *Next-Generation Cybersecurity. Blockchain Technologies*, pp. 99–115. Springer, Singapore.
12. Reno S., Haque M. M. (2023). Utilizing Off-Chain Storage Protocol for Solving the Trilemma Issue of Blockchain. In: Dutta P., Bhattacharya A., Dutta S., Lai W. C. (eds.). *Emerging Technologies in Data Mining and Information Security. Advances in Intelligent Systems and Computing*, vol. 1348, pp. 169–179. Springer, Singapore.
13. Teoh B. P. C. (2022). Navigating the Blockchain Trilemma: A Supply Chain Dilemma. In: Ismail A., Dahalan W. M., Öchsner A. (eds.). *Advanced Maritime Technologies and Applications. Advanced Structured Materials*, vol. 166, pp. 291–300. Springer, Cham.

Огліх В. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент,
вчений секретар
Інституту транспортних систем та технологій
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0003-3193-7931

Шаповалов О. В., кандидат технічних наук, старший науковий
співробітник, доцент кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-8788-3771

Разгонов С. А., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-1244-2047

Леснікова І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

УПРАВЛІННЯ ТРАНСПОРТНИМИ СИСТЕМАМИ ІНТЕРМОДАЛЬНИХ ТА МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Транспортна система економіки в умовах глобалізації важливий компонент інноваційно-технологічний розвиток країни та світу. В єдине ціле транспортна система безпеково, економічно, технологічно та екологічно поєднує різні функціональні складники. Це свідчить про багатоаспектність проблем транспортних систем. Проаналізовано вплив військової агресії Росії, виклики для вантажних та пасажирських перевезень в умовах війни для логістичних процесів українських підприємств. Розглянуто стратегії які можуть зменшити вплив воєнного конфлікту, забезпечити неперервність постачання.

На перехід суспільства на нову техніко-економічну парадигму на тлі значної ролі транспорту впливає категорія часу. Проривні технологічні рішення у напрямку інтермодальності, високошвидкісні види транспорту, Maglev, високошвидкісні магістралі сприятимуть становленню нової інтегрованої транспортної системи світу. Тому економіка високих швидкостей стає прерогативою модернізації. Кардинальне збільшення внеску транспортних систем може бути досягнуто завдяки збільшенню пропускної здатності транспортних систем, інтермодальності, digital-технологіям, оптимізації, підвищенню швидкості. Процеси інтернаціоналізації транспортних систем відбиваються на формуванні принципово нової організації вантажопотоків.

Інтермодальні перевезення забезпечують скорочення часу доставлення. Точне планування, узгоджена робота учасників логістичного ланцюга та мінімізація перевантажень породжують транспортно-логістичні переваги.

Запропоновано математичну модель задачі маршрутизації інтермодальних перевезень у дискретному просторі. Задача формування оптимальних маршрутів може бути сформульована, як задача покриття спеціального графа ланцюгами заданої структури. Як критерій пропонується: мінімізація витрат мінімальна кількість транспортних засобів. Крім того, терміни доставлення не можуть перевищувати заданих значень. Наведена модель належить до класу NP-складних задач.

Ключові слова: транспортні системи, інтермодальні перевезення, високошвидкісний транспорт, задача маршрутизації.

Ohlikh V. V., Shapovalov A. V., Razghonov S. A., Lesnikova I. Yu. Management of intermodal and multimodal transportation systems

The transport system of economy in the context of globalization is an important component of innovation and technological development of the country and the world. In a single whole transport system security, economically, technologically and environmentally combines various functional components. This indicates the multidimensionality of the problems of transport

systems. The influence of Russian military aggression, challenges for freight and passenger transportation in the conditions of war for the logistics processes of Ukrainian enterprises is analyzed. The strategies that can reduce the impact of military conflict are considered to ensure the continuity of supply.

The transition of society to a new technical and economic paradigm on the background of a significant role is influenced by the time category. Breakthrough technological solutions in the direction of intermodality, high-speed modes of transport, MAGLV, high-speed highways will contribute to the formation of a new integrated transport system in the world. Therefore, the high-speed economy becomes the prerogative of modernization. A dramatic increase in the contribution of transport systems can be achieved by increasing the capacity of transport systems, intermodality, digital technologies, optimization, speed increasing. The processes of internationalization of transport systems are reflected in the formation of a fundamentally new organization of cargo flows.

Intermodal transportation provides reduction of delivery time. Accurate planning, coordinated work of participants in the logistics chain and minimization of overloads generate transport and logistics advantages.

The mathematical model of the problem of routing intermodal transportation in the discrete space is proposed. The task of forming optimal routes can be formulated as the problem of covering a special graph with chains of a given structure. As a criterion is offered: minimizing costs is a minimum amount of vehicles. In addition, delivery timing cannot exceed the specified values. The above model belongs to the class of NP-complex problems.

Key words: transport systems, intermodal transportation, high-speed transport, routing task.

Постановка проблеми. Напад росії на Україну у 2014 році та деякі доленосні події в Європі та світі змінили конфігурацію на карті світу, зокрема у чутливій транспортно-логістичній сфері. А повномасштабна агресія російської федерації у 2022 році поряд з фундаментальним питанням, щодо цінностей які поділяють або не поділяють країни поставила завдання перебудови майже всіх економічних відносин. І ці катаклізми прийшлися на момент змін технологічних парадигм, які сприяють промислового розвитку та інноваціям, зокрема у судинній системі економіки. Світ сьогодні зіштовхується з небаченими викликами: політичними; технологічними, економічними; фінансовими; безпековими. Доленосні події в Європі та світі змінили конфігурацію на карті світу, а прискорення у XXI ст. темпів глобалізації економіки та науково-технічного прогресу вступає у суперечність з низькими темпами розвитку й можливостями модернізації наявних технологій. Для економічного зростання країн опорним є інноваційно-технологічний розвиток, якому сприяють проривні технологічні рішення, тому момент змін технологічних парадигм, які сприяють промислового розвитку та інноваціям, зокрема у судинній системі економіки транспортній не можна пропустити.

До початку повномасштабної агресії, попри окупацію Криму та частини Донецько-Луганського регіону, наша країна мала достатньо різноманітну та орієнтовану на розвиток транспортну інфраструктуру, яка включала мережу залізничних, автомобільних доріг; річкових та морських портів. Вигідне географічне положення Україна було підґрунтям до створення повноцінного транзитного коридору для товарів між Європою та Азією. Не можна не враховувати те, що Україна є ваговитим експортером сільськогосподарської продукції. А втім, не можна не згадати про застарілу інфраструктуру та відсутність інвестицій.

В єдиний організм поєднує безпеково, економічно, технологічно та екологічно транспортна система базисні елементи з різних країн і різного функціонального призначення. Тобто мова йде про багатоаспектність проблем транспортних систем на тлі значної ролі транспорту в суспільно-економічному просторі країни.

А втім, перехід суспільства на шосту техніко-економічну парадигму формує систему нових економічних відносин. в якій провідну роль буде мати – час. Маємо казати про новий концепт, який слід покласти в фундамент прийняття рішень – економіка високих швидкостей. Тому саме, транспортні технології можуть визначити вектор модернізації технологічної структури економіки. Тому вже сьогодні, попри на повномасштабну агресію російської федерації необхідно закладати підґрунтя економічного зростання. Воно має бути побудовано на засадах об'єднаного впливу інноваційного, синергетичного, енергоефективного та комерційного складників розвитку в економіку країни.

Питання інтермодальності привертає особливу увагу в контексті розвитку міжнародної торгівлі, збільшення міжнародного вантажного транспорту внаслідок переселення підприємств та потреб імпортерів товарів внаслідок знищення значної кількості підприємств. Впровадження ІТ-рішень у транспортну галузь, яке є невіддільною частиною інтермодальності, сприяє розвитку вітчизняного ІТ-сектору та оптимізації державного управління логістикою.

Тому, дослідження орієнтовані на кардинальне збільшення внеску транспортних систем шляхом застосування інтермодальності, digital-технологій, оптимізації, підвищення швидкості та пропускної здатності транспортних систем є вкрай актуальні для економіки.

Розвиток транспортних систем у напрямку інтермодальності визначається:

- розгалуженням транспортних мереж,
- географічним розташуванням послуг вантажовідправників та вантажовідправників,
- забезпеченістю транспортними та логістичними інфраструктурними спорудами з їх наявністю та необхідними характеристиками доріг, залізниць, водних шляхів та аеропортів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Стратегічним завданням, як зазначено в Постанові Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550 «Про схвалення Національної транспортної стратегії

України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках» є розвиток саме інтермодальних перевезень [1].

А втім, попри свій значний потенціал, інтермодальні та мультимодальні перевезення займають незначну частину транспортного ринку, тому вкрай актуальним є зменшення розриву між потребами і реальністю [2-5].

Складна структура транспортної системи, пов'язує в єдиний технологічно та економічно зв'язаний організм базисні елементи різного функціонального призначення з різних країн. Значна частина досліджень сьогодні спрямовані на аналіз змін, які сталися з транспортною галузю після початку повномасштабної агресії росії проти нашої країни [6, 7].

Питання оптимізації та задачі маршрутизації транспортних засобів (Vehicle Routing Problem – VRP), які полягають у побудові найбільш ефективних з позицій витрат коштів, часу або відстані маршрутів для транспортування товарів між пунктами обслуговування, теж не залишаються поза увагою науковців. Значна увага приділяється не лише точним, а й евристичним та мета й евристичним методам для оптимізації логістики. Роботу [8] присвячено вибору алгоритмів для розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів з урахуванням різних факторів. Можливості використання штучного інтелекту в управлінні транспортною логістикою розглянуто в [9]. Акцент зроблено на впливі штучного інтелекту на ефективність і оптимізацію процесів управління транспортними ресурсами, маршрутизацією, системою управління дорожнім рухом. Застосування технологій машинного навчання для оптимізації логістичних процесів розглянуто в [10]. Автори здійснили докладний аналіз недоліків традиційних методів та обґрунтували застосування технології машинного навчання для підвищення гнучкості і швидкості логістики. Складність полягає у тому, що суто технічні рішення слід пов'язати з економічними реаліями, ускладненими високим рівнем невизначеності. Тому і сьогодні значний інтерес становлять роботи присвячені методам удосконалення транспортних систем [11], цифровим аспектам інформатизації автотранспортної сфери присвячено [12].

А втім, питання пов'язані з розв'язанням задач маршрутизації в яких поєднано декілька видів транспорту вимагає подальшої уваги науковці.

Зросли практичні потреби та безперечний науковий інтерес роблять дослідження перспективних транспортних систем, інтермодальності, digital-технологій, оптимізації актуальними як з теоретичного, так і практичного погляду.

Постановка завдання. Недостатні наукові напрацювання, бажання отримати ефективні алгоритми умовили вибір теми та мету дослідження. Мету визначено як розв'язання задач маршрутизації в умовах інтермодальних і мультимодальних перевезень.

Виклад основного матеріалу. Звертаємо увагу, що транспортні технології є одним із найбільш значущих факторів для розвитку технологічних парадигм та модернізації технологічної структури економіки. Тому вже сьогодні потрібно закладати підґрунтя економічного зростання. Зусилля мають бути спрямовані на впровадження об'єднаного впливу інноваційного, синергетичного, енергоефективного та комерційного складника розвитку в економіку країни, зокрема у транспортну та супутні сфери.

Питання змін роботи основних інститутів набуває нове забарвлення. Комітет із внутрішнього транспорту Європейської економічної комісії ООН (СЕК ООН) є головною міжнародною організацією, яка розробляє транспортну політику, та істотно впливає на міжнародний і вітчизняний транспортний сектор. Виник запит на формування наслідків та практичних рішень у відповідь на нові воєнні, геополітичні та геоekonomічні реалії в Європі. Для України важливо своєчасно закласти базис інтегрованої транспортної системи, вийти у відкритий європейський ринок транспортних послуг і ліквідувати бар'єри у сфері міжнародних перевезень. Таке долучення здійснюється шляхом приєднання до угод і конвенцій і їх інкорпорацією. Це, своєю чергою, передбачає імплементацію в національне законодавство стандартів, технологій і правил перевезень СЕК ООН у галузі транспорту.

Акцент з прискорення швидкості розвитку європейської інтеграції змістився на пошук відповідей на виклики у сфері міжнародної безпеки. І саме, транспортні системи тісно пов'язані з обома цими альтернативами.

Численні наслідки для країн у всьому світі вимагають не тільки нових політичних підходів і дій, а й технологічних рішень, здатних відповісти на ширший виклик. Перспективи й вплив мотивів сьогодні, однак, є недостатньо чіткими. Готовність, спроможність й успіх перебудови вирішальною мірою залежатимуть від поглиблення відносин та інтеграції в європейських країнах. І хоча, на перший погляд, транспортні системи безпосередньо не пов'язані із захистом безпеки, цілісності та суверенітету країн Європи, вони можуть бути локомотивом, бо не тільки просувають науковий прогрес, промислові інновації, а й ефективно розв'язують питання соціального та екологічного захисту, економічного добробуту.

Зрозуміло, що війна істотно впливає на економіку України, але вже зараз країна має готуватися до перезапуску ключових сфер економіки. І мова має йти не просто про відновлення, а про суттєві зміни в підходах до життя, роботи, бізнесу та відбудови інфраструктури.

Питання логістики стали проблемними для українських підприємств – традиційні ланцюги постачання розірвані, стандартні транспортні шляхи вибули, порти частково заблоковані. Додаємо зміни напряму перевезень, пріоритет гуманітарним та військовим постачанням, іноді спостерігається нестача пального, нестачу водіїв та транспортних засобів.

Маємо згадати про виклики для вантажних та пасажирських перевезень в умовах війни, бо воєнні конфлікти супроводжують (рис. 1):

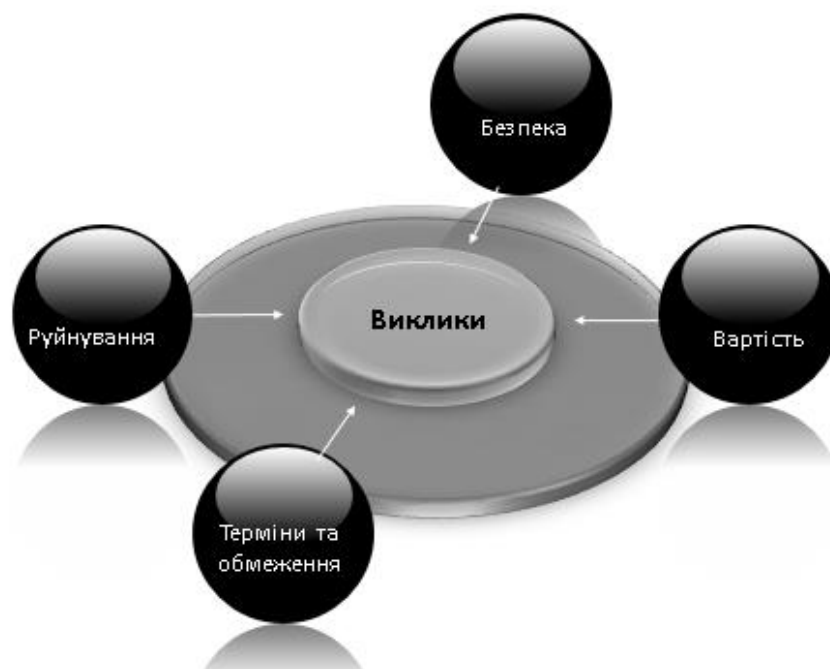


Рис. 1. Виклики для вантажних та пасажирських перевезень в умовах війни

Джерело: запропоновано авторами

- руйнування інфраструктури, пошкодження та знищення, мостів, залізничних шляхів та інших об'єктів, транспортних засобів необхідних для вантажних перевезень. Маємо зміни у транспортних маршрутах та обмеження у русі;
- збільшення термінів доставки та зменшення точності прогнозування часу, отримання вантажу;
- зростання вартості доставлення через мультимодальну схему: зміни маршрутів та видів транспорту;
- загрози безпеці персоналу, пасажирів, вантажу та транспорту: ризик атак ворога та нестабільність умов може ускладнити процес перевезень;
- зростання експлуатаційних витрат, зокрема на забезпечення безпеки, ремонт інфраструктури, оплату праці;
- не всі товари можуть бути перевезені, як наслідок значних логістичних змін;
- обмеження у русі та блокади регіонів, що ускладнює доступ до певних територій для здійснення вантажних та пасажирських перевезень.

Маємо ствердити, що стратегічним напрямом для економічного відновлення та інтеграції України до європейського транспортного простору вже сьогодні стає розвиток інтермодальних і мультимодальних перевезень. Це не лише, як традиційно вважається, сприяє зміцненню національної конкурентоспроможності, екологічній модернізації та стійкому розвитку транспортної інфраструктури. Інтермодальність впливає на економічну безпеку України.

Для забезпечення неперервності постачання і збереження економічної активності вкрай важливо розробити ефективні стратегії та зменшити вплив воєнного конфлікту на цей сектор. Вони передбачають, зокрема, диверсифікацію транспортних маршрутів вантажо- та пасажироперевезень, створення резервних запасів, використання альтернативних видів транспорту, співпрацю з владою та залучення військового супроводу, запровадження спільного менеджменту українських та європейських партнерів для вироблення зручних логістичних рішень та розв'язання технічно-організаційних проблем (рис. 2).

Наголошуємо, що глобальні економічні тенденції вже стукають у двері Європи та України, вже впливають на особливості та темпи розвитку національного транспортного комплексу. А втім, маємо акцентувати, що глобалізація економіки на тлі прискорення темпів науково-технічного прогресу вступає у суперечність з низькими темпами розвитку і можливостями модернізації наявних транспортних систем. Саме категорія часу виходить на перші шпальта і центральною ланкою стає економіка високих швидкостей.

На часі ефективне розв'язання проблеми кардинального збільшення швидкості та пропускну здатності транспортних систем за умов: малих енерговитрат; екологічності; мультимодальності та швидкості транспортних послуг; безпечності, доступності та якості перевезень.



Рис. 2. Стратегія забезпечення неперервності постачання та збереження економічної активності

Джерело: запропоновано авторами

Зрозуміло, що базовим є інноваційно-технологічний розвиток для економічного зростання країни. Лише проривні технологічні рішення сприятимуть впровадженню якісно інноваційного – п'ятого покоління транспорту, який має включати: високошвидкісні види транспорту (ВШМ); високошвидкісні магістралі (HSR), Maglev та Hyperloop; електромобілі, безпілотники та дрони; інтелектуальні транспортні технології; логістичні технології підсилені телекомунікаційними та інформаційними; принципово новий рухомий склад. Освоєння передових світових технологій, створення власних доробків сприяв перетворенню цих наукових напрацювань у розробок у власні транспортні проекти, які через кілька років, можуть досягти здобутків світового рівня.

Своєю чергою це сприятиме становленню нової інтегрованої транспортної системи світу, бо формування принципово нової організації вантажопотоків і їхньої обробки міцно пов'язано з процесами інтернаціоналізації транспортних систем.

Водночас маємо акцентувати, що оскільки ринок надшвидких транспортних систем наразі перебуває на ранній стадії розвитку, то йому не вистачає узгодженості, спільного розуміння й нормативів. Ці фактори істотно уповільнюють швидкість його розвитку, зокрема на європейському континенті, хоча сучасні технічні напрацювання вже апробовані. Саме тому, очікується, що створення консорціумів або асоціацій пришвидшить темпи створення інновацій, поєднання різних форм концентрації різних джерел інвестиційних ресурсів. Це поєднає створення інновацій, обмін знаннями між постачальниками та споживачами технологій, покращить співпрацю урядових установ і регуляторних органів в частині розроблення керівних принципів і правових рамок, дозволить врахувати інтереси усіх учасників перевізного процесу. Наразі, таке поглиблення та розширення співпраці у транспортній сфері, допоможе зробити європейську спільноту держав сильнішим.

Зміни традиційних логістичних маршрутів, зростання імпорту та довжини маршрутів та термінів перевезень ставить завдання пошуку шляхів зниження питомих витрат для посилення конкурентоздатності шляхом зменшення транспортної компоненти в ціні товару. Саме прагнення до виконання транспортування з найменшими витратами, у потрібний час, з необхідним логістичним сервісом та якістю є домінуючим фактор у ланцюжку.

Впровадження інтермодальних перевезень дозволяє зменшити витрати на транспортування вантажів завдяки оптимізації маршрутів, уніфікації транспортних одиниць (контейнерів) та цифровізації логістичних процесів, та поліпшити логістичний доступ до європейських та світових ринків через розвиток транспортних коридорів та ефективну взаємодію між видами транспорту. Транспортно-логістичні переваги інтермодальних перевезень забезпечують скорочення часу доставляння завдяки точному плануванню, узгодженій роботі учасників логістичного ланцюга та мінімізації перевантажень. Як бонус отримуємо зменшення навантаження на автомобільні дороги через переведення частини вантажів на інші види транспорту. Перехід на більш екологічні види транспорту (залізничний, водний) дозволяє зменшити викиди CO₂ та інші забруднення, це одночасно сприяє дотриманню стандартів ЄС щодо сталого розвитку та зеленої логістики.

Формування інтермодальних хабів є підґрунтям для нових економічних зон, сприяє приєднанню до мережі TEN-T та полегшує доступ до європейських інвестицій, сприяє розвитку інфраструктури, появи робочих місць мультимодальних (рис. 3).

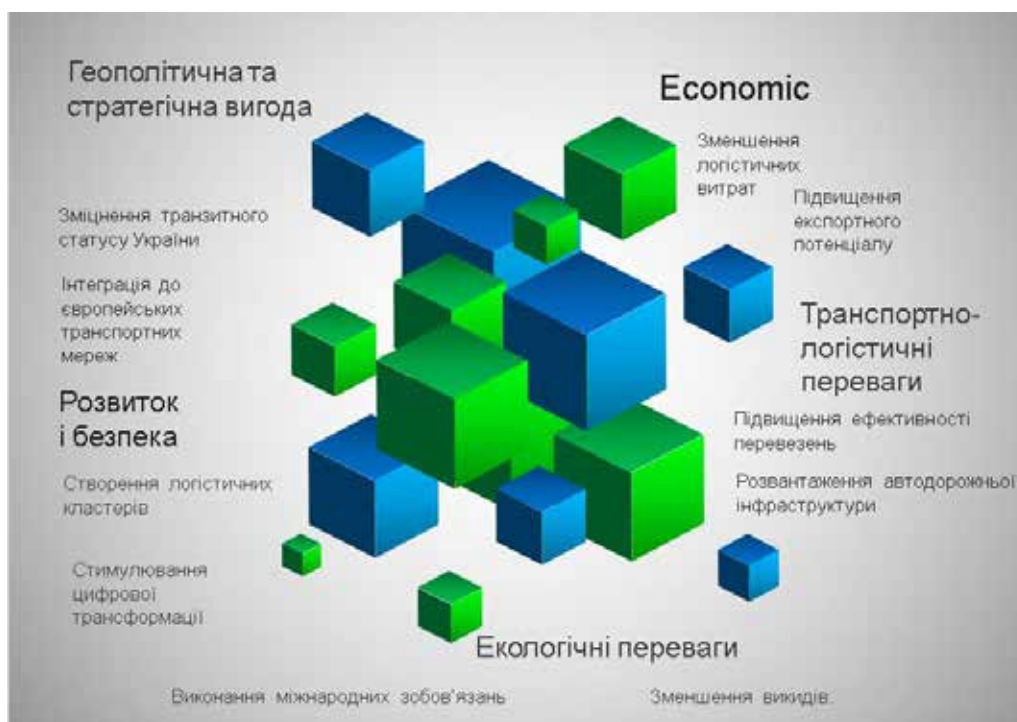


Рис. 3. Вигоди розвитку інтермодальних перевезень для України

Джерело: запропоновано авторами

Задача маршрутизації інтермодальних перевезень у дискретному просторі за наявних обмежень полягає у такому.

В транспортно-логістичній системі є множини:

$$X^0 = \{x^0_r\}, r=1, \dots, R; X^1 = \{x^1_p\}, p=1, \dots, P; X^2 = \{x^2_t\}, t=1, \dots, T; X^3 = \{x^3_s\}, s=1, \dots, S.$$

У перевезеннях залучені декілька типів транспортних засобів. Траєкторія при цьому складається з декількох складників (рис. 4):

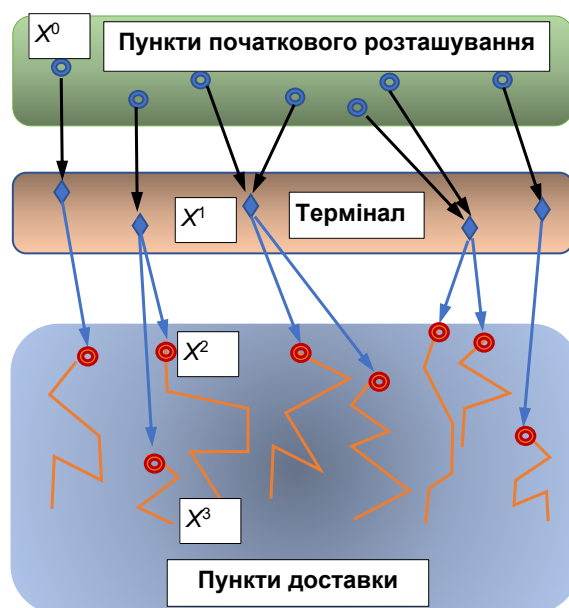


Рис. 4. Схема руху транспортних засобів

Джерело: запропоновано авторами

– рух транспортного засобу першого типу з пункту початкового розташування вантажу x^0 , $r=1, \dots, R$ до терміналу x^1 , $p=1, \dots, P$ – місця переходу на транспортний засіб другого типу;
 – рух транспортного засобу другого типу з пункту терміналу – місця формування принципово нової множини вантажопотоків x^1 , $p=1, \dots, P$ до x^2 , $t=1, \dots, T$ пунктів переходу на транспортний засіб третього типу;
 – ділянка об'їзду пунктів доставлення $X^3=\{x^3_s\}$, $t=1, \dots, S$ транспортним засобом третього типу. Впродовж руху транспортних засобів на ділянці об'їзду пунктів здійснюється доставка вантаж, що викликає стрибок у зміні динамічних параметрів руху.

Рух транспортних засобів потрібно організувати таким чином, щоб витрати були мінімальні, було залучено мінімальну кількість транспортних засобів і терміни доставлення не перевищували заданих значень. Обмеження на термін доставлення та вантажність обумовлюють застосування одного транспортного засобу.

Задача формування оптимальних маршрутів може бути сформульована, як задача покриття спеціального графа ланцюгами заданої структури.

Нехай орієнтований граф $G(X^0, X^1, X^2, X^3, U^0, U^1, U^2, U^3)$ – заданий множинами вершин

$$X^0=\{x^0_r\}, r=1, \dots, R; X^1=\{x^1_p\}, p=1, \dots, P; X^2=\{x^2_t\}, t=1, \dots, T; X^3=\{x^3_s\}, s=1, \dots, S$$

та множинами ребер

$$U^0=\{u^0_{rp}\}=\{x^0_r, x^1_p\}, U^1=\{u^1_{pt}\}=\{x^1_p, x^2_t\}, U^2=\{u^2_{ts}\}=\{x^2_t, x^3_s\}, \\ r=1, \dots, R; p=1, \dots, P; t=1, \dots, T; s=1, \dots, S.$$

Вершинам $X^2=\{x^2_t\}$, $t=1, \dots, T$, $X^3=\{x^3_s\}$, $s=1, \dots, S$ приписані ваги $\{f^2_t\}, \{f^3_s\}$,

Дугам графа G призначені ваги $\{w^0_{rp}\}, \{w^1_{pt}\}, \{w^2_{ts}\}$, $r=1, \dots, R; p=1, \dots, P; t=1, \dots, T; s=1, \dots, S$.

Зважений граф необхідно покрити ланцюгами

$$Q_{ij}^{lk} v, l=1, \dots, R; k=1, \dots, P; i=1, \dots, T, j=1, \dots, S,$$

таким чином, щоб перша вершина у кожному v -му ланцюгу, $v=1, \dots, VX$ належала множині X^0 , друга – множині X^1 , третя – множині X^2 , а інші – X^3 .

Вздовж кожного ланцюга задані функції витрат.

$$I_v^0(x, u, f) = w_{rp}^0 + w_{pt}^1 + \sum_{Q_{ij} v} w_{pt}^2$$

$$I_v^1(x, u, f) = f_t^2 + \sum_{Q_{ij} v} f_{pt}^3$$

Ланцюги моделюються кусочно гладкою траєкторією та мають задовольнити такі обмеження.

$$\sum_v I_v^1(x, u, f) = \sum_{t=1}^T f_t^2 + \sum_{s=1}^S f_s^3 = I1$$

$$I_v^1(x, u, f) \leq F_v$$

Покриття потрібно зробити таким чином, щоб

$$VX \rightarrow \min$$

$$\sum_v I_v^0(x, u, f) \rightarrow \min$$

Наведена модель належить до класу NP -складних задач і отримати точний розв'язок можна лише за невеликої кількості вершин у графі

$$G(X^0, X^1, X^2, X^3, U^0, U^1, U^2, U^3)$$

Перехід суспільства на нову техніко-економічну парадигму формує систему нових економічних відносин, центральною ланкою якої стає категорія часу. З'являється нова сутність – економіка високих швидкостей. Але прискорення темпів науково-технічного прогресу і глобалізації економіки у ХХІ ст. вступає у суперечність із низькими темпами розвитку та можливостями модернізації наявних транспортних систем. Необхідне ефективне розв'язання проблеми кардинального підвищення швидкості та пропускної здатності транспортних систем при малих витратах енергії.

Висновки. Зрозуміло, що відновлення країни лежить у царині інтеграції української економіки до економічної системи ЄС. Важливу роль у цьому мають зіграти різні європейські логістично-інфраструктурні проекти, зокрема, включення українських логістичних шляхів до європейських логістичних мереж, перехід залізниці на стандарт колії європейського формату, реконструювання наявних і відкриття нових

пунктів пропуску на кордонах з європейськими державами тощо. Це дозволить усунути бар'єри у сфері міжнародних перевезень, а реалізація концепції міжнародних транспортних коридорів, яка передбачає рівноправну участь усіх видів транспорту, передбачає організацією комбінованих перевезень із чіткою організаційно-технологічною взаємодією вдовж транспортних вузлів і магістралей.

А втім, допоки тривають бойові дії, Україна приймає та реалізує тактичні рішення, але вже сьогодні потрібно готувати і закладати підґрунтя для стратегічних перетворень.

Перехід від військових дій, існування під дронами та ракетами до нормального життя стане викликом і водночас шансом для переходу до новітніх технологій. Після завершення війни маємо не втратити нові можливості, зокрема стосовно транспорту, поряд з традиційними видами шоста техпарадигма бачить створення та запровадження принципово нового рухомого складу на основі нових технологій та їх умонтування до нової інтегрованої транспортної системи світу та відкритого ринку транспортних послуг.

Список використаних джерел:

1. Про схвалення Національної транспортної стратегії України на період до 2030 року та затвердження операційного плану заходів з її реалізації у 2025-2027 роках: Постанова Кабінету Міністрів України від 27 грудня 2024 р. № 1550. *Офіційний вісник України*. 2025. 29 січ. № 8, URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-%D0%BF#Text>
2. Special report: Intermodal freight transport EU still far from getting freight off the road: *European Court of Auditors*. 2023, № 08. URL: <https://surl.lu/pbgiku>
3. Рік війни: як конфлікт в Україні вплинув на транспортний сектор Європи? 2023, URL: <https://surl.cc/ztnffq>
4. European Commission. Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future. 2020. Brussels. European Commission. COM (2020) 789 final. URL: <https://surl.lt/udvvqt>
5. Відбудова України: принципи та політика: Центр досліджень економічної політики (CEPR). 2022. URL: https://cepr.org/system/files/2022-12/reconstruction%20book_Ukrainian_0.pdf
6. Белашов Є. Міжнародні транспортні проекти як стратегічний чинник розвитку залізничного транспорту. *Центр економічних і соціальних досліджень*. 2024. URL: <https://surl.li/rtembu>
7. Ларка Л. С. Цифрові аспекти підвищення результативності маркетингової діяльності підприємства у процесі відбудови економіки України. *Електронний журнал «Ефективна економіка»*. 2024. URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1060/940>
8. Мірзаєв Т. Р., Білобородько О. І. Методика вибору алгоритму для розв'язання задачі маршрутизації транспортних засобів. *Актуальні проблеми автоматизації та інформаційних технологій*. Том 28. 2024. С. 205-212. DOI: <http://dx.doi.org/10.15421/432419>
9. Головіна О. Сучасні технології в управлінні транспортною логістикою. *International Science Journal of Management, Economics & Finance*. 2(3). С. 35-42. 2023. DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20230203.04>
10. Чебанова О. П., Волохов В. А. Використання технологій машинного навчання для оптимізації логістики. *Вісник економіки транспорту і промисловості*. № 83. 2023. С. 278-283. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2023_83_33
11. Ogli V, Shapovalov A. Innovative development of the transport automobile system of Ukraine: problems and prospects. Monograph 28. Katowice. Katowice: *Katowice School of Technology*. Poland. 2019. P. 193-200. URL: www.wst.com.pl
12. Ogli V, Shapovalov A. Digital transformation in the transport industry: a test and new horizons for business. Monograph 42. Katowice. Katowice: *Publishing House of Katowice School of Technology*. Poland. 2020. P. 286-298. URL: www.wst.com.pl

References:

1. Kabinet Ministriv Ukrainy (2025). Postanova № 1550 «Pro skhvalennia Natsionalnoi transportnoi stratehii Ukrainy na period do 2030 roku ta zatverdzhennia operatsiinoho planu zakhodiv z yii realizatsii u 2025-2027 rokakh». <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1550-2024-n#Text>
2. European Court of Auditors. (2023). Special report: Intermodal freight transport EU still far from getting freight off the road. № 08. URL: https://www.eca.europa.eu/Lists/ECADocuments/SR-2023-08/SR-2023-08_EN.pdf
3. Rik viiny: yak konflikt v Ukraini vplynuv na transportnyi sektor Yevropy? (2023) URL: <https://surl.li/dwmioj>
4. European Commission. (2020). *Sustainable and Smart Mobility Strategy – putting European transport on track for the future*. Brussels. European Commission. COM (2020) 789 final. URL: <https://surl.li/oxynpg>
5. Tsentri doslidzhen ekonomichnoi polityky (CEPR). (2022). *Vidbudova Ukrainy: pryntsyipy ta polityka*. URL: https://cepr.org/system/files/2022-12/reconstruction%20book_Ukrainian_0.pdf
6. Bielashov Ye. (2024). Mizhnarodni transportni proekty yak stratehichniy chynnyk rozvytku zaliznychnoho transportu. *Tsentri ekonomichnykh i sotsialnykh doslidzhen*. URL: <https://surl.li/wacatl>

-
7. Larka L. S. (2024). *Tsyfrovi aspekty pidvyshchennia rezultatyvnosti marketynhovoï diïalnosti pidpriemstva u protsesi vidbudovy ekonomiky Ukrainy*. Elektronnyi zhurnal «Efektyvna ekonomika». URL: <https://academy-vision.org/index.php/av/article/view/1060/940>.
 8. Mirzaiev T. R., Biloborodko O. I. (2024). *Metodyka vyboru alhorytmu dlia rozviazannia zadachi marshrutyzatsii transportnykh zasobiv*. Aktualni problemy avtomatyzatsii ta informatsiinykh tekhnolohii. Tom 28. DOI: <http://dx.doi.org/10.15421/432419>.
 9. Holovina O. (2023). *Suchasni tekhnolohii v upravlinni transportnoi lohistykoiu*. International Science Journal of Management, Economics & Finance. 2(3). DOI: <https://doi.org/10.46299/j.isjmef.20230203.04>.
 10. Chebanova, O. P., Volokhov V. A. (2023). *Vykorystannia tekhnolohii mashynnoho navchannia dlia optymizatsii lohistyky*. Visnyk ekonomiky transportu i promyslovosti. № 83. URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/Vetp_2023_83_33.
 11. Oglih, V., Shapovalov, A. (2019). *Innovative development of the transport automobile system of Ukraine: problems and prospects*. Monograph 28. Katowice. Katowice: Katowice School of Technology. Poland. URL: www.wst.com.pl.
 12. Oglih, V., Shapovalov, A. (2020). *Digital transformation in the transport industry: a test and new horizons for business*. Monograph 42. Katowice. Katowice: Publishing House of Katowice School of Technology. Poland. URL: www.wst.com.pl.

Халіпова Н. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-5605-6781

Кузьменко А. І., кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-7278-3647

Черчата А. О., кандидат економічних наук, доцент, завідувач кафедри економіки, менеджменту та підприємництва,
Українського державного університету науки і технологій «Придніпровська державна академія будівництва та архітектури»
ORCID: 0000-0002-6753-2891

Гаврилюк В. В., магістр з транспортних технологій
(на автомобільному транспорті)
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0003-9149-1254

ЛОГІСТИЧНЕ УПРАВЛІННЯ ФОРМУВАННЯМ ПАРАМЕТРІВ МАРШРУТІВ МІЖНАРОДНИХ ПАСАЖИРСЬКИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ

Стаття присвячена актуальній проблемі формування ефективного транспортно-логістичного забезпечення при організації міжнародних пасажирських перевезень. Запропонована економіко-математична модель логістичного управління при формуванні міжнародних туристичних маршрутів за напрямом Україна-Європа. Модель асоціюється із задачею комівояжера, який має по замкненому маршруту з мінімальними сумарними витратами об'їхати всі задані пункти, відвідуючи кожен один раз і повертаючись в вихідний пункт.

Метою дослідження є розробка ефективних процесів міжнародних автобусних перевезень за напрямом Україна-Європа.

Для досягнення мети вирішено такі завдання: проаналізовано основні тенденції розвитку міжнародних пасажирських перевезень в Україні; розроблено багатоступінчастий алгоритм для вирішення завдання формування транспортно-логістичної схеми міжнародного перевезення за напрямом Україна-Європа; запропоновано математичну модель логістичного управління при формуванні міжнародних туристичних маршрутів за напрямом Україна-Європа; проведено економіко-математичне моделювання на прикладі формування оптимального туристичного маршруту по містах Польщі та проаналізувати результати розв'язку.

Основна увага приділена проблемі вибору найбільш ефективних схем туристичних подорожей. Це набуває особливого важливого значення на сучасному етапі через активний розвиток міжнародних зв'язків і світової туристичної індустрії. Проаналізовано фактори, що впливають на вибір пунктів і часу перебування в містах, вплив привабливості об'єкту подорожі на доцільну тривалість відвідування культурно-історичних місць. На прикладі семи найбільш популярних міст Польщі здійснено моделювання та визначено оптимальний маршрут.

Запропонований підхід має сприяти збільшенню кількості поїздок за актуальними маршрутами, більш ефективному використанню парку автобусів автотранспортного підприємства та більш зручному та якісному обслуговуванню пасажирів (за часом, пересадками та ін). В цілому сприятиме зростанню прибутковості діяльності підприємства-перевізника, а також допоможе врахувати потреби споживачів (пасажирів) транспортних послуг.

Ключові слова: міжнародні пасажирські перевезення, автобусні маршрути, логістичне управління, оптимізація туристичного маршруту, транспортно-логістична схема.

Khalipova N. V., Kuzmenko A. I., Cherchata A. O., Havryliuk V. V. Logistics management of international passenger transportation routes parameters forming

The article addresses the urgent issue of forming effective transport and logistics support in organizing international passenger transportation. An economic and mathematical model of logistics management in the development of international tourist routes between Ukraine and Europe is proposed. The model is associated with the traveling salesman problem, where all designated points must be visited exactly once in a closed loop with minimum total cost, returning to the starting point.

The purpose of the study is to develop efficient processes for international bus transportation in the Ukraine–Europe direction.

To achieve this goal, the following tasks were accomplished: the main trends in the development of international passenger transportation in Ukraine were analyzed; an algorithm for forming a transport and logistics scheme for international transportation in the Ukraine–Europe direction was developed; a mathematical model of logistics management was proposed; and economic and mathematical modeling was conducted to determine the optimal tourist route through cities in Poland and analyze the results.

Based on the analysis of current trends in international bus transportation and the factors influencing increased demand, an algorithm for building a transport and logistics scheme in the Ukraine–Europe direction was developed. This scheme takes into account both preliminary and operational forecasts of passenger flows, as well as the results of modeling queueing systems during formal border-crossing procedures for buses (via green and red corridors), and the real conditions with queues and service channels at international checkpoints.

The main focus is on choosing the most efficient tourist travel routes. This issue is particularly relevant today due to the rapid development of international relations and the global tourism industry. Factors influencing the selection of destinations, time spent in cities, and the impact of a location's attractiveness on the optimal duration of cultural and historical site visits were analyzed.

Using the example of seven of the most popular cities in Poland, modeling was carried out and the optimal route was determined. As a result, the route Lviv–Krakow–Oswiecim–Wroclaw–Poznan–Gdansk–Warsaw–Lviv was found to have the shortest total length by road – 1788 km.

The proposed approach should contribute to an increase in the number of trips along popular routes, more efficient use of the bus fleet of transport enterprises, and improved convenience and service quality for passengers (in terms of time, transfers, etc.). Overall, it will help increase the profitability of transport companies and better meet the needs of transport service consumers.

Key words: international passenger transportation, bus routes, logistics management, tourist route optimization, transport and logistics scheme.

Постановка проблеми. Розвиток міжнародного співробітництва України з країнами Європи відображається в таких сферах, як туризм, ділові, культурні, спортивні, науково-технічні та інші види міжнародних зв'язків [1].

Аналіз пасажирських маршрутних систем міжнародного сполучення свідчить про те, що ефективне функціонування транспорту в сучасних умовах визначає не тільки економічний розвиток країни, але й задоволення нагальних потреб мільйонів людей і сприяє розвитку міжнародного співробітництва та зв'язків [2].

Повномасштабна війна змінила ринок автобусних перевезень в Україні та створила більший попит на ньому насамперед через припинення авіасполучення. До прикладу, у 2023 році кількість автобусних пасажирів на BlaBlaCar в Україні зросла на 86% порівняно з 2022 роком. А загалом за останні 2,5 роки український автобусний ринок виріс щонайменше втричі в грошовому еквіваленті – до близько 7 млрд грн.

На збільшення попиту впливають й інші фактори [3]:

- фактор безпеки, адже люди продовжують виїжджати з прифронтових міст і сіл;
- доступність, бо автобуси мають ширший та гнучкіший перелік напрямків і маршрутів, ніж інші способи сполучень.

Проте, попри турбулентний період, незмінним і дуже важливим фактором впливу на ринок автобусних перевезень залишається сезонність. Адже пасажиропотік у високий сезон може перевищувати показники низького чи середнього більш ніж удвічі [3].

Актуальність обраної тематики полягає у формуванні ефективного транспортно-логістичного забезпечення при організації міжнародних автобусних перевезень за напрямом Україна–Європа.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Автомобільний пасажирський транспорт є складовою частиною єдиної транспортної системи країни. Її успішне функціонування здебільшого залежить від координації роботи з іншими видами транспорту.

Для сучасної України значення автомобільного пасажирського транспорту неоціненне, оскільки саме він з'єднує різні регіони у єдину країну, а Україну – з іншими країнами Європи та іншими частинами світу. В цьому сенсі транспорт є одним з визначальних державно утворюючих факторів і входження України в Європейський простір [2].

Проблеми організації та управління процесом автомобільних пасажирських перевезень розглянуті в роботах В. К. Долі [4] М.Г. Босняка [5] та інших вчених.

Аналіз транспортних процесів в контексті європейської інтеграції України є актуальним і потребує глибокого і всебічного дослідження.

Критичний аналіз організації міжнародних автомобільних пасажирських перевезень представлено в [2]. Авторами праці представлено результати дослідження системи міжнародних пасажирських перевезень та запропоновано шляхи вдосконалення і покращання транспортного обслуговування населення на міжнародних автобусних маршрутах.

Обґрунтуванню заходів з підвищення ефективності виконання пасажирських перевезень у міжнародному сполученні при змінному попиті на перевезення шляхом проектування вдосконалих автобусних маршрутів присвячено працю [6]. Автором запропоновані удосконалення маршрутної системи міжнародних пасажирських перевезень сполученням Україна – Польща.

Розгляду питань дослідження та вдосконалення існуючої організації пасажирських перевезень на міжнародному маршруті Тернопіль – Прага присвячено працю [7]. В роботі запропоновано заходи по підвищенні якості та конкурентоспроможності міжнародного маршруту, розглянуто та встановлено перспективні сучасні транспортні технології, аналітичним шляхом досліджено економічні та екологічні показники. дослідження маршруту Тернопіль – Прага Автором встановлено, що рівень пасажиропотоку можна збільшити шляхом підвищення якості наданих послуг. Шляхом проведення економічного аналізу перевезень визначено конкурентно спроможний тариф та період окупності даного маршруту.

Науковцями Кость І. П., Будник С. І., Нікіпчук С. В., Костюченко Л. М. досліджувалися питання організації внутрішніх та міжнародних перевезень пасажирів автомобільним транспортом [8, 9].

Робота науковців Дмитрієва І. А., Іванілова О.С., Шевченко І.Ю., Кирчата І. М. [10] присвячена питанням економіки підприємств автомобільного транспорту. Вплив техніко-експлуатаційних показників роботи автотранспорту на ефективність логістичної системи розглядаються в [11] Горяїновим О. М.

Під час російсько-української війни надзвичайно актуальним завданням є пошук коштів для фінансування Сил оборони та забезпечення наших захисників заради наближення перемоги та якнайшвидшого звільнення окупованих рф територій [12]. Одним з джерел наповнення українського бюджету є виведення з «тіні» пасажирських автобусних перевезень. Це не тільки наповнить казну, а й запровадить правила роботи, за якими працює транспортна система Євросоюзу. За даними експертів, найменш «тінізований» ринок міжнародних перевезень. Це зрозуміло, бо при перетинанні державного кордону перевізник у будь-якому випадку має дотримуватися законодавства ЄС у сфері перевезень (питання відпочинку водія, кількості місць, технічного стану транспортного засобу).

За час запуску «Черги з серпня 2023 року до лютого 2024 р. кордон за електронним записом перетнуло понад 40 тисяч автобусів та 725 тисяч вантажівок.

Зважаючи на зростання попиту на міжнародні автобусні перевезення та реформи, які мають на меті поліпшити цей напрямок, перевізникам варто задуматися над тим, як залучати ще більше клієнтів та робити їх постійними. Це можна досягнути завдяки таким підходам та інструментам:

1) Онлайн-бронювання квитків. Завдяки зручним системам бронювання на сайті клієнти можуть легко порівнювати ціни на квитки, вибирати потрібні маршрути та робити оплату. Це дозволить збільшити лояльність аудиторії.

2) Співпраця з іншими підприємствами. Укладання партнерських угод з готелями, туристичними агентствами чи іншими суміжними компаніями допоможе перевізникам привернути увагу нових клієнтів спільними спец пропозиціями.

3) Програми лояльності. Надання знижок для постійних клієнтів або акційні пропозиції для нових допоможуть заохочувати аудиторію до повторних покупок.

4) Використання маркетингових інструментів. Наприклад, таргетовані SMS-розсилки на потенційну аудиторію дають змогу майбутнім клієнтам дізнатися про вашу компанію та знижки.

Напрямок міжнародних пасажирських перевезень витримав низку викликів, втім, це дало поштовх й до нових перспектив, адже кожен побачив свої зони росту. Отже, попри складнощі, цей сектор продовжує адаптуватися та розвиватися, використовуючи нові можливості [13].

Актуальність обраної тематики полягає у формуванні ефективного транспортно-логістичного забезпечення при організації міжнародних пасажирських перевезень.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка ефективних процесів міжнародних автобусних перевезень за напрямом Україна-Європа.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- проаналізувати основні тенденції розвитку міжнародних пасажирських перевезень в Україні;
- розробити багатоетапний алгоритм для вирішення завдання формування транспортно-логістичної схеми міжнародного перевезення за напрямом Україна-Європа;
- запропонувати математичну модель логістичного управління при формуванні міжнародних туристичних маршрутів за напрямом Україна-Європа;
- провести економіко-математичне моделювання на прикладі формування оптимального туристичного маршруту по містам Польщі та проаналізувати результати розв’язку.

Виклад основного матеріалу. *Аналіз основних тенденцій розвитку міжнародних пасажирських перевезень в Україні.* Транспортний комплекс є важливою складовою у структурі економіки України.

Ефективне функціонування державної транспортної системи та включення її у європейську й світову транспортні мережі сприяють вирішенню найважливіших завдань сьогодення та дозволяє збільшити обсяги міжнародних перевезень. Оптимальні управлінські рішення та постійний контроль мають забезпечити ефективність функціонування підприємств транспортної галузі, які займаються міжнародними пасажирськими перевезеннями. Міжнародні пасажирські перевезення можна характеризувати такими показниками, як матеріальні, трудові, фінансові. Станом на 2019 рік в Україні нараховувалося приблизно 240 автотранспортних підприємств, що обслуговували ринок міжнародних пасажирських перевезень. Маршрутна мережа з'єднувала нашу державу із 23 іноземними країнами, де на той час функціонувала понад 400 регулярних маршрутів, що обслуговувалися понад 1,5 тисячами транспортних засобів [6].

Як показує аналіз [2], пріоритетними на той час залишилися зв'язки України з російською федерацією та країнами СНД (28,2%). Друге місце за інтенсивністю займали країни Європи і Близького Сходу, відповідно 22,1%. Це пояснювалося скрутним економічним станом населення, становленням ринкових відносин, що призвело до появи шоп-туризму. Прогнозні розрахунки, втім показували, що в найближчі 10 років важливим напрямком у розвитку пасажирських перевезень буде Центральна Європа, адже обсяг перевезень у 2019 році в цьому регіоні вже сягав 14%.

Розподіл перевезень за видами транспорту в Україні свідчив, що на автомобільний транспорт припадає понад 85% обсягів пасажирських перевезень. В Україні кількість маршрутів за попередні 10 років зросла більше ніж у 10 разів, а обсяги перевезень пасажирів збільшилися з 0,5 млн до 6,0 млн пас. на рік. Маршрутна система регулярного автобусного сполучення у 2018 р. складалася з 190 маршрутів і забезпечувала стабільний зв'язок з 15 країнами Європи, не враховуючи країн СНД. Це такі країни, як Польща, Словаччина, Румунія, Угорщина, Чехія, Болгарія, Німеччина, Австрія, Туреччина, Великобританія, Латвія, Естонія, Греція, Франція тощо. Найбільш розвинена маршрутна система створена з Республікою Польща, Словаччиною, Угорщиною, Румунією, Чехією та Німеччиною. У 2018 р. на регулярних автобусних маршрутах виконувалося 384 рейси. Наприклад, між Україною і Польщею щоденно 20 українськими та 26 іноземними перевізниками здійснювалося 138 рейсів на 67 автобусних маршрутах [2].

Пандемія Covid-19 та далі повномасштабна війна, активна фаза якої розпочалася у лютому 2022 року, змінила ринок автобусних перевезень в Україні та створила більший попит на ньому насамперед через припинення авіасполучення. Для України постали виклики насамперед у області транспортної логістики. Вплив пандемії мав свій прояв у скороченні пасажиропотоку через кордон внаслідок запровадження обмежень у функціонуванні пунктів пропуску з метою дотримання карантинних заходів. Війна ж актуалізувала питання підвищення пропускної спроможності пунктів пропуску на західному кордоні, оскільки в перші місяці війни значно збільшився пасажиропотік у напрямі «виїзду» з України [14].

За останні 2,5 роки український автобусний ринок виріс щонайменше втричі в грошовому еквіваленті – до близько 7 млрд грн.

На збільшення попиту впливають й інші фактори як безпека та доступність. Фактор безпеки пов'язаний з тим, що люди продовжують виїжджати з прифронтових міст і сіл. Доступність досягається завдяки ширшому та гнучкішому переліку напрямків і маршрутів автобусів порівняно із іншими способами сполучення. Втім, не зважаючи на турбулентність сучасного періоду, такий фактор як сезонність залишається незмінним і важливим за впливом на ринок автобусних перевезень. Так, пасажиропотік у високий сезон може перевищувати показники низького чи середнього більш ніж удвічі [3].

Можна визначити три рівня сезонності на автобусному ринку: високий, середній та низький [3].

Високим сезоном – період літніх відпусток, шкільних канікул, державні та інші свята, такі як Різдво, Великдень, День Незалежності, тощо. Пік припадає на червень-серпень та грудень-січень. Низьким сезоном є період з другої половини січня до кінця лютого та з другої декади вересня до середини жовтня. Змінюється і динаміка пасажиропотоку. Залежно від року, різниця між пасажиропотоком у серпні та в лютому може бути у 2 чи навіть 2,5 рази.

Фактори впливу на зміни пасажиропотоків є такі:

– Сезонність притаманна всім видам транспорту, і автобуси не є винятком, та варіюється залежно від напрямку.

– З початком повномасштабної війни автобуси стали одним із основних видів транспорту для міжнародних перевезень. Автобуси забезпечують можливість прямого сполучення з містами за кордоном. Автобусні перевезення стали також незамінною частиною мультимодальних перевезень, наприклад, включаються до складних маршрутів, що включають рейси до найближчих авіахабів. Статистика показує, що з початку повномасштабного вторгнення кількість міжнародних автобусних поїздок з України збільшилася втричі.

– Перехід на григоріанський календар, що наразі є актуальним для України, також вплинув на ринок. До цього переходу формувалося два окремі великі пасажиропотоки – з тих, хто святкує Різдво 25 грудня, і тих, хто 7 січня. Наразі ці пасажиропотоки об'єдналися в один великий пасажиропотік.

З початку повномасштабної війни значно скоротилися такі пікові пасажиропотоки: студенти, які навчалися за кордоном; трудові мігранти, які масово вирушали на сезонні роботи. На це вплинули й неможливість виїзду за кордон чоловіків призовного віку, і часткове або повне обмеження міграції українців, які отримали прихисток в інших країнах.

Люди почали по-іншому планувати поїздки. Якщо раніше інтервал між придбанням квитка та датою відправлення міг бути від 7 до 9 днів, то зараз більшість купує квитки в день відправлення або ж за 3 дні до нього.

Одним із ключових інструментів підлаштовуватись під сезонні коливання та передбачати їх є аналітика. Вона допомагає виявити сезонні тенденції та передбачити пікові періоди. Спираючись на ці дані, автобусні перевізники можуть працювати над регулярністю маршрутної мережі: менш популярні в певному сезоні напрямки скорочувати, а для топових – готувати максимально місткий або додатковий транспорт.

Пасажиропотік також можна підтримувати різноманітними маркетинговими кампаніями, наприклад у партнерстві з онлайн дистриб'юторами. Впровадити дисконтну політику, яка ґрунтуватиметься, з одного боку, на регулярному наданні знижок користувачам, а з іншого – на підтримці партнерів-перевізників у період низького попиту.

Підлаштовуватись під сезонні коливання часом непросто, враховуючи стан справ, проте стратегічне планування, гнучкість та постійний аналіз ринку допоможуть втриматися на плаву.

За даними Мінінфраструктури у 2023 році в Україні Міністерство розвитку громад, територій та інфраструктури відкрило 400 нових міжнародних маршрутів для автобусних перевізників [15].

За результатами дослідження, проведеного в 2023 р. близько 37% українців подорожують за кордон з метою туризму, 28% – щоб побачитися з рідними, 18% – для зустрічей із друзями, 17% опитаних – робочі поїздки (рис. 1) [16].

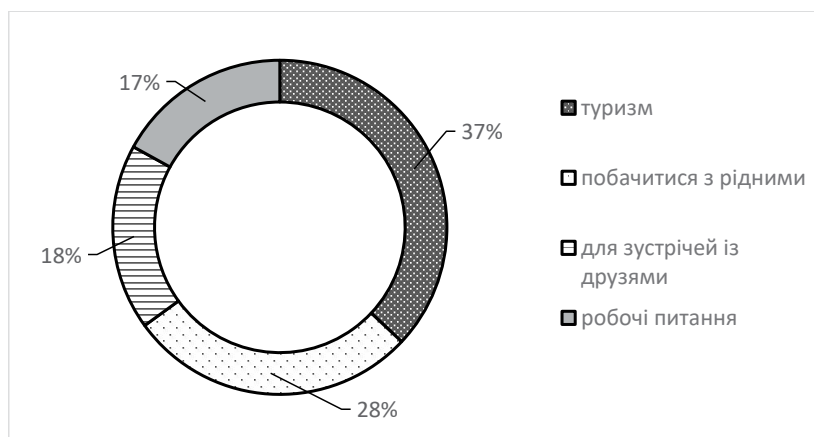


Рис. 1. Структура міжнародного пасажиропотоку в 2023 р. за метою поїздки [16]

Формування транспортно-логістичної схеми міжнародного перевезення за напрямом Україна–Європа. В дослідженні пропонується на основі актуальних прогностичних даних та наявної оперативної інформації щодо напрямків переміщення пасажиропотоків виробляти рішення та формувати ефективну транспортно-логістичну схему перевезення, використовуючи наявний парк та базу автобусного підприємства як своєрідний «хаб».

Для збільшення кількості міжнародних рейсів та наповненості транспортних засобів, маршрут поділяється на дві складові:

1. Внутрішній автобусний маршрут автобусом великої місткості, що включає великі міста України, південно-східної, центральної та північної частини України (Запоріжжя, Дніпро, Київ, Житомир, Рівне, Львів);

2. Друга частина маршруту формується залежно від кількості пасажирів за певним міжнародним напрямком та цілей подорожі (трудова міграція, туристична поїздка або ж відвідування близьких та друзів за кордоном). Ця частина планується на основі оперативної інформації та включає вибір рухомого складу (з наявного на автотранспортному підприємстві) та пункту пропуску для перетину кордону з використанням єЧерги.

При формуванні транспортно-логістичної схеми враховуються попередні та оперативні прогностичні дані про пасажиропотоки, а також результати моделювання системи масового обслуговування при проходженні формальних процедур при перетині кордону автобусами (за зеленим та червоним коридором) та реальної ситуації з чергами та каналами обслуговування в Міжнародному пункті пропуску.

Такий підхід має сприяти збільшенню кількості поїздок за актуальними маршрутами, більш ефективному використанню парку автобусів автотранспортного підприємства та більш зручному та якісному обслуговуванню пасажирів (за часом, пересадками та ін). Такий підхід сприятиме зростанню прибутковості в діяльності підприємства-перевізника, а також допоможе врахувати потреби споживачів (пасажирів) транспортних послуг. Послідовність вирішення завдання така (рис. 2):

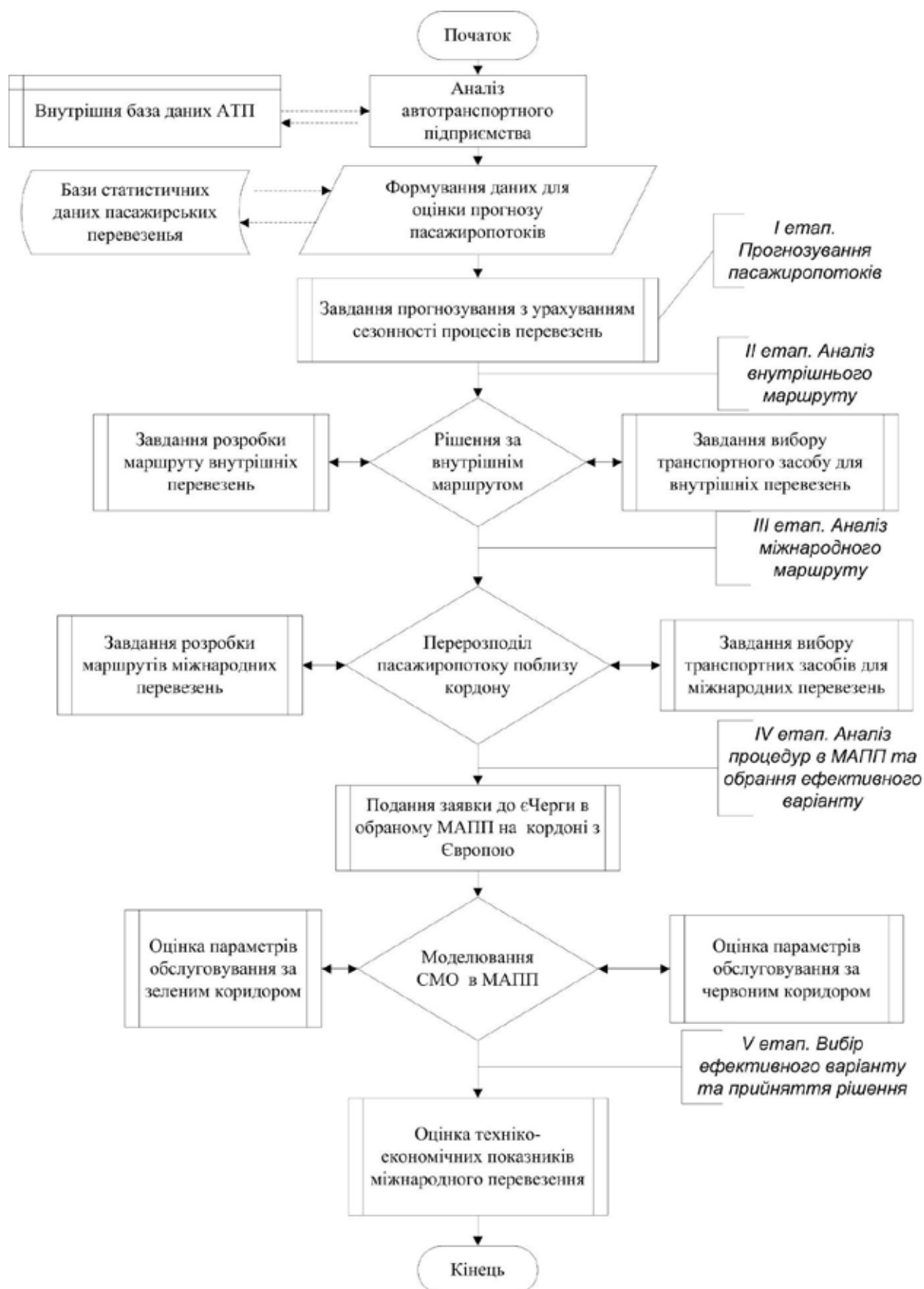


Рис. 2. Багатоетапний алгоритм вирішення завдання формування транспортно-логістичної схеми міжнародного перевезення за напрямом Україна–Європа

1. Аналіз автотранспортного підприємства
2. Отримання інформації про пасажиропотоки та формування прогнозу з урахуванням сезонності процесів перевезень.
3. Формування внутрішнього маршруту та оперативний аналіз напрямків поїздки пасажирів.
4. Перерозподіл пасажиропотоку поблизу кордону в залежності від наявної ситуації.
5. Обрання автомобільного пункту пропуску для перетину кордону та заявка для постановки в єЧергу.
6. Оцінка ефективності проведення митних процедур при перетині кордону на основі моделювання системи масового обслуговування.
7. Оцінка показників маршрутів міжнародного перевезення за напрямом України – Європа.

Побудова математичної моделі логістичного управління при формуванні міжнародних туристичних маршрутів за напрямом Україна–Європа. Проблема вибору найбільш ефективних схем туристичних подорожей здобуває особливо важливе значення на сучасному етапі в зв'язку з активним розвитком міжнародних зв'язків і світової туристичної індустрії. Ефективність роботи туристичної компанії на ринку в значній мірі буде залежати від того, наскільки правильно обрані пункти подорожі, вдало підібраний час зупинки в кожному місті та від загальної тривалості подорожі.

Одним з найбільш важливих питань є відображення факторів, що впливають на вибір пунктів і часу перебування в містах (базових, проміжних, кінцевих), вплив привабливості об'єкту подорожі на доцільну тривалість відвідування культурно-історичних місць. В якості критеріального показника використовується інтенсивність прибутку, що представляє собою відношення прибутку до часу його одержання, що органічно сполучає фінансовий і часовий фактори.

Визначення найкращої схеми подорожі (вибір загальної кількості пунктів заїзду і конкретних міст, послідовності заїзду в ці міста, тривалості знаходження у кожному із них) за складним критерієм і з урахуванням множини впливових факторів можливо тільки за допомогою відповідної економіко-математичної моделі.

По своїй геометричній побудові схеми окремих маршрутів руху автобусів на туристичному маршруті можуть бути класифіковані [17] на радіально-замкнені, кругові і ламано-замкнені.

Для складання маршрутів автобусних подорожей сформуємо економіко-математичну модель на основі задачі комівояжера [18]. Для автобусних туристичних маршрутів найбільш прийнятні кругова і ламано-замкнені схеми руху. У цьому випадку автобус відвідує один раз всі пункти маршруту. Це асоціюється з відомою в дослідженні операцій задачею комівояжера, який повинний по замкнутому маршруту з мінімальними сумарними витратами об'їхати всі задані пункти, відвідуючи кожен один раз і повертаючись в вихідний пункт [19].

Економіко-математична модель задачі комівояжера має вид:

$$z = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij} \rightarrow \min_{\{x_{ij}\}} \quad (1)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ij} = 1, j = \overline{1, m} \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = 1, i = \overline{1, m} \quad (3)$$

$$u_i - u_j + m x_{ij} \leq m - 1, i, j = \overline{1, m}, \quad (4)$$

$$de x_{ij} = \begin{cases} 1, \text{ якщо маршрут прокладений з пункту } i \text{ в пункт } j, \\ 0 \text{ в протилежному випадку} \end{cases} i, j = \overline{1, m}, \quad (5)$$

де $u_i, u_j, i, j = \overline{1, m}$ – дійсні числа, значення яких визначаються в процесі рішення задачі;

m – загальна кількість заданих пунктів маршруту;

c_{ij} – витрати на переїзд із пункту i у пункт $j, i, j = \overline{1, m}$.

Цільова функція мінімізації (1) виражає сумарні витрати на проходження маршруту, обмеження (2) забезпечує, що в кожен пункт j маршрут входить рівно один раз, обмеження (3) забезпечує, що з кожного пункту i маршрут виходить рівно один раз, обмеження (4) забезпечує замкненість маршруту, відсутність у ньому окремих незв'язаних підциклів (прості обмеження $x_{ij} \cdot x_{ji} = 0, i, j = \overline{1, m}$, забезпечували б тільки відсутність зустрічних поїздок назад, але вже при шести пунктах можливими стали б, скажімо, два незв'язаних кільця по три пункти в кожному).

Застосування економіко-математичної моделі для формування оптимальних маршрутів автобусних подорожей. Польща є частиною світового туристичного ринку з постійно зростаючою кількістю відвідувачів. Туризм у Польщі сприяє загальній економіці країни. Найпопулярнішими містами є Краків, Варшава, Вроцлав, Гданськ, Познань, Щецин, Люблін, Торунь, Закопане, Соляна шахта в Величці та історична

пам'ятка Аушвіц – Німецький нацистський концтабір в Освенцимі. Кращі місця відпочинку включають Мазурське поозер'я, узбережжя Балтійського моря, Татри (найвищий гірський масив Карпат), Судети і Біловезька пуша. Основні туристичні пропозиції Польщі складаються з огляду визначних пам'яток у межах міста та позаміських історичних пам'яток, ділових поїздок, кваліфікованого туризму, агротуризму, гірського пішохідного туризму та альпінізму [18].

Вибираємо сім наступних міст в Польщі для включення їх в туристичні маршрути – Львів (входить обов'язково в схему подорожі), Варшава, Краків, Гданськ, Вроцлав, Познань, Освенцім.

Відстані між заданими містами наведено в табл. 1 [20]. Мінімізувати будемо відстань автошляхами, отримані із використанням інтернет-ресурсу Flagma. Треба знайти такі варіанти туристичних маршрутів, на яких буде досягнуто мінімальної відстані.

Таблиця 1

Відстань автошляхами між туристичними містами Польщі

Назва пункту	Відстань, км						
	Львів	Варшава	Краків	Гданськ	Вроцлав	Познань	Освенцім
Львів	*	382	323	717	585	652	377
Варшава	382	*	284	339	339	305	317
Краків	323	284	*	546	265	400	69
Гданськ	717	339	546	*	434	291	540
Вроцлав	585	339	265	434	*	170	214
Познань	652	305	400	291	170	*	356
Освенцім	377	317	69	540	214	356	*

Економіко-математична модель приймає вид:

$$\begin{aligned}
 F = & 382x_{12} + 323x_{13} + 717x_{14} + 585x_{15} + 652x_{16} + 377x_{17} + \\
 & + 382x_{21} + 284x_{23} + 339x_{24} + 339x_{25} + 305x_{26} + 317x_{27} + \\
 & + 323x_{31} + 284x_{32} + 546x_{34} + 265x_{35} + 400x_{36} + 69x_{37} + \\
 & + 717x_{41} + 339x_{42} + 546x_{43} + 434x_{45} + 291x_{46} + 540x_{47} + \\
 & + 585x_{51} + 339x_{52} + 265x_{53} + 434x_{54} + 170x_{56} + 214x_{57} + \\
 & + 652x_{61} + 305x_{62} + 400x_{63} + 291x_{64} + 170x_{65} + 356x_{67} + \\
 & + 377x_{71} + 317x_{72} + 69x_{73} + 540x_{74} + 214x_{75} + 356x_{76} \rightarrow \min
 \end{aligned}$$

$$\begin{cases}
 x_{12} + x_{13} + x_{14} + x_{15} + x_{16} + x_{17} = 1, \\
 x_{21} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} = 1, \\
 x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1, \\
 x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{45} + x_{46} + x_{47} = 1, \\
 x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{56} + x_{57} = 1, \\
 x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{67} = 1, \\
 x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} = 1.
 \end{cases}$$

$$\begin{cases}
 x_{21} + x_{31} + x_{41} + x_{51} + x_{61} + x_{71} = 1, \\
 x_{12} + x_{23} + x_{24} + x_{25} + x_{26} + x_{27} = 1, \\
 x_{31} + x_{32} + x_{34} + x_{35} + x_{36} + x_{37} = 1, \\
 x_{41} + x_{42} + x_{43} + x_{45} + x_{46} + x_{47} = 1, \\
 x_{51} + x_{52} + x_{53} + x_{54} + x_{56} + x_{57} = 1, \\
 x_{61} + x_{62} + x_{63} + x_{64} + x_{65} + x_{67} = 1, \\
 x_{71} + x_{72} + x_{73} + x_{74} + x_{75} + x_{76} = 1.
 \end{cases}$$

В результаті виконання ряду кроків, що забороняють незв'язані підмаршрути, було отримане рішення, наведене на рис. 3, а, б.

2	Назва пункту	Львів	Варшава	Краків	Гданськ	Вроцлав	Познань	Освенцім		
3	Львів	5000	382	323	717	585	652	377	323	
4	Варшава	382	5000	284	339	339	305	317	382	
5	Краків	5000	284	5000	546	265	400	69	69	
6	Гданськ	717	339	546	5000	434	291	540	339	
7	Вроцлав	585	339	265	434	5000	170	214	170	
8	Познань	652	305	400	291	170	5000	356	291	
9	Освенцім	5000	317	69	540	214	356	5000	214	
10									1788	Функція мети
11										
12										
13	Назва пункту	Львів	Варшава	Краків	Гданськ	Вроцлав	Познань	Освенцім	Отримані обмеження	Задані обмеження
14	Львів	0	0	1	0	0	0	0	1	1
15	Варшава	1	0	0	0	0	0	0	1	1
16	Краків	0	0	0	0	0	0	1	1	1
17	Гданськ	0	1	0	0	0	0	0	1	1
18	Вроцлав	0	0	0	0	0	1	0	1	1
19	Познань	0	0	0	1	0	0	0	1	1
20	Освенцім	0	0	0	0	1	0	0	1	1
21	Отримані обмеження	1	1	1	1	1	1	1		
22	Задані обмеження	1	1	1	1	1	1	1		
23	Львів	Краків	Освенцім	Вроцлав	Познань	Гданськ	Варшава	Львів	L=	1788 км

Параметри розв'язувача

Оптимізувати цільову функцію:

До: ☐ Максимум ☒ Мінімум ☐ Збаланшувати

Змінюючи клітинку змінної:

Підлягає обмеженням:

$$\$B\$21:\$H\$21 = \$B\$22:\$H\$22$$

$$\$B\$14:\$H\$20 = \text{ціль}$$

$$\$I\$14:\$J\$20 = \$I\$14:\$J\$20$$

☒ Зробити необхідні зміни як від'ємні

Вибір метод розв'язання:

Метод розв'язання

Для розв'язання гладких нелінійних задач виберіть розв'язувач нелінійних задач за методом зведеного градієнта. Для розв'язання лінійних завдань виберіть розв'язувач за симплекс-методом, для негладких завдань виберіть розв'язувач розв'язувач.

Рис. 3. Розробка туристичного маршруту Польщею в середовищі MSEXCEL, скрин розв'язку з екрана

В результаті розв'язку даної задачі, отримані такі результати: прямуючи за маршрутом Львів–Краків–Освенцім–Вроцлав–Познань–Гданськ–Варшава–Львів отримаємо мінімальну довжину автобусного маршруту автошляхами, що становить 1788 км.

Відображення маршруту на карті Польщі, побудовано за допомогою ресурсу Flagma, маємо на рис. 4.

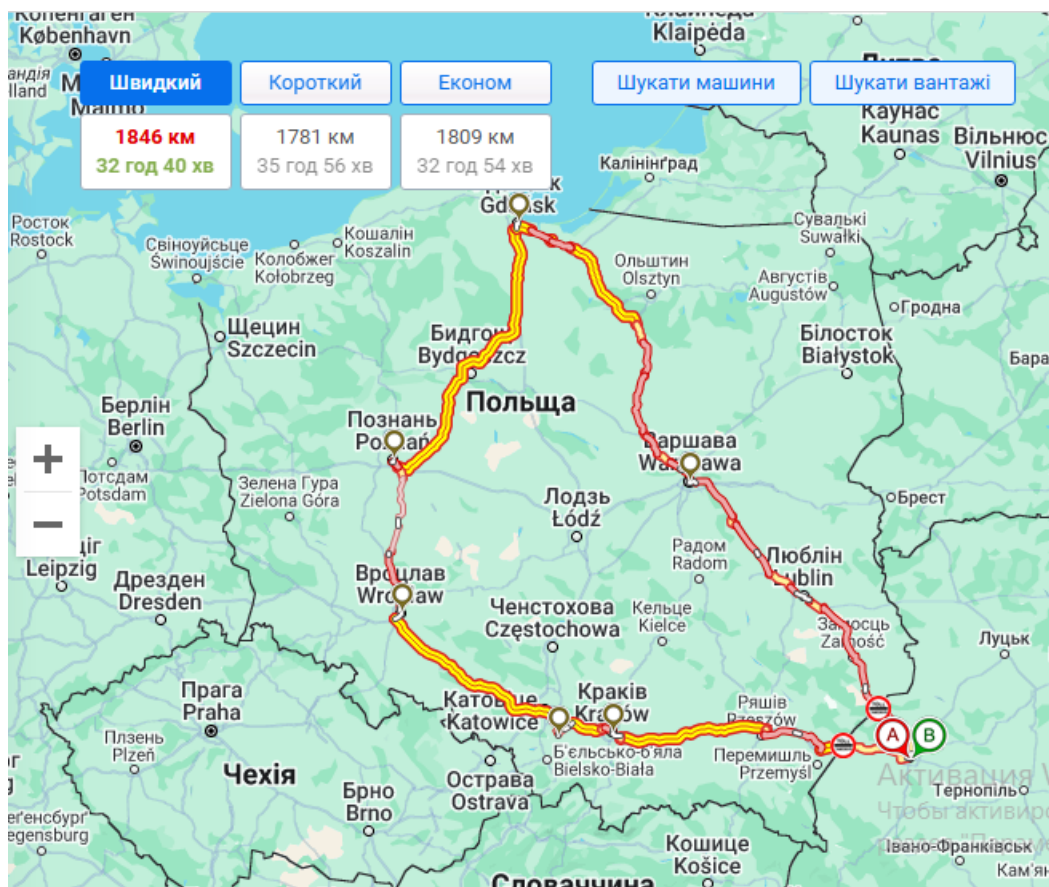


Рис. 4. Розроблений маршрут подорожі на підставі задачі комівояжера [20]

Якщо ж за критерій обирати відстань, при цьому враховуючи додаткові фактори, пов'язані із організацією туристичної подорожі, то можливий і зворотній напрямок об'їзду пунктів маршруту : Львів— Варшава—Гданськ— Познань—Вроцлав —Освенцім —Краків — Львів.

Можлива зміна критерію таким чином, щоб компанія не мінімізувала ресурс (відстань) на відвідування заданих пунктів маршруту, як у задачі комівояжера, а максимізувала прибуток від автоперевезення за одиницю часу. У такому критерії інтенсивності прибутку поряд з фактором витрат буде враховуватися і інший фінансовий фактор – доходів, а також фактор часу.

З переходом від критерію на мінімум до критерію на максимум стає припустимим зняття вимоги обов'язковості заходу в усі пункти маршруту – відповідно, з'являється можливість вибору із загальної множини найбільш привабливих пунктів, між якими оптимізується маршрут. Якщо для задачі комівояжера будувався оптимальний маршрут між обов'язковими пунктами, то в даній постановці задачі – оптимальний маршрут між оптимальними пунктами.

При побудові оптимальної схеми маршруту можуть підлягати оптимізації також і тривалості перебування протягом подорожі в кожному з пунктів. При проектуванні оптимальної схеми може враховуватися доходи від переходів між пунктами (містами) та їх тривалість поряд з витратами на переходи, як у задачі комівояжера.

Висновки та перспективи подальших досліджень. У даній статті було проаналізовано сучасний стан та основні тенденції розвитку міжнародних пасажирських перевезень в Україні. Проведений аналіз продемонстрував, що станом на 2019 рік пріоритетними залишалися зв'язки України з російською федерацією та країнами СНД (28,2%). Друге місце за інтенсивністю займали країни Європи і Близького Сходу, відповідно 22,1%.

Пандемія Covid-19 та далі повномасштабна війна, активна фаза якої розпочалася у лютому 2022 року, змінила ринок автобусних перевезень в Україні та створила більший попит на ньому насамперед через

припинення авіасполучення. Основним напрямком у розвитку пасажирських перевезень стала Центральна Європа. Війна актуалізувала питання підвищення пропускної спроможності пунктів пропуску на західному кордоні, оскільки в перші місяці війни значно збільшився пасажиропотік у напрямі «виїзду» з України.

За останні 2,5 роки український автобусний ринок виріс щонайменше втричі в грошовому еквіваленті – до близько 7 млрд грн. Як показали дослідження ринку пасажирських перевезень, проведені в 2023 р., близько 37% українців подорожують за кордон з метою туризму, 28% – щоб побачитися з рідними, 18% – для зустрічей із друзями, 17% опитаних – робочі поїздки.

Незмінним і важливим за впливом на ринок автобусних перевезень залишається фактор сезонності. Різниця між пасажиропотоками у високий та низький сезон може складати 2–2,5 рази. Допомагає виявити сезонні тенденції та передбачити пікові періоди аналітика.

На основі результатів аналізу основних сучасних тенденцій розвитку міжнародних автобусних перевезень та факторів, що впливають на збільшення попиту, розроблено багатоетапний алгоритм формування транспортно-логістичної схеми перевезень за напрямом Україна–Європа. При формуванні транспортно-логістичної схеми враховуються попередні та оперативні прогностичні дані про пасажиропотоки, а також результати моделювання системи масового обслуговування при проходженні формальних процедур при перетині кордону автобусами (за зеленим та червоним коридором) та реальної ситуації з чергами та каналами обслуговування в Міжнародному пункті пропуску.

Такий підхід має сприяти збільшенню кількості поїздок за актуальними маршрутами, більш ефективному використанню парку автобусів автотранспортного підприємства та більш зручному та якісному обслуговуванню пасажирів (за часом, пересадками та ін). В цілому сприятиме зростанню прибутковості діяльності підприємства-перевізника, а також допоможе врахувати потреби споживачів (пасажирів) транспортних послуг.

Основна увага приділена проблемі вибору найбільш ефективних схем туристичних подорожей. Це набуває особливо важливого значення на сучасному етапі через активний розвиток міжнародних зв'язків і світової туристичної індустрії. Проаналізовано фактори, що впливають на вибір пунктів і часу перебування в містах, вплив привабливості об'єкту подорожі на доцільну тривалість відвідування культурно-історичних місць.

На основі проведеного аналізу запропонована економіко-математична модель логістичного управління при формуванні міжнародних туристичних маршрутів за напрямом Україна–Європа. Модель асоціюється із задачею комівояжера, який має по замкненому маршруту з мінімальними сумарними витратами об'їхати всі задані пункти, відвідуючи кожен один раз і повертаючись в вихідний пункт.

Польща є частиною світового туристичного ринку з постійно зростаючою кількістю відвідувачів. На прикладі семи найбільш популярних міст здійснено моделювання та визначено оптимальний маршрут. В результаті розв'язку даної задачі, отримані такі результати: прямуючи за маршрутом Львів–Краків–Освенцім–Вроцлав–Познань–Гданськ–Варшава–Львів отримаємо мінімальну довжину автобусного маршруту автошляхами, що становить 1788 км.

Подальші дослідження в напрямку удосконалення логістичного управління міжнародними автобусними перевезеннями мають зосередитися на кількох важливих напрямках:

Розвиток мультимодальних систем міжнародних пасажирських перевезень. З початком повномасштабної війни автобуси стали одним із основних видів транспорту для міжнародних перевезень. Автобуси забезпечують можливість прямого сполучення з містами за кордоном. Також є незамінною частиною мультимодальних перевезень, включаються до складних маршрутів.

Для покращення якості надання послуг при здійсненні міжнародних пасажирських перевезень потрібно ретельно аналізувати та планувати процеси на основі прогностичних даних пасажирообігу. Дослідження пасажиропотоку є важливим інструментом, оскільки дозволяє на основі зібраних даних про пасажирські потоки визначати оптимальні стратегії розвитку транспортних систем.

Оптимізація маршрутів подорожі на основі багатокритеріальних оцінок. Важливо продовжити роботу над оптимізаційними моделями. При побудові оптимальної схеми маршруту можуть підлягати оптимізації також і тривалості перебування протягом подорожі в кожному з пунктів. При проектуванні оптимальної схеми може враховуватися доходи від переходів між пунктами (містами) та їх тривалість поряд з витратами на переходи, як у задачі комівояжера. За умови використання критерію на максимум стає припустимим зняття вимоги обов'язковості заходу в усі пункти маршруту. Відповідно, з'являється можливість вибору із загальної множини найбільш привабливих пунктів, між якими оптимізується маршрут. Якщо для задачі комівояжера був оптимальний маршрут між обов'язковими пунктами, то в даній постановці задачі – оптимальний маршрут між оптимальними пунктами.

Ці напрями досліджень дозволять створювати більш адаптивні, надійні та безпечні транспортні системи міжнародних пасажирських перевезень, які дозволять не тільки максимізувати прибуток від автоперевезення за одиницю часу, а й враховувати і фактор часу та удосконалювати критерії якості обслуговування пасажирів.

Список використаних джерел:

1. Кірічок О. Г. Транспортна система України: напрями її інтеграції в транспортні структури Європи. *Вісник Національного університету водного господарства та природокористування*. Рівне. 2013. № 3 (63). с. 181–188.
2. Кірічок О., Антонюк В., Шевченко О. Роль і значення міжнародних автомобільних пасажирських перевезень у розвитку економіки країни. *Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті*. Том 2. № 13. 2019. С. 68-75. URL : <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/89>
3. Іцковська О. Сезонні зміни на автобусному ринку: як підлаштуватись та менеджерити. *Сайт : Центр транспортних стратегій*. 2024. URL : <https://surl.lu/gstwsv>
4. Доля В. К. Пасажирські перевезення : підручник. Харків : Видавництво «Форт», 2011. 504 с.
5. Босняк М.Г. Пасажирські автомобільні перевезення. К.: Видавничий Дім «Слово», 2009. 272 с.
6. Болубаш Б. О. Удосконалення маршрутної системи міжнародних пасажирських перевезень сполученням Україна – Польща. Автореферат дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня « магістр » за спеціальністю 275.03 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». Тернопіль. 2019. 5 с. URL: <https://surl.li/idxvgz>
7. Волошина С. В. Дослідження та удосконалення міжнародних пасажирських перевезень на маршруті Тернопіль – Прага. Автореферат дипломної роботи на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 275 «Транспортні технології (на автомобільному транспорті)». Тернопіль. 2019. 6 с. URL : <https://elartu.lntu.edu.ua/handle/lib/29624>
8. Кость І. П., Будник С. І., Нікіпчук С. В. Організація внутрішніх та міжнародних перевезень пасажирів автомобільним транспортом. Львів : Сполом, 2012. 148 с.
9. Костюченко, Л. М., Наапетян М. Р. Автомобільні перевезення у міжнародному сполученні. К. : Видавничий Дім «Слово», 2007. 656 с.
10. Дмитрієв І. А., Іванілов О.С., Шевченко І.Ю., Кирчата І. М. Економіка підприємств автомобільного транспорту: навчальний посібник. Х.: ФОП Бровін О.В., 2018. 308 с.
11. Горяїнов О. М. Вплив техніко-експлуатаційних показників роботи автотранспорту на ефективність логістичної системи: автореф. дис канд. техн. наук : 05.22.01 – Транспортні системи. Національний транспортний ун-т. Київ, 2004. 17 с.
12. Скільки втрачає Україна через нелегальні перевезення та як з цим боротися. *Сайт : Економічна правда*. 2023. URL : <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/10/19/705598/>
13. Косташук В. І. Сучасний стан міжнародного туризму між Україною та Італією. *Географія та туризм: наук. зб.* К.: Альтерпрес, 2010. Вип.16. С. 63-74.
14. Калат Я. Я., Максименко А. О., Томашик Л. С. Пасажирські та вантажні потоки через кордон Україна-ЄС в умовах covid-19 та війни. *Економіка : науковий вісник Ужгородського університету. Розділ 3. Регіональні соціально-економічні дослідження*. № 1(61). 2023. DOI: [https://doi.org/10.24144/2409-6857.2023.1\(61\).63-71](https://doi.org/10.24144/2409-6857.2023.1(61).63-71)
15. Транспорт. *Сайт : delo.ua*. 2024. URL: <https://surl.li/fzklpc>
16. Понад половина українців у 2023 р. їздили за кордон рейсовими автобусами – дослідження. *Interfax-Україна : інформаційне агентство. Економіка*. URL : <https://interfax.com.ua/news/economic/958248.html>
17. Задача комівояжера. Математична постановка задачі. *Сайт для студентів спеціальності інформатика*. URL: <https://surl.li/sgsdrd>
18. Терещук, Наталія. Туризм в Польщі та його вплив на економіку країни. Уманський національний університет садівництва. URL : <https://lib.udau.edu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/d2945a15-eedb-4558-802c-ad4b25155600/content>
19. Гаврилюк В. В. Удосконалення міжнародних пасажирських перевезень за напрямом Україна-Європа : Кваліфікаційна робота магістра. Дніпро : УМСФ. 2025. 130 с.
20. Розрахунок відстаней між містами. *Сайт :Flagma*. URL: <https://flagma.ua/uk/rozrahunok-vidstaney.html>

References:

1. Kirichok, O. H. (2013). Transportna systema Ukrainy: napriamy yii intehtratsii v transportni struktury Yevropy. *Visnyk Natsionalnoho universytetu vodnoho hospodarstva ta pryrodokorystuvannia*. № 3 (63), 181–188.
2. Kirichok, O., Antoniuk, V. & Shevchenko, O. (2019). Rol i znachennia mizhnarodnykh avtomobilnykh pasazhyrskykh perevezen u rozvytku ekonomiky krainy. *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni ta transporti*, Tom 2, № 13, 68-75. URL : <https://eforum.lntu.edu.ua/index.php/jurnal-mbf/article/view/89>
3. Itskovska, O. (2024). Sezonni zminy na avtobusnomu rynku: yak pidlashtuvatys ta menedzheryty. *Tsentr transportnykh stratehii*. [ukp.] URL : <https://surl.li/gclnwa>
4. Dolia, V. K. (2011). Pasazhyrski perevezennia. Kharkiv : Vydavnytstvo «Fort».
5. Bosniak, M.H. (2009). Pasazhyrski avtomobilni perevezennia. K.: Vydavnychy Dim «Slovo».

-
6. Boliubash, B. O. (2019). *Udoskonalennia marshrutnoi systemy mizhnarodnykh pasazhyrskykh perevezen spoluchenniam Ukraina – Polshcha*. (Avtoreferat dyplomnoi roboty na zdobuttia osvithnoho stupenia «mahistr»). Ternopil. Ukraina. URL: <https://surli.cc/zafwss>
 7. Voloshyna, S. V. (2019). *Doslidzhennia ta udoskonalennia mizhnarodnykh pasazhyrskykh perevezen na marshruti Ternopil – Praha*. (Avtoreferat dyplomnoi roboty na zdobuttia osvithnoho stupenia «mahistr»). Ternopil. Ukraina. URL: <https://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/29624>
 8. Kost, I. P., Budnyk, S. I., & Nikipchuk, S. V. (2012). Orhanizatsiia vnutrishnikh ta mizhnarodnykh perevezen pasazhyriv avtomobilnym transportom. Lviv : Spolom.
 9. Kostiuhenko, L. M. & Naapetian, M. R. (2007). Avtomobilni perevezennia u mizhnarodnomu spoluchenni. K. : Vydavnychy Dim «Slovo».
 10. Dmytriiev, I. A., Ivanilov, O.S., Shevchenko, I.Iu. & Kyrchata I.M. (2018). *Ekonomika pidpriemstv avtomobilnoho transportu*. Kh.: FOP Brovin O.V.
 11. Horiainov, O. M. (2004). *Vplyv tekhniko-ekspluatatsiinykh pokaznykiv roboty avtotransportu na efektyvnist lohistychnoi systemy* (avtoref. dys kand. tekhn. nauk). Kyiv. Ukraina.
 12. *Skilky vtrachaie Ukraina cherez nelehalni perevezennia ta yak z tsym borotysia*. (2023). Sait: Ekonomichna pravda. URL : <https://www.epravda.com.ua/columns/2023/10/19/705598/>
 13. Kostashchuk, V.I. (2010). Suchasnyi stan mizhnarodnoho turyzmu mizh Ukrainoiu ta Italiieiu. *Heohrafiia ta turyzm: nauk. zb. K.: Alterpres*. (Vyp.16), 63-74.
 14. Kalat, Ya.Ia., Maksymenko A.O. & Tomashyk L.S. (2023). Pasazhyrski ta vantazhni potoky cherez kordon Ukpaina-Yes v umovakh covid-19 ta viiny. *Ekonomika : naukovyi visnyk Uzhhorodskoho universytetu. Rozdil 3. rehionalni sotsialno-ekonomichni doslidzhennia*, (1(61)). 63-71. DOI: [https://doi.org/10.24144/2409-6857.2023.1\(61\).63-71](https://doi.org/10.24144/2409-6857.2023.1(61).63-71)
 15. *Transport* (2024). Sait : delo.ua. URL: <https://surl.li/euctwz>
 16. *Ponad polovyna ukraintsiv u 2023 r. yizdyly za kordon reisovymy avtobusamy – doslidzhennia*. Interfax-Ukraina : informatsiine ahenstvo. Ekonomika. URL : <https://interfax.com.ua/news/economic/958248.html>
 17. *Ponad polovyna ukraintsiv u 2023 rotsi yizdyly za kordon reisovymy avtobusamy – doslidzhennia*. Interfax-Ukraina : informatsiine ahenstvo. Ekonomika. URL : <https://interfax.com.ua/news/economic/958248.html>
 17. *Zadacha komivoiazhera. Matematychna postanovka zadachi*. Sait dlia studentiv spetsialnosti informatyka. URL: <https://www.mathros.net.ua/zadacha-komivojazhera-matematychna-postanovka-zadachi.html>
 18. Tereshchuk, Nataliia. Turyzm v Polshchi ta yoho vplyv na ekonomiku krainy. Umanskyi natsionalnyi universytet sadivnytstva. URL : <https://lib.udau.edu.ua:8443/server/api/core/bitstreams/d2945a15-eedb-4558-802c-ad4b25155600/content>
 19. Havryliuk V. V. (2025). *Udoskonalennia mizhnarodnykh pasazhyrskykh perevezen za napriamom Ukraina-Yevropa*. (Kvalifikatsiina robota mahistra). Dnipro Ukraina. [укр.]
 20. *Rozrakhunok vidstanei mizh mistamy*. Sait :Flagma. URL: <https://flagma.ua/uk/rozrahunok-vidstaney.html>

Яковлєва-Мельник Н. Г., старший викладач кафедри
туристичного та готельно-ресторанного бізнесу
ВНПЗ «Дніпровський гуманітарний університет»
ORCID: 0000-0002-1266-1813

САМОМЕНЕДЖМЕНТ ТА КОМАНДОУТВОРЕННЯ ЯК КЛЮЧ ДО УСПІШНОГО УПРАВЛІННЯ ТА ЗРОСТАННЯ ІНВЕСТИЦІЙНО-ІННОВАЦІЙНОГО ПОТЕНЦІАЛУ ПІДПРИЄМСТВА

Стаття присвячена проблематиці управління кадровим потенціалом підприємств в сучасних умовах. Автор досліджує ключові аспекти практики управління, які необхідні для досягнення досконалості в сучасному бізнес-середовищі. У статті розкрито поняття самоефективності, як важливого компонента продуктивності, пов'язаного зі здатністю співробітників керувати своїми завданнями, часом і емоційним станом, що, в свою чергу, має позитивний вплив на загальну роботу підприємства.

Визначено, що, з точки зору організації, здатність учасників команди до самоуправління має вирішальне значення для ефективного функціонування організації. Середовище, де більшість персоналу, не в змозі виконувати завдання, дотримуватися розкладу та прагнути до самореалізації дуже ускладнює реалізацію будь-яких проектів. В статті акцентовано увагу на сучасних світових тенденціях управління підприємством, які все частіше спрямовані на обов'язкове та регульоване розкриття політики ESG. Завдяки Директиві корпоративної звітності сталого розвитку (CSRD) Європейський Союз встановлює чіткі стандарти звітності щодо сталого розвитку та даних ESG, а впровадження принципів ESG стає невід'ємною частиною стратегічного інвестування, дозволяючи не тільки розвивати бізнес, але й залучати інвесторів, які цінують відповідальну практику ведення бізнесу.

З'ясовано, що впровадження корпоративної культури, яка створює відчуття залученості та самореалізованості, сприяє командній роботі, створенню позитивного робочого середовища. Підтверджено, що коли компанія є соціально відповідальною, це не тільки підвищує продуктивність праці співробітників, але й покращує репутацію компанії на ринку, зокрема інвестиційному. Ключовими є принципи справедливості, свободи, самореалізації та розвитку, підтримки різноманітності та інновацій. Самоменеджмент і командна робота дозволяють персоналу підприємства брати на себе відповідальність за прийняття рішень, ефективно спілкуватися та підвищувати продуктивність у той момент і в тому місці, де є нагальна потреба. Підприємства, що запровадили принципи самоорганізації та командної роботи демонструють значний успіх у адаптації до змін і більш швидкому досягненні стратегічних цілей.

Ключові слова: самоменеджмент, командоутворення, управління кадрами, управління підприємством, політики ESG, самоорганізація колективу, інновації, інвестиційна привабливість.

Yakovlieva-Melnyk N. H. Self-management and team building as keys to successful enterprise management

The article is dedicated to the issues of managing the human resource potential of enterprises modern conditions. The author explores key aspects of management practices that are necessary for achieving excellence in the contemporary business environment. The article reveals the concept of self-effectiveness as an important component of productivity linked to employees' ability to manage their tasks, time and emotional state, which, in turn, has a positively impacts the overall performance of the enterprise.

It is determined that, from the organization's perspective, the ability of team members to self-manage is crucial for the effective functioning of the organization. An environment where much of the staff is unable to complete tasks, adhere to schedules, and strive for self-realization significantly complicates the implementation of any projects. The article emphasizes current global trends in enterprise management, which increasingly focus on mandatory and regulated disclosures of ESG policies. With the Corporate Sustainability Reporting Directive (CSRD), the European Union establishes clear sustainability reporting standards and ESG data, and the implementation of ESG principles becomes an integral part of strategic investing, allowing not only for business development, but also for attracting investors who value responsible business practices.

It has been clarified that the implementation of a corporate culture that fosters a sense of engagement and self-realization contributes to teamwork and the creation of a positive working environment. It is confirmed that when a company is socially responsible, it not only increases employee productivity, but also improves the company's reputation in the market, particularly in terms of investment. Key principles include fairness, freedom, self-realization and development, support for diversity and innovation. Self-management and teamwork enable staff to take responsibility right where and when it is needed. Enterprises that have implemented the principles of self-organization and teamwork demonstrate significant success in adapting to changes and achieving strategic goals more rapidly.

Overall, the article asserts that success in enterprise management lies in the formation of corporate policy through a combination of self-management, collaboration, and adaptability, which positively influence the achievement of corporate objectives in modern conditions.

Key words: self-management, team building, human resource management, enterprise management, ESG policies, self-organization of the team.

Постановка проблеми. Сучасний світ – це швидкоплинність, зміни, постійно зростаючі обсяги інформації. Сучасні вимоги до персоналу – гнучкість, стресостійкість, креативність, універсальність, безперервний саморозвиток – все, що спонукає людину набувати навичок самоменеджменту (тайм-менеджменту). Самоменеджмент є важливим, коли мова йде про розширення можливостей співробітників та підвищення ефективності роботи підприємства. Реалізація проектів на підприємстві полегшується, коли кожен учасник команди має свідомий підхід до роботи, розуміє цілі та розділяє пріоритети компанії, може приймати оптимальні (або інноваційні) рішення, сприяти досягненню цілей команди та організації, тобто, коли працівники володіють інструментами самоменеджменту.

В світовій практиці активно використовують інструменти, що пришвидшують впровадження політики ESG, однією зі складових якої є соціально-орієнтовані організації. Дана тенденція також обумовлює та підкреслює актуальність застосування інструментів самоменеджменту, як для кожного особисто, так і в формуванні корпоративної політики, де працівників стимулюють до самоорганізації.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Сучасні дослідження визначають, що ефективне управління на різних рівнях (від самоуправління до управління в організаціях) має відбуватися через самопізнання, саморозвиток та самоуправління. Самопізнання надає особистості можливість розвитку, виявлення потенціалу, досягнення найвищого рівня професійності, а підприємству – висококваліфікованого та вмотивованого працівника [1]. В останніх дослідженнях обґрунтовані: важливість самоменеджменту для сучасного працівника, методи саморегуляції, які необхідно використовувати для посилення мобілізації ресурсів, усунення стресових станів, зниження ступеня емоційної напруги, зменшення можливості виникнення апатичних настроїв тощо [2].

Самоменеджмент, як інтегровану систему управління собою та власною діяльністю, вважають універсальним інструментом побудови свідомої, успішної стратегії діяльності в цілому [3]. Самоменеджмент є важливою частиною розвитку лідерства – це вміння самоконтролю, управління емоціями, поведінкою та процесами мислення. Безперервне самовдосконалення та саморозвиток є запорукою успішної кар'єри, що сприяє не лише особистому професійному зростанню, але й загальному розвитку організації [4].

На сучасному етапі управління персоналом зазнало змін, але завдяки технологіям та інноваціям розвиток менеджменту сприяє розвитку економіки. Сучасні технології управління персоналом сформульовані на основі самоуправління [5]. Жорстока конкуренція між підприємствами часто трансформує бізнес на «майданчик для змагань» з інновацій. Співробітники вважаються головним джерелом інновацій і досконалості в будь-якій організації. Самоменеджмент працівників робить їх більш відданими, енергійними та залученими до роботи. Дослідження обґрунтовують, що самоуправління працівників позитивно сприяє успіху організації та можуть забезпечити організаційну досконалість [5]. Самоуправління відрізняється від управління (яке покладається на значну участь керівника), оскільки воно здійснюється без безпосередньої присутності зовнішнього контролю, характеризується відчуттям задоволеності роботою, самоефективністю, бажанням навчатися та досягати. Для співробітників самоменеджмент на робочому місці означає, що вони відповідають за визначення підходів до виконання завдань, а також за моніторинг та управління власною поведінкою [6]. Такі методики, як SMART, WOOP, OKR і Pomodoro, набувають дедалі більшої популярності завдяки емпірично доведеній ефективності, зокрема, у контексті підвищення продуктивності, мотивації та адаптивності [7]. Загалом, науковці в сфері менеджменту та психології визнають важливу роль самоменеджменту як для особистості, так і для команди, підприємства загалом. Але сьогодні управління підприємством вимагає більш глобального підходу – побудови корпоративної політики на основі Цілей сталого розвитку.

Мета статті. Дослідження сучасних тенденцій в управлінні працівниками з метою підвищення ефективності управління підприємством, зокрема застосування принципів самоменеджменту, що спонукають людину до особистісного та професійного зростання, а підприємство – до сталого розвитку.

Виклад основного матеріалу. Сучасні моделі формування політики управління кадровим потенціалом підприємства ґрунтуються на традиційних та класичних моделях тайм-менеджменту та мотивації. Далекоглядні підприємства вже сьогодні трансформують свою корпоративну політику відповідно до світових тенденцій та вимог. ESG-політика приділяє особливу увагу змінам клімату, соціально-орієнтованості та необхідності підтримки переходу до майбутнього з нульовими викидами парникових газів; реалізує політику підтримки технологій та галузей, які є невід'ємною частиною сталого розвитку, переходу до чистої енергетики та соціальної справедливості. ESG – «довкілля, соціальна сфера та управління» – три ключові аспекти, які сприяють стійкості та відповідальності на підприємствах. Критерії ESG (рис. 1) надають орієнтир для стійких дій і дозволяють порівнювати компанії.



Рис. 1. Критерії ESG

Джерело: адаптоване автором [8]

Критерії обумовлюють створення корпоративної культури, яка несе відповідальність перед навколишнім середовищем, суспільством і всіма зацікавленими сторонами. ESG заходи покликані сприяти посиленню конкурентних переваг і мінімізації ризиків, зміцнити довгострокову стабільність і прозорість управління підприємством. Визначення критеріїв ESG включає екологічні, соціальні та управлінські аспекти, які компанії повинні враховувати для стійких дій. Ці три виміри створюють основу для просування екологічної відповідальності та соціальної справедливості, забезпечення прозорого та відповідального управління працівниками підприємства. Серед ключових питань – розробка ефективної кліматичної стратегії, просування рівних. Критерії ESG пропонують компаніям структурований підхід, щоб відповідати очікуванням зацікавлених сторін і зробити їх сталу діяльність прозорою. Водночас звіти ESG дають змогу порівнювати компанії та таким чином сприяти прозорості ринку.

Опитування, проведене ще в 2022 році, показало, що 58% респондентів повідомили про підвищення інтересу до інвестицій у ESG, при цьому 19% респондентів вказали, що вони враховують показники ESG-критеріїв під час вибору об'єкта інвестування. Ця зміна підкреслює зростаюче значення соціальних факторів у інвестуванні ESG та їхні наслідки для компаній, інвесторів, зацікавлених сторін. Вивчення компаній, які досягли успіху у своїх соціальних практиках ESG, може дати цінну інформацію про ефективні стратегії та передовий досвід. Тематичні дослідження 2023-2024 років ілюструють переваги ESG [9, 10]:

- компанії, які вирізняються задоволеністю співробітників, часто демонструють рейтинги ESG, які на 14% вищі за середні світові показники;
- 50,1% інвесторів – компанії з вищими показниками ESG мають нижчі капітальні витрати;
- Європа лідирує на інвестиційному ринку ESG: у Європі перебуває 83% усіх активів ESG під управлінням (AUM), тоді як інвестори в Північній Америці, як правило, більш обережні щодо інвестицій в компанії, орієнтованих на ESG;
- 3% споживачів вважають, що компанії повинні активно формувати найкращі практики ESG, а 76% споживачів припинили б купувати у фірмах, які нехтують довкіллям, працівниками чи добробутом громади.

Та все ж, інвестиції ESG зростають в останні роки, оскільки все більше інвесторів віддають перевагу нефінансовим факторам під час прийняття інвестиційних рішень. За даними Bloomberg Intelligence, загальна сума активів, що перебувають під управлінням ESG, становить близько 41 трильйона доларів США. Порівняно з 2016 роком (22,8 трлн доларів), цей показник зріс майже на 80%. За прогнозами Bloomberg Intelligence інвестиції, пов'язані з ESG, в 2025 році перевищать 50 трлн доларів (рис. 2), а в Азії, за винятком Японії, інвестиції ESG зростуть більш ніж на 20% протягом наступних п'яти років [9, 10].

Зосередимо увагу на соціальній складовій ESG. Соціальний аспект критеріїв ESG фокусує увагу на відповідальності компанії перед зацікавленими сторонами, особливо перед своїми працівниками та суспільством у цілому. Комплексне впровадження соціальних аспектів у компанії вимагає цілісного погляду на менеджмент підприємства. Управлінський аспект ESG акцентує на прозорості та структурі процесів прийняття рішень. Це стосується філософії компанії та її цінностей [11].

Основні соціальні фактори в ESG включають трудову практику, права людини, різноманітність та інклюзивність, правомірні відносини із зацікавленими сторонами. Останніми роками ці аспекти вийшли на передній план, коли підприємства активно вирішували проблеми, або за власним бажанням, або через збій у роботі, за допомогою, наприклад, реалізації ідеї DEI (Diversity, Equity, and Inclusion, або DEIB – Diversity, Equity, Inclusion and Belonging – різноманітність, рівність, включення та приналежність), що стає невід'ємною частиною корпоративного середовища та реалізацію концептуальної моделі самоменеджменту. Різноманітне, справедливе та інклюзивне середовище на робочому місці дозволяє людині відчувати причетність до загальної справи, підтримку, що сприяє підвищенню залученості та довіри працівників, їхньому бажанню розвиватися.

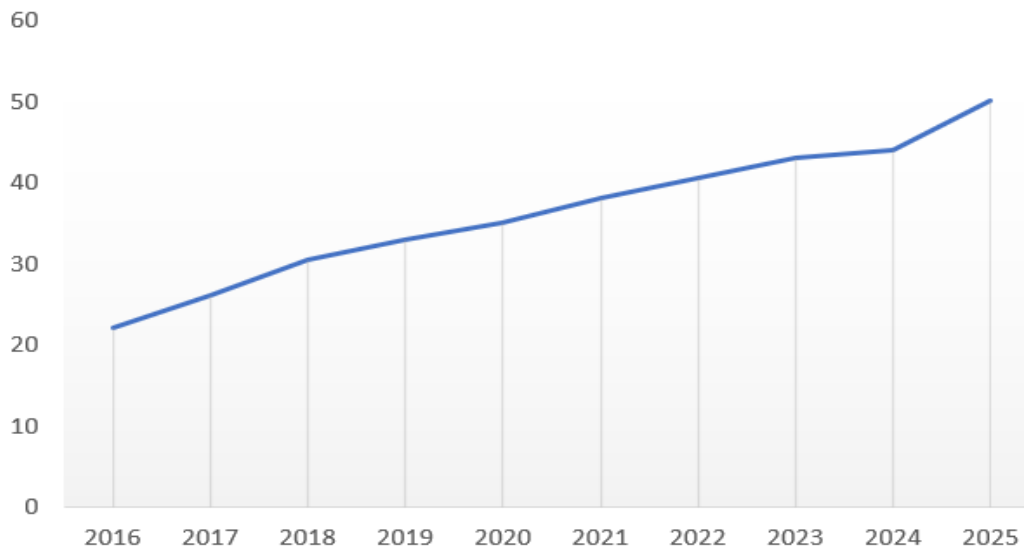


Рис. 2. Загальні глобальні активи ESG (трлн, дол. США)

Джерело: адаптоване автором [9]

Соціальний компонент ESG передбачає формування механізму взаємовідносин компанії зі своїми працівниками, фінансовими зацікавленими сторонами, громадами та політичним середовищем. Він охоплює такі теми, як ставлення до працівників, бойкоти, порушення трудових норм, відкликання продукції, залучення громади та загальний вплив на суспільство. Компаніям важливо враховувати ці напрямки під час прийняття рішень, оскільки вони можуть мати значний вплив на довкілля, суспільство та економіку.

Вплив соціальних факторів на фінансові показники компанії, може бути як позитивним, так і стати причиною надвитрат: незважаючи на те, що акцент на соціальних факторах може покращити репутацію компанії та імідж бренду, що призводить до покращення фінансових показників, також можуть представляти проблеми та ризики, які, в свою чергу, вплинуть негативно на фінансові показники компанії – саме тому, реалізації подібних кроків потребує наукового та практичного обґрунтування.

Робота підприємства формує основу її операцій, а формування стійкої робочої сили є вирішальним аспектом стратегії ESG. Принципи ESG можуть допомогти компаніям у цьому починанні, оцінюючи переваги практики управління персоналом, такі як: здоров'я, безпека, добробут та освіта, що узгоджуються з новими парадигмами. Такий підхід не тільки підвищує задоволеність працівників, але й сприяє виконанню вимог компанії та загального успіху компанії.

Кількісна оцінка соціальних даних для цілей ESG представляє кілька проблем, включаючи відсутність надійного стандарту вимірювання та труднощі в охопленні якісних аспектів. Крім того, дані можуть містити артефакти, які потрібно відфільтрувати перед звітом. Вимірювання та звітування результатів соціальних факторів може представляє складність через суб'єктивний та якісний характер соціальних даних, складність соціальних питань та потенціал для упереджень. Ці виклики ускладнюють процес порівняння різних компаній, оцінку впливу соціальних ініціатив. Таким чином, важливо переконатися, що остаточна відповідь є точною та не містить жодних помилок.

Незважаючи на це, ефективне вимірювання та звітність соціальних факторів мають вирішальне значення для підтримки прозорості та підзвітності в ESG, зусиллях компанії. Такий підхід також може допомогти бізнесу оцінити їх ефективність, визначити сфери для вдосконалення, передавати свій досвід для зацікавлених сторін. Послідовний збір даних, чітка комунікація та відповідність світовим стандартам звітності є одними з найефективніших методів звітування про соціальні фактори. Зростаюча важливість соціальних факторів в інвестуванні ESG зумовлена зміною пріоритетів і очікувань зацікавлених сторін. Оскільки компанії та інвестори все більше наголошують на соціальних перетвореннях і корпоративній підзвітності [12].

Даний підхід також заохочує персонал до креативності, готовності до співпраці, саморозвитку, що веде до підвищення інновацій і успіху, сприяє відкритому спілкуванню та співпраці між співробітниками, забезпечує необхідні ресурси та навчання, щоб переконатися, що кожного поважають і цінують. Підприємства можуть створити стійкий робочий штат за допомогою принципів ESG, сприяючи різноманітності, справедливості та інклюзії, а також забезпечуючи відповідну трудову практику та добробут працівників, тим самим розвивати культуру поваги та співпраці. Такі кроки однозначно ініціюють підвищення залученості кадрів, продуктивності та підвищенню морального духу, крім того, забезпечує чесні трудові практики.

Підприємства повинні прагнути до того, щоб їхні рішення відповідали соціальним цілям ESG та їхнім інтересам, оскільки, під час оцінювання ефективності ESG, вони мають значний вплив на репутацію

компанії та її довгостроковий успіх. Підприємства, що віддають пріоритет соціальній відповідальності та етичним практикам, швидше за все, будуть розглядатися як перспективні для розвитку, партнерства та інвестування. Важливість соціальних факторів в інвестуванні ESG стає все більш очевидною, оскільки зацікавлені сторони вимагають вищих очікувань і переходу від екологічних до соціальних пріоритетів. Інвестори все частіше шукають компанії, які можуть продемонструвати свою прихильність до соціальної відповідальності, і інвестування в ESG є способом досягнення цієї мети. Очікується, що в майбутньому компанії будуть все частіше враховувати соціальний вплив своїх рішень, оскільки інвестори все більше звертають увагу на політику підприємств, а не лише на прибуток [13] – 89% інвесторів враховують питання ESG під час прийняття інвестиційних рішень [10].

З метою досягнення високого рівня залученості працівників та відчуття особистісної цінності, креативності під час вирішення робочих питань, підприємства застосовують принцип самоорганізації в управлінні, що сприяє зростанню ефективності загального управління підприємством, досягнення гнучкості та ефективності, здатності реагувати на зміни в бізнес-середовищі.

В контексті бізнесу самоорганізація (самоуправління) означає підхід, який дає працівникам можливість працювати автономно та спільно, без необхідності централізованого керівництва чи контролю. Самоорганізований бізнес покладається на культуру довіри, прозорості та спільної мети, щоб заохочувати інновації, креативність і адаптивність. На підприємстві, де застосовують підхід самоорганізації, працівники мають високий ступінь автономії та несуть відповідальність за прийняття рішень і управління власною роботою. Замість того, щоб знаходитися під мікроуправлінням менеджерів, співробітники працюють разом у самокерованих командах, що дозволяє координувати свої зусилля, ділитися знаннями та вирішувати проблеми.

Шведський банк Handelsbanken, відомий своєю децентралізованою структурою управління. Банк має мережу з понад 800 відділень у кількох країнах, і кожна філія працює як самостійна одиниця з власною відповідальністю за прибутки та збитки. Підхід банку до самоорганізації допоміг досягти високого рівня задоволеності клієнтів і прибутковості. Вважається, що модель самоорганізації Handelsbanken сприяла його успіху та стабільності, особливо під час фінансової кризи. Банк має позитивну репутацію завдяки фінансовій надійності та обслуговуванню клієнтів, а також отримав численні нагороди та відзнаки за свою ділову практику та філософію управління.

Окрім децентралізованої моделі, Handelsbanken також приділяє значну увагу довгостроковим відносинам і етичній бізнес-практиці. Унікальний управлінський підхід Handelsbanken базується на принципі «найважливіша – людина», що підкреслює важливість взаємовідносин персоналу та відносин з клієнтами, прийняття рішень на місцевому рівні. Банк організований у невеликі самокеровані відділення, кожне з яких працює як міні-банк із власною відповідальністю за прибутки та збитки. Керівники філій мають високий ступінь автономії та повноважень приймати рішення, а також можуть пристосовувати свої послуги та пропозиції до конкретних потреб своїх місцевих клієнтів [14].

Світовий лідер у сфері «наука про життя» Bayer, налічує близько 100 000 співробітників і отримує 50 мільярдів євро доходу. В січні 2024 року Bayer було запроваджено «Динамічне спільне володіння» з метою децентралізації процесу прийняття рішень: це дозволило співробітникам робити вибір на місці, підвищуючи швидкість реагування та пришвидшувати інновації. Ця трансформація передбачає горизонтальні ієрархії, що призводить до скорочення керівних посад і прийняття 90-денних циклів планування для підтримки узгодженості.

Перехід до самоорганізації в Bayer все ще створює величезні виклики, оскільки вимагає фундаментального перегляду традиційних керівних ролей. Менеджери, які звикли приймати рішення в ієрархічній структурі, тепер повинні взяти на себе роль фасилітаторів, надаючи командам можливість приймати автономні рішення, зберігаючи узгодженість зі стратегічними цілями. Такі програми, як «WeLead» і цільові тренінги з лідерства, спрямовані на те, щоб подолати круту криву навчання до самоорганізації. Трансформація в напрямку самоорганізації вже продемонструвала багатообіцяючі успіхи: прискорення темпів впровадження інноваційних продуктів, особливо в підрозділах Bayer Crop Science і Pharmaceuticals. Дозволяючи багатофункціональним командам самостійно керувати своїми проектами, компанія скоротила цикли розробки для ключових продуктів, таких як нові рішення для захисту рослин і життєво важливі препарати. Така гнучкість дозволила Bayer швидше реагувати на потреби ринку та нормативні зміни, тим самим забезпечивши свою конкурентну перевагу в секторі «наук про життя».

Ще одним успіхом компанії є підвищення залученості та задоволеності співробітників. Опитування, проведені серед співробітників Bayer, показують, що працівники більше відчують свою важливість та цінність в самоорганізованій структурі. Команди, які раніше працювали за жорсткою ієрархією, тепер повідомляють про більшу співпрацю, креативність і відповідальність за свою роботу, що призводить до більшої залученості та можливості інновацій. У фінансовому плані зміна сприяла підвищенню операційної ефективності. Наприклад, у сфері закупівель і логістики самоорганізовані команди впровадили заходи з економії коштів, які позитивно вплинули на прибутки Bayer [15].

Хоча самоорганізація може призвести до складних і складно впорядкованих моделей, вона відрізняється від хаосу. Самоорганізація виникає з основних правил і взаємодій, які породжують шаблони, структури

та поведінку, навіть за відсутності зовнішнього контролю. Хаосу, з іншого боку, бракує передбачуваних моделей або порядку, що ускладнює визначення будь-яких основних правил. Самоорганізація – це процес, за допомогою якого моделі та структури виникають без зовнішнього керівництва чи контролю. Холакратія – це специфічна організаційна основа, яка реалізує самоорганізацію через структуровані ролі, процеси та механізми прийняття рішень. У цьому підході повноваження розподіляються між «колами», які представляють конкретні сфери роботи в організації. Кожне коло має певну мету, і співробітникам призначаються певні ролі в цих колах. Процес прийняття рішень базується на процесі управління, який дозволяє створювати, змінювати або видаляти ролі за потреби. Тактичні наради є форумом для вирішення оперативних питань і спільного прийняття рішень.

В своїй книзі «Leading Teams: Setting the Stage for Great Performances» Дж. Річарда Хекмана (1940–2013) представив матрицю повноважень (рис), що допомагає зрозуміти співпрацю між керівництвом і самоорганізованими командами [16]. Протягом кількох десятиліть він проводив дослідження в галузі соціальної та організаційної психології та описав чотири рівні розподілу повноважень у командах. Матриця повноважень Хекмана Для цього автор визначає чотири типи команд (рис. 3).



Рис. 3. Авторитарна матриця «Хекмана»

Джерело: адаптоване автором [16]

Команди під керівництвом менеджера (manager-led team) – класична модель проектної групи, коли кожен з персоналу підприємства несе повну відповідальність за виконання завдань. Менеджер контролює процеси, визначає робочий контекст, контролює та оцінює результати та відповідає за звітність. Самі окремі члени команди мають мало свободи у формуванні своєї ролі.

Самокеровані команди (self-managing), як приклад, команди Kanban і Scrum в ІТ-сфері, – самокеровані команди несуть більше відповідальності. Вони виконують поставлену роботу і контролюють результати групи. Така форма самоорганізації часто зустрічається в компаніях, які перебувають у процесі переходу до формування agile команд. Співпраця з лідером характеризується довірою та більшою свободою у формуванні роботи – гнучкий спосіб.

Групи саморозробки (self-designing). Ці самоорганізовані команди самі вирішують рамки своєї роботи. Залежно від організації це може навіть означати, що співробітники спільно приймають рішення про найм або звільнення членів команди, а керівник лише визначає цілі, яких потрібно досягти. Такий розподіл ролей особливо поширений у гнучких командах та ошадливому менеджменті (команди Scrum за гнучкими аспектами).

Автономні команди (self-governed) – самоврядні команди абсолютно вільно керують своєю роботою й не підлягають жодним діям з боку керівників. Їхня співпраця характеризується також самостійним визначенням цілей. Така форма самокерованих команд зустрічається під час реалізації стартапів.

Погодимося, що сьогодні самоорганізація актуальна не для всіх компаній. Компанії, які працюють на стабільному ринку та вирішують прості проблеми, можуть дуже добре працювати з централізованою системою управління. Однак, світові тенденції, досвід успішних підприємств засвідчують, що самоорганізації проникають навіть у традиційний промисловий сектор. Основою самоорганізації на підприємстві

є питання соціально-орієнтованої організації та самоменеджменту працівників, а вони залишаються актуальними в будь-якій організації. Тому підприємствам варто працювати над створенням сприятливих умов для особистого розвитку працівників та удосконаленню навичок самоменеджменту.

Особистий розвиток та самоменеджмент – це процес вдосконалення себе, своїх навичок, мислення та цілей, самостійна організація справ у часі, що допомагає особистості досягти більшого успіху, щастя та задоволення в житті [17]. Не зайве розглядати дані пункти і як рушійну силу для інновацій. В даному випадку, інновація – це здатність створювати нові та цінні рішення проблем, потреб або можливостей. Це необхідно для особистого та професійного зростання, а також для соціального та економічного прогресу. Ключові напрямки для розвитку особистості та самоменеджменту: розвиток творчості, розширення знань, зміцнення самовпевненості, зростання професійності.

Розвиток творчої складової, креативності – це вміння генерувати нові та корисні ідеї, що можна вважати основою інновацій, оскільки дозволяє мислити нестандартно та знаходити нові можливості. Особистий розвиток може підвищити творчу складову, забезпечуючи свободу погляду різних точок зору, досвід і виклики. Реалізувати цей напрям може допомогти практика в мозковому штурмі, карти думок (Mind Maps), вільне письмо, що допоможе стимулювати уяву та подолати розумові блоки. Розвиваючи свої творчі здібності, людина покращує свої навички вирішення проблем і прийняття рішень, а також набуває здатності адаптуватися та впроваджувати інновації.

Знання – це інформація та розуміння, які людина отримує завдяки навчанню та досвіду. Це ґрунт для інновацій. Особистий розвиток може розширити знання, спонукати вивчати нове, вдосконалювати навички та досліджувати нові сфери. Розширюючи свої знання, людина може підвищити свою компетентність і авторитет, а також свою здатність до інновацій.

Впевненість – це віра у власні можливості. Це рушійна сила інновацій, оскільки спонукає діяти та досягати цілей. Особистий розвиток може підвищити впевненість, допомагаючи подолати страхи, сумніви та обмеження. Наприклад, встановлювати цілі SMART, відстежувати власний прогрес і відзначати досягнення, щоб посилити самоефективність і самооцінку. В даному напрямку доречно практикувати позитивні афірмації, візуалізацію або медитацію, щоб зменшити стрес і занепокоєння та підвищити оптимізм і стійкість. Підвищуючи впевненість у собі, можна покращити власну ефективність і продуктивність, а також здатність до інновацій.

Співпраця (робота в команді) – це робота з іншими для досягнення спільної мети. Це каталізатор інновацій, оскільки дозволяє використовувати різноманітні навички, перспективи та ресурси вашої команди. Особистий розвиток може покращити здатність до співпраці шляхом удосконалення навичок спілкування, лідерства та командної роботи. Наприклад, можна ставити запитання та активно слухати, щоб розуміти та поважати думки та ідеї інших; ділитися своїми знаннями, пропонувати підтримку та делегувати завдання, щоб розширити можливості та надихнути інших.

Висновки. Реалізація вже сьогодні концептуальної моделі самоменеджменту на підприємстві, як основа командування та самоорганізації колективу, формування соціальноорієнтованої корпоративної політики – є вимогою часу, що в майбутньому стане обов'язком. Зіштовхуючись з кожним викликом на шляху формування сомоорганізованих команд на підприємствах, потрібно пам'ятати: персонал – це найцінніший актив, що реалізовує стратегії, інновації, забезпечує розвиток та успіх організації. Чи зможе людина без навичок сомоменеджменту бути ключовим ресурсом підприємства – відповідь – ні. Запровадження концептуальної моделі самоменеджменту в формуванні корпоративної політики потребує ґрунтового підходу з науковими дослідженнями та різноманітними практиками.

Реалізація на підприємстві концептуальної моделі самоменеджменту не означає відсутність контролю. Контроль можна реалізовувати за допомогою інтегрованих платформ, що розроблені для масштабування роботи. Моніторинг даних на всіх етапах становлення корпоративної політики: від найму до утримання персоналу, просування співробітників по службі, показники, орієнтовані на ініціативи (мета та її досягнення) і т.п. Необхідність контролю та звітності підтверджується світовими тенденціями впровадження політики ESG, як важливого елементу сучасного управління, що впливає на репутацію компанії та її конкурентоспроможність. Долучаючись до політики ESG, підприємства не лише формують стійкий робочий штат та досягають ефективного управління, але й стають інвестиційно привабливими, досягають сталого розвитку – формують позитивний імідж як в бізнес середовищі, так і поміж споживачів. Інтеграція самоменеджменту та командування є ключовим фактором для досягнення успіху в управлінні підприємствами в умовах сучасної економіки та світових тенденцій.

Список використаних джерел:

1. Chaikina A. Self-management as the main competence of the modern manager. *Економіка і регіон*. 2021, № 3(82). С. 91–96. DOI: [https://doi.org/10.26906/EiR.2021.3\(82\).2371](https://doi.org/10.26906/EiR.2021.3(82).2371)
2. Лисенко В., Приходько І. Вплив функцій та технологій самоменеджменту на розвиток персоналу підприємства. *Економіка та управління підприємствами*. 2018. Вип. 19. С. 251-256. Режим доступу: http://www.market-infr.od.ua/journals/2018/19_2018_ukr/43.pdf.

3. Олійник І. Самоменеджмент як технологія професійного саморозвитку та формування дослідницької компетенції у майбутніх докторів філософії. *Вісник університету імені Альфреда Нобеля*. Серія «Педагогіка і психологія». 2020. № 2 (20). DOI: 10.32342/2522-4115-2020-2-20-27. Режим доступу: <https://pedpsy.duan.edu.ua/images/PDF/2020/2/28.pdf>
4. Вовк М. Самоменеджмент як головна компетенція в розвитку менеджера. *Новітні парадигми менеджменту в умовах воєнного стану : монографія*. Львів: СПОЛОМ, 2024. 374 с., С. 106-109. DOI: <https://doi.org/10.32718/monohraf.2024.2.2>
5. Василик С., Прохоровська С., Агєєва І. Управління персоналом та самоменеджмент у системі управління організацією в умовах сучасних викликів. *Наукові записки Львівського університету бізнесу та права*, 2023 (38), С. 16-23. Режим доступу: <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/848>
6. Gbarale K., Okechukwu B. Self-Management Competencies and Employee Effectiveness: A Conceptual Review. *Journal of Human Resource & Leadership*, 2022, № 6(2), С. 33–41. DOI: <https://doi.org/10.53819/81018102t4056>.
7. Pietsch S., Riddell H., Semmler C., Ntoumanis N., Gucciardi D. (). SMART goals are no more effective for creative performance than do-your-best goals or non-specific, exploratory «open goals». *Educational Psychology*, 2024, № 44(9–10), с. 946–962. DOI: <https://doi.org/10.1080/01443410.2024.2420818>
8. Souza Barbosa A., da Silva M., da Silva, L.B. *et al.* Integration of Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria: their impacts on corporate sustainability performance. *Humanit Soc Sci Commun* 10, 410. 2023. DOI: <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01919-0>.
9. Brian Baker, Mercedes Barba. ESG investing statistics. Bankrate. 2023. Режим доступу: <https://www.bankrate.com/investing/esg-investing-statistics/>
10. Toni Vitali. ESG Investing Statistics, Data & Trends. 2025. Режим доступу: <https://investingintheweb.com/education/esg-investing-statistics/#what-is-esg-investing>
11. Nora Emig. ESG-Kriterien: Nachhaltigkeits messbar machen für Unternehmen. ESG-konform. 2024. Режим доступу: <https://envalor.com/de/blog/esg-nachhaltigkeit/>
12. ESG | The Report. Режим доступу: <https://esgthereport.com/>.
13. The Institutional Investor's Guide to ESGINVESTING P&I Custom Content in partnership with Pictet AM. 2024. Режим доступу: <https://www.pionline.com/ESG>.
14. Handelsbanken. Режим доступу: <https://www.handelsbanken.com/en/about-the-group/our-story>.
15. Bayer. Режим доступу: <https://www.bayer.com>.
16. Wageman, Ruth and Amabile, Teresa M. Richard Hackman (1940-2013). (2013). *Harvard Business School Entrepreneurial Management Working Paper* No. 14-009, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2295054> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2295054>.
17. Martins M., Taveira M. d. C., Magalhães F., Silva A. Organizational Support in Career Self-Management: A Systematic Literature Review. *Administrative Sciences*, 14(11), 286 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/admsci14110286>.

References:

1. Chaikina, A. (2021). Self-management as the main competence of the modern manager. *Economics and Region*, 3(82), 91–96. [https://doi.org/10.26906/EiR.2021.3\(82\).2371](https://doi.org/10.26906/EiR.2021.3(82).2371).
2. Lysenko, V., & Prykhodko, I. (2018). Vplyv funktsii ta tekhnolohii samomenedzhmentu na rozvytok personalu pidpryemstva. *Ekonomika ta upravlinnia pidpryemstvamy*, 19. 251-256. http://www.market-infr.od.ua/journals/2018/19_2018_ukr/43.pdf.
3. Oliinyk, I. (2020). Samomenedzhment yak tekhnolohiia profesiinoho samorozvytku ta formuvannia doslidnytskoi kompetentsii u maibutnikh doktoriv filosofii. *Visnyk universytetu imeni Alfreda Nobelia*. Seriiia «Pedagogika i psykholohiia». 2 (20). DOI: 10.32342/2522-4115-2020-2-20-27. <https://pedpsy.duan.edu.ua/images/PDF/2020/2/28.pdf>.
4. Vovk, M. (2024). Samomenedzhment yak holovna kompetentsiia v rozvytku menedzhera. *Novitni paradyhmy menedzhmentu v umovakh voiennoho stanu : monohrafiia*. Lviv: SPOLOM. 106-109. <https://doi.org/10.32718/monohraf.2024.2.2>
5. Vasylyk, S., Prokhorovska, S., & Ahieieva, I. (2023). Upravlinnia personalom ta samomenedzhment u systemi upravlinnia orhanizatsiiei v umovakh suchasnykh vyklykiv. *Naukovi zapysky Lvivskoho universytetu biznesu ta prava*. (38), 16-23. <https://nzlubp.org.ua/index.php/journal/article/view/848>.
6. Gbarale, K., & Okechukwu, B. (2022). Self-Management Competencies and Employee Effectiveness: A Conceptual Review. *Journal of Human Resource & Leadership*, 6(2), 33–41. <https://doi.org/10.53819/81018102t4056>.
7. Pietsch, S., Riddell, H., Semmler, C., Ntoumanis, N., & Gucciardi, D. F. (2024). SMART goals are no more effective for creative performance than do-your-best goals or non-specific, exploratory ‘open goals.’ *Educational Psychology*, 44(9–10), 946–962. <https://doi.org/10.1080/01443410.2024.2420818>.

-
8. Souza Barbosa, A., da Silva, M.C.B.C., da Silva, L.B. et al. (2023) Integration of Environmental, Social, and Governance (ESG) criteria: their impacts on corporate sustainability performance. *Humanit Soc Sci Commun* 10, 410. <https://doi.org/10.1057/s41599-023-01919-0>.
 9. Baker, B., Barba, M. (2023). ESG investing statistics. Bankrate. <https://www.bankrate.com/investing/esg-investing-statistics/>.
 10. Toni, Vitali. (2025). ESG Investing Statistics, Data & Trends. <https://investingintheweb.com/education/esg-investing-statistics/#what-is-esg-investing>
 11. Nora Emig. (2024). ESG-Kriterien: Nachhaltigkeit messbar machen für Unternehmen. ESG-konform. <https://envalor.com/de/blog/esg-nachhaltigkeit/>.
 12. ESG | The Report. <https://esgthereport.com/>.
 13. The Institutional Investor's Guide to ESGINVESTING P&I Custom Content in partnership with Pictet AM. (2024). <https://www.pionline.com/ESG>.
 14. Handelsbanken. <https://www.handelsbanken.com/en/about-the-group/our-story>.
 15. Bayer. <https://www.bayer.com>.
 16. Wageman, Ruth and Amabile, Teresa M., J. Richard Hackman (1940-2013). (2013). *Harvard Business School Entrepreneurial Management Working Paper* No. 14-009, Available at SSRN: <https://ssrn.com/abstract=2295054> or <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.2295054>.
 17. Martins, M., Taveira, M. d. C., Magalhães, F., & Silva, A. D. (2024). Organizational Support in Career Self-Management: *A Systematic Literature Review*. *Administrative Sciences*, 14(11), 286. <https://doi.org/10.3390/admsci14110286>.

МАШИНОБУДУВАННЯ (ЗА СПЕЦІАЛІЗАЦІЯМИ)

УДК 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.21>

Пашенко О. В., доктор фізико-математичних наук, професор,
завідувач відділу фазових перетворень
Донецького фізико-технічного інституту імені О. О. Галкіна
Національної академії наук України
ORCID: 0000-0002-7909-071X

Перкун І. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри
технології захисту навколишнього середовища та безпеки праці
Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу
ORCID: 0000-0002-6523-1606

Погребняк В. Г., доктор технічних наук, професор,
професор кафедри технології захисту навколишнього середовища
та безпеки праці
Івано-Франківського національного технічного університету
нафти і газу
ORCID: 0000-0002-6523-1606

ПІДВИЩЕННЯ БЕЗПЕКИ ПРАЦІ ПРИ ПРОВЕДЕННІ ГІДРОСТРУМІННОЇ ВОДОПОЛІМЕРНОЇ ПЕРФОРАЦІЇ СВЕРДЛОВИН

У статті акцентовано увагу на актуальності проблеми забезпечення безпечних умов праці при виконанні гідро-струмінної водополімерної перфорації свердловин – сучасної інноваційної безвибухової технології, що активно впроваджується в процесах освоєння та інтенсифікації видобутку нафти і газу. Такий підхід дозволяє суттєво знизити ризики, пов'язані з використанням традиційних вибухових методів, проте висуває нові вимоги до технічної безпеки, зокрема через застосування високих тисків. У процесі аналізу встановлено основні джерела небезпеки, що супроводжують зазначену технологію: перевищення допустимого рівня тиску, ймовірність виникнення гідравлічних ударів, а також помилки оператора, які можуть призвести до аварійних ситуацій. З метою зниження впливу людського чинника і мінімізації ризиків запропоновано впровадження автоматизованих систем керування технологічним процесом за рахунок створення інтелектуальних сенсорних систем контролю високого тиску. Для цього методом атомізаційного гідролізу було синтезовано магнітний нанопорошок $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_3$ (LSMO) та ущільнено під різним тиском до 1600 МПа. Було всебічно досліджено його фазовий склад, кристалічну структуру, морфологію, магнітні, магніторезонансні, транспортні, магнітоопірні та бароопірні властивості. Було показано, що зі збільшенням тиску до 1600 МПа коефіцієнт заповнення в компактах збільшується, зменшуючи середню відстань між частинками. У діапазоні кімнатних температур нанопорошок LSMO знаходиться у феромагнітному стані з температурою Кюрі 367 °К і не залежить від тиску ущільнення. Зі збільшенням тиску монотонне зменшення питомого опору зумовлене зменшенням відстані між частинками. Виявлено гігантський ефект бароопірності з встановленням наступних важливих прикладних властивостей: ефект бароопірності не обмежується температурою Кюрі та спостерігається як у феромагнітному, так і в парамагнітному станах; ефект бароопірності при постійному тиску незначно залежить від температури в широкому діапазоні від -193 до +127 °С; в діапазоні тисків від 0 до 400 МПа ефект бароопірності має найвищу чутливість, яка дорівнює 0,1%/МПа. Зроблено висновок щодо доцільності впровадження LSMO в системи безпечного управління процесами гідрострумінної водополімерної перфорації нафтових і газових свердловин.

Ключові слова: безпека праці, водополімерна перфорація, нафтогазові свердловини, нанопорошок, сенсорні системи.

Pashchenko A. V., Perkun I. V., Pogrebnyak V. G. Enhancing occupational safety in hydrojet water-polymer perforation of wells

The article focuses on the relevance of ensuring safe working conditions during hydrojet water-polymer perforation of wells – a modern innovative non-explosive technology that is actively implemented in oil and gas extraction and production intensification processes. This approach significantly reduces the risks associated with the use of traditional explosive methods; however, it introduces new safety requirements, particularly due to the application of high pressures. The analysis identifies the main sources of danger associated with this technology: exceeding the permissible pressure level, the likelihood of hydraulic shock, and operator errors that may lead to emergency situations. To reduce the impact of the human factor and minimize risks, the introduction of automated control systems for the technological process is proposed, through the creation of intelligent sensor systems for high-pressure monitoring. For this purpose, a magnetic $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_3$ (LSMO) nanopowder has been synthesized by atomization hydrolysis and compacted under different pressures up to 1600 MPa. Their phase composition, crystal structure, morphology, magnetic, magneto-resonance, transport, magnetoresistance, and baroresistance properties have been comprehensively studied. As the pressure increases to 1600 MPa, the filling factor in the compacts increases, decreasing the average distance between particles. In the room temperature range, the LSMO nanopowder is in a ferromagnetic state with a Curie temperature 367 °K and does not depend on the compacting pressure. With increasing pressures, a monotonic decrease in resistivity is due to reducing the distance between particles. Giant baroresistance effect with the establishment of the following important applied properties has been found: baroresistance effect is not limited by the Curie temperature and is observed both in the ferromagnetic and paramagnetic states; the baroresistance effect under constant pressure slightly depends on the temperature in a wide range from – 193 to + 127 °C; in the pressure range from 0 to 400 MPa, the baroresistance effect has the highest sensitivity, which is 0.1%/MPa. The conclusion is made regarding the feasibility of implementing LSMO in safe control systems for hydrojet water-polymer perforation of oil and gas wells.

Key words: occupational safety; water-polymer perforation, oil and gas wells, nanopowder, sensor systems.

Постановка проблеми. Гідроструминна водополімерна перфорація (ГВП) є інноваційною технологією у сфері освоєння нафтових і газових свердловин, що дозволяє створювати перфораційні канали без використання вибухових речовин [1,2]. Проте, як і будь-яка технологічна операція у нафтогазовидобутку, ГВП супроводжується певними ризиками для працівників і навколишнього середовища. Основними компонентами процесу ГВП є: насадка установка високого тиску; спеціалізований гідроперфоратор; робоча рідина – вода з полімерними домішками; контрольна апаратура та системи дистанційного управління. До можливих джерел небезпеки необхідно віднести: перевищення тиску в системі; гідравлічні удари та розриви трубопроводів; пожежонебезпеку при наявності залишків газу в свердловині; втома або помилки персоналу при управлінні системами під високим тиском. Робота водополімерного перфоратора передбачає використання високих тисків у діапазоні від 100 МПа та вище [2–4]. Питання безпеки праці стають особливо актуальними в умовах високого тиску.

Підвищення рівня безпеки праці під час виконання гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин можливе шляхом впровадження сучасних технічних засобів контролю, що вимагає створення пристроїв захисного відключення і датчиків автоматичного контролю тиску. Такий пристрій може бути розроблений на основі магнітного наноматеріалу, для якого встановлені закономірності зміни властивостей чутливого сенсорного елемента від зовнішнього тиску. Своєчасне виявлення та усунення потенційних загроз сприятиме не лише збереженню здоров'я працівників, а й забезпеченню стабільності виробничого процесу.

Постановка завдання. Метою статті є: визначення складу та технологічних умов для синтезу магнітного нанопорошку, як функціонального матеріалу для пристроїв захисного відключення та контролю за високим тиском при проведенні гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин;

– синтез магнітних нанопорошків з функціональними властивостями, що дозволять забезпечити контроль тиску в процесі роботи водополімерного перфоратора;

– проведення сучасними методами дослідження функціональних властивостей наноматеріалу та встановлення закономірностей впливу складу, дисперсності та тиску на резистивні, магнітні, магніторезистивні та барорезистивні властивості синтезованого магнітного нанопорошку;

– визначення оптимального складу та чутливості щодо барорезистивного ефекту магнітного нанопорошку, який забезпечуватиме надійний моніторинг високого тиску у важкодоступних місцях свердловин з можливістю інтелектуального управління безпечною роботою обладнання.

Створення такого магнітного нанопорошку та впровадження його в пружну діелектричну матрицю дозволить отримати нанокомпозит з ефектом магнітної пам'яті та з властивостями магнітоактивного еластомеру, що дозволить використовувати функціональні властивості нового магнітного нанопорошку при створенні датчиків високого тиску для сучасних інтелектуальних систем управління технологічними процесами і, відповідно, для підвищення безпеки праці при реалізації технологій з підвищеною небезпечкою [1,5–9].

Матеріали і методи. Вибір нанопорошку. Наноматеріали на основі рідкісноземельних манганітів $\text{Ln}_{1-x}\text{A}_x\text{MnO}_3$ ($\text{Ln} = \text{La}$ або рідкісноземельний іон) зі структурою перовскіту, в яких тривалентний Ln заміщений на одно- або двовалентний лужний або лужноземельний A -катіон, відносяться до перспективних

багатофункціональних матеріалів [10]. Наявність конкуруючих взаємодій [11] є причиною унікального співіснування магнітних [12], магніторезистивних [13], магнітокалоричних [14], електрокаталітичних, магнітотермічних [7] та магнітопружних [15] властивостей у одному матеріалі. Багатофункціональність манганітоперовскітів обумовлена унікальною властивістю валентних електронів марганцю брати участь як у перенесенні заряду з формуванням резистивних властивостей, так і в існуванні спін-поляризованого транспорту у феромагнітному стані, з яким пов'язана поява великої кількості гальваномангнітних ефектів [16]. У рідкісноземельних манганітах поблизу температури Кюрі T_C з'являється фазовий перехід «метал-напівпровідник», поблизу якого парамагнітний (PM) діелектрик з напівпровідниковим характером провідності вище T_C різко змінює свої властивості і стає феромагнітним (FM) напівпровідником з металевим типом провідності нижче T_C . Склад $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ манганіту зі стехіометричним співвідношенням $\text{La}:\text{Sr}:\text{Mn} = 0.7:0.3:1$ є феромагнетиком з високою температурою Кюрі $T_C \sim 370$ К. Невелика кількість ~ 10 mol.% надстехіометричного марганцю покращує функціональні властивості манганіту внаслідок підвищення магнітної однорідності [17]. Нестехіометричний склад $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_3$ (LSMO) є перспективним багатофункціональним матеріалом для його використання в прикладних цілях, оскільки має високу температуру Кюрі, велику намагніченість, високу магнітну однорідність та колосальний MR ефект у діапазоні кімнатних температур [18].

Особливий інтерес викликають нечисленні дослідження, у яких виявили ефект впливу зовнішнього тиску на функціональні властивості нанопорошкових пресувань на основі рідкісноземельних манганітів. У такому гранульованому композиті зарядовий та спиновий транспорт залежить не тільки від властивостей матеріалу, але й від розміру FM гранул, їхньої концентрації та відстані між ними. Наведені вище параметри нанокompозиту можна контролювати зовнішнім тиском. Поява барорезистивного ефекту обумовлена змінною питомою опору такого композиту під впливом зовнішнього тиску. Магнітний нанопорошок, укладений в пружну діелектричну матрицю, стає нанокompозитом з ефектом магнітної пам'яті та набором магнітних станів із властивостями, що залежать від зовнішнього тиску [19]. Встановлені закономірності впливу тиску на питомий опір і властивості магнітного LSMO нанопорошку дозволяють використовувати його як функціональний матеріал при створенні датчиків високого тиску.

Метод отримання. Нанопорошок $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_3$ (LSMO) отримували методом спільного осадження із стехіометричної суміші компонентів $\text{La}(\text{NO}_3)_3 \cdot x\text{H}_2\text{O}$ (99.9% metals basis), $\text{Sr}(\text{NO}_3)_2$ (ACS reagent, $\geq 99.0\%$) та $\text{Mn}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (purum p.a., $\geq 97.0\%$). Як складний розчин осадника використовували суміш (50% + 50%) карбонату амонію $(\text{NH}_4)_2\text{CO}_3$ (ACS reagent, $\geq 30.0\%$ NH_3 basis) + аміаку NH_4OH (puriss. p.a., $\geq 25\%$ NH_3 basis). Отриману після осадження суспензію перемішували і зливали в фільтр для промивання і віджимання твердої фази. Отриману пасту сушили при 200°C протягом 5 годин і термообробляли на повітрі для завершення повної кристалізації. Термообробку проводили при 650°C протягом 6 годин у режимі повільного нагрівання та охолодження. Зразки виготовляли з отриманого LSMO нанопорошку шляхом попереднього пресування під тиском 200 МПа в металевій прес-формі діаметром 10 mm. Вплив високого гідростатичного тиску на властивості зразків досліджували після їх допресування під тиском $P = 0, 200, 400, 800$ та 1600 МПа. В результаті було отримано 5 партій нанопорошкових пресувань LSMO-0, LSMO-200, LSMO-400, LSMO-800 та LSMO-1600 циліндричної форми з розміром 10×2 mm. Зразки всіх партій були досить міцними, що дозволило провести повний комплекс досліджень впливу високого тиску на структуру, морфологію та функціональні властивості пресування без їх мимовільного механічного руйнування.

Методи дослідження. Фазовий склад, симетрію структури та параметри елементарної комірки визначали рентгеноструктурним методом на автодифрактометрі ДРОН-3 при кімнатній температурі з геометрією зйомок Бреґ-Брентано. Рентгенівські вимірювання проводили в режимі сканування з кроком 0.02° в інтервалі кутів 2θ від 18° до 90° з часом експозиції в кожній точці 5 s. Рентгенофазовий аналіз був виконаний на підставі порівняльного аналізу положення максимумів та їх інтенсивностей з довідковими стандартами JCPDS. Щоб виключити вплив випадкових помилок у процесі вимірювання параметрів кристалічних ґрат застосовували комбінований метод графічної екстраполяції. Похибка вимірювань параметрів кристалічної решітки та визначення фазового складу становила менше 0.01 та 3%, відповідно.

Розмір D_{XRD} областей когерентного розсіювання (ОКР) та середній розмір D частинок визначали методом Селякова-Шерера щодо розширення дифракційних ліній. У нанопорошках рівність $D_{\text{XRD}} = D$ є коректною, якщо розмір частинок знаходиться в діапазоні від 1 до 100 нм. При розрахунку D_{XRD} використовували формулу Дебая-Шерера:

$$D = \frac{K_{\text{hkl}} \cdot \lambda}{\beta(2\theta) \cdot \cos(\theta)},$$

де K_{hkl} – постійна Шерера, значення якої залежить від форми частинки та індексів (hkl) дифракційного відображення, λ – довжина хвилі рентгенівського випромінювання, $\beta(2\theta)$ – справжнє фізичне розширення, θ – кут бреґівського відображення. Відносна похибка визначення розміру D_{XRD} та $\langle D \rangle$ становила $\sim 18\%$.

Визначення рентгенівської густини ρ_x проводили, використовуючи експериментальні рентгеноструктурні дані за формулою

$$\rho_x = \frac{Z \cdot M}{N_a \cdot V_{\text{cell}}},$$

де Z – число формульних одиниць, що припадають на одну елементарну комірку, M – молярна маса досліджуваної речовини, V_{cell} – об'єм елементарної комірки, $N_a = 6.022 \cdot 10^{23}$ моль⁻¹ – число Авогадро. При визначенні гідростатичної щільності пресування $\rho_v = m/V$ використовували масу m та об'єм V зразка. Похибка вимірювання рентгенівської ρ_x та гідростатичної ρ_v щільності становить 0.02% та 0.1%, відповідно.

Вимірювання питомої поверхні S_{ss} нанопорошку виконували методом Брюнера-Еммета-Теллера (BET) в атмосфері суміші інертних газів $N_2 + \text{He}$ при температурі рідкого азоту $T = 77$ °К. Питому поверхню S_{ss} визначали шляхом порівняння обсягів газу-адсорбату, адсорбованого досліджуваним порошком і стандартним зразком матеріалу з відомою питомою поверхнею. Похибка вимірювань питомої поверхні S_{ss} не перевищує 6%.

Визначення розміру частинки D_{BET} проводили для моделі частинок довільної форми за формулою [20]:

$$D_{\text{BET}} = 1 / (\rho_x \cdot S_{\text{ss}}),$$

де ρ_x – рентгенівська щільність, S_{ss} – площа питомої поверхні за даними методу BET. Відносна похибка розміру D_{BET} залежить від точності методу BET і становить 6%.

Візуалізацію мікроструктури з визначенням розміру наночастинок D_{SEM} проводили методом скануючої електронної мікроскопії (SEM) на растровому мікроскопі JSM-6490LV (JEOL, Japan). Фазовий та хімічний склад визначали за допомогою енергодисперсійного спектрометра INCA Penta FET3 (OXFORD Instruments, UK). Зйомку здійснювали в режимі вторинних (SEI) і розсіяних (BEI) електронів при прискорювальній напрузі 20 кВ з збільшенням в 30-20000 разів. Діаметр електронного пучка на поверхні зразка у його фокусуванні досягав 10 нм. Роздільна здатність SEM методу при даних параметрах візуалізації становить 3 нм із відносною похибкою визначення фазового складу 4%.

Розмір ультра дисперсних наночастинок визначали методом просвічуваної електронної мікроскопії (ТЕМ) на електронному мікроскопі JEM-200A («JEOL», Japan) при прискорювальній напрузі 200 кВ. При виготовленні реплік використовували ультразвуковий диспергатор при нанесенні суспензії нанопорошку на вугільну підкладку. Роздільна здатність мікроскопа при даному методі отримання реплік і збільшення в 100000 разів становила 1 нм.

Магнітні вимірювання диференціальної магнітної сприйнятливості χ_{ac} проводили модуляційним методом у змінному магнітному полі $h_{\text{ac}} = 0.1$ Ое на частоті $\nu = 600$ Гц у температурному діапазоні 77 – 400 °К. Польові залежності $\chi_{\text{ac}}(H)$ виміряли при постійному зовнішньому магнітному полі H від 0 до 1 кОе, спрямованому вздовж модуляційного поля h_{ac} . Вимірювання температурних залежностей $\chi_{\text{ac}}(T)$ проводили при природному нагріванні зразка зі швидкістю 1 К/хв з похибкою вимірювання температури ± 0.2 °К. При проведенні вимірювань вище за кімнатну температуру використовували біфілярно намотаний нагрівальний елемент. Відносна похибка вимірювання диференціальної магнітної сприйнятливості χ_{ac} не перевищує 3%.

Абсолютні значення магнітної сприйнятливості знаходили з урахуванням рівності

$$\chi = \frac{\chi_0}{1 + N\chi_0} = \frac{1}{N},$$

в якому магнітна сприйнятливості феромагнітного зразка χ визначається тільки його розмагнічуючим фактором N , оскільки у феромагнітному стані магнітна сприйнятливості речовини $\chi_0 \rightarrow \infty$. Калібрування проводили на еталонному зразку феромагнітного нікелю такої ж маси, що має форму кулі, для якої $N = 4\pi/3$.

Вимірювання спектрів ЯМР на ядрах ^{55}Mn , визначення резонансних частот, магнітних та валентних станів марганцю проводили двома імпульсним методом спінової луни [21] у діапазоні частот від 320 до 410 МГц. Запис спектрів здійснювали при температурі рідкого азоту $T = 77$ °К шляхом реєстрації залежності амплітуди сигналу відлуння від частоти коливань змінного магнітного поля під час дії збудливих імпульсів. Затримка між імпульсами становила 3–4 мкс. Похибка визначення частоти генератора становила 0.07 % або ± 250 кГц.

Вимірювання питомого опору ρ і температурних залежностей $\rho(T)$ проводили 4-зондовим методом у температурному діапазоні $T = 77\text{--}400$ °К зі стабілізацією вимірювального струму 1 мА. Контакти наносили механічним способом з використанням індію та срібної пасті. Вимірювання залежності $\rho(T)$ проводили при природному нагріванні зразка після його охолодження до температури рідкого азоту 77 °К. Швидкість нагрівання не перевищувала 1 К/хв. Точність визначення температури становила ± 0.2 К. При вимірах вище за кімнатну температуру використовували біфілярно намотаний нагрівальний елемент. Відносна похибка при визначенні питомого опору не перевищувала 0.5 %.

Магніторезистивний ефект визначали за формулою $MR = (\rho - \rho_H) / \rho$, використовуючи значення питомого опору ρ та ρ_H за відсутності магнітного поля та в полі $H = 2.3$ кОе відповідно. Температурні залежності $MR(T)$ вимірювали в температурному інтервалі від 77 до 400 К на тій же установці, що й питомий опір ρ . Польові залежності $MR(H)$ вимірювали в діапазоні від -1 до $+1$ кОе при $T = 77$ °К. Відносна похибка при вимірюванні MR не перевищувала 3%.

Барорезистивний ефект $BR = (\rho_0 - \rho_p) / \rho_0$ та його баричні залежності $BR(P)$ визначали у широкому діапазоні температур від 77 К (-196 °С) до 370 °К (+97 °С) з експериментальних значень питомого опору $\rho(T)$ LSMO пресувань, отриманих після їх допресування під тиском $P = 0$ (LSMO-0), 200 МПа (LSMO-200), 400 МПа (LSMO-400), 800 МПа (LSMO-800) та 1600 МПа (LSMO-1600). Відносна похибка BR не перевищувала 5%.

Виклад основного матеріалу. Структура, дисперсність та морфологія LSMO нанопорошка. Згідно з рентгеноструктурними даними LSMO нанопорошок був однофазним і містив ромбедрично спотворену $R\bar{3}c$ структуру перовскіту з параметрами елементарної комірки $a = 7.758 \text{ \AA}$ і $\alpha = 90.31^\circ$. На підставі механізму дефектоутворення [17] визначена молярна формула нанопорошку $\{La_{0.58}^{3+}Sr_{0.29}^{2+}Mn_{0.05}^{2+}V_{0.08}^{(c)}\}_A[Mn_{0.66}^{3+}Mn_{0.34}^{4+}]_B O_{2.88}^{2-}V_{0.12}^{(a)}$ і встановлено, що реальна структура містить різновалентні іони марганцю Mn_B^{4+} , Mn_B^{3+} і Mn_A^{2+} , а також катіонні $V^{(c)}$ та аніонні $V^{(a)}$ вакансії. Результати методу SEM підтвердили хімічний і фазовий склад LSMO порошку. З аналізу рентгеноструктурних даних було визначено рентгенівську щільність $\rho_x = 6.205 \text{ г/см}^3$ порошку та розмір областей когерентного розсіювання $D_{XRD} = 17 \pm 3$ нм (див. таблицю 1). Результати методу BET дозволили визначити питому поверхню $S_{ss} = 11.9 \text{ м}^2/\text{г}$ і середній розмір частинок $D_{BET} = 14 \pm 1$ нм. У LSMO нанопорошку зі збільшенням тиску пресування P від 0 до 1600 МПа відбулося збільшення гідростатичної щільності ρ_v від 3.31 до 3.90 г/см^3 , що зумовлено ущільненням частинок у порошок за рахунок зменшення відстані між ними.

На рис. 1 зображена морфологія LSMO нанопорошку за даними методу TEM. Частинки мають сферичну форму з гофрованим поверхневим шаром та середній розмір $D_{TEM} = 15 \pm 2$ нм. На підставі порівняльного аналізу D_{XRD} , D_{BET} та D_{TEM} розмірів визначено середній розмір частинок $\langle D \rangle = 14 \pm 2$ нм у LSMO нанопорошку.

Таблиця 1

Властивості нанопорошкових LSMO пресувань

Зразок	$\rho_x, \text{г/см}^3$	$\rho_v, \text{г/см}^3$	ρ_v/ρ_x	$S_{ss}, \text{м}^2/\text{г}$	Розмір частинок, нм		
					D_{XRD}	D_{BET}	D_{TEM}
LSMO-0	6.205	3.31	0.533	11.9	17±3	14±1	15±2
LSMO-200	6.205	3.32	0.535	11.9	17±3	14±1	15±2
LSMO-400	6.205	3.43	0.553	11.9	17±3	14±1	15±2
LSMO-800	6.205	3.77	0.608	11.9	17±3	14±1	15±2
LSMO-1600	6.205	3.90	0.628	11.9	17±3	14±1	15±2

Примітка: ρ_x – рентгенівська щільність, ρ_v – гідростатична щільність, ρ_v/ρ_x – коефіцієнт заповнення, S_{ss} – питома поверхня порошку, D_{XRD} – розмір областей когерентного розсіювання, D_{BET} та D_{TEM} – середній розмір часток за даними BET та TEM

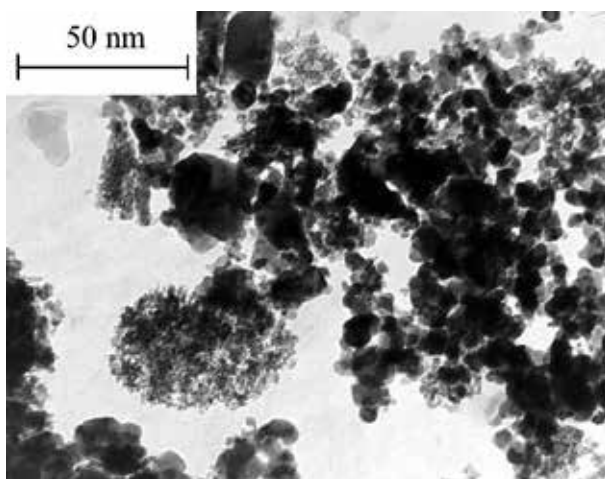


Рис. 1. Морфологія LSMO нанопорошку за даними методу TEM

Для монодисперсної системи, що складається із сферичних частинок, найбільша щільність упаковки без порушення форми та цілісності частинок досягається при коефіцієнті заповнення 0.74 [22]. При такому коефіцієнті заповнення максимальне значення гідростатичної щільності порошку LSMO не може перевищувати $0.74 \cdot \rho_x = 4.59 \text{ г/см}^3$. Як видно з таблиці 1 зі збільшенням тиску пресування від 200 до 1600 МПа, щільність упаковки збільшується від 72 до 85 % від її максимального значення 4.59 г/см^3 . Це дозволяє проводити

високочутливий моніторинг функціональних властивостей LSMO пресувань, в яких властивості пресування залежать від щільності упаковки, тобто від відстані між частинками. До таких властивостей відносяться питомий опір та магнітоопір FM частинок у діелектричній матриці [23] та їх баричні залежності.

Магнітні властивості LSMO нанопорошку. З температурних залежностей абсолютної магнітної сприйнятливості LSMO пресувань видно, що всі пресування знаходяться у FM стані з температурою Кюрі $T_C = 365$ °K (див. рис. 2).

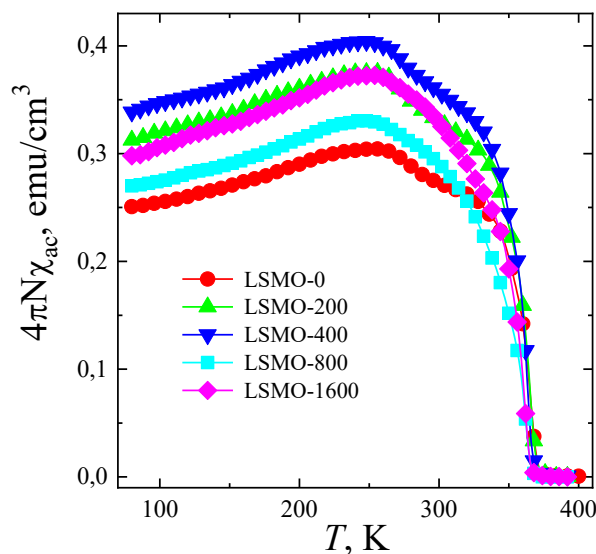


Рис. 2. Вплив зовнішнього тиску $P = 0$ (LSMO-0), 200 МПа (LSMO-200), 400 МПа (LSMO-400), 800 МПа (LSMO-800) та 1600 МПа (LSMO-1600) на температурні залежності абсолютної магнітної сприйнятливості $4\pi N\chi_{ac}(T)$ LSMO пресувань

Магнітна сприйнятливість показує немонотонний перебіг залежності зміни частки FM фази від тиску пресування. Спочатку вміст FM фази збільшується від 25.1 до 33.9 % зі збільшенням тиску пресування до $P = 400$ МПа, а потім зменшується до 29.8% за подальшого збільшення P до 1600 МПа. Такий немонотонний хід зміни частки FM фази обумовлений збільшенням антиферомагнітного або суперпарамагнітного вкладу від дипольних взаємодій при сильному зближенні FM наночастинок [24], яке відбувається під впливом зовнішнього тиску. Температура $T_C = 365$ °K не залежить від тиску в усьому діапазоні $P = 0$ –1600 МПа, що свідчить про відсутність впливу тиску на хімічний та фазовий склад пресувань, а також розмір FM частинок в LSMO порошку.

Магніторезонансні властивості LSMO нанопорошка. Симетричні спектри NMR ^{55}Mn (див. рис. 3) свідчать про FM характер взаємодій у LSMO нанопорошках та високий ступень магнітної однорідності оточення марганцю, що перебуває у стані високочастотного $\sim 10^{12}$ Гц подвійного обміну [5].

При апроксимації резонансних кривих функцією Гауса була визначена резонансна частота $F_0 = 375.4 \pm 0.1$ МГц та ширина резонансної кривої на її піввисоті $(\Delta F_0)_{1/2} = 21.7 \pm 0.2$ МГц.

Раніше було встановлено, що NMR-спектри від локалізованих станів Mn^{4+} та Mn^{3+} мають резонансні частоти $F_0 = 320$ МГц для Mn^{4+} [25] та $F_0 = 410$ МГц для Mn^{3+} [26,27]. Проміжне значення резонансної частоти $F_0 = 375.4$ МГц та її відсутність на частотах 320 та 410 МГц (див. рис. 3) свідчить про те, що марганець перебуває в стані змінної валентності $\text{Mn}^{\bar{w}+}$ із середнім значенням $\bar{w} = 3.4$, яке було отримано з формули [5]

$$\bar{w} = \frac{4F(\text{Mn}^{3+}) - 3F(\text{Mn}^{4+}) - F_0}{F(\text{Mn}^{3+}) - F(\text{Mn}^{4+})},$$

де F_0 – резонансна частота спектру NMR ^{55}Mn , $F(\text{Mn}^{3+})$ та $F(\text{Mn}^{4+})$ – резонансні частоти локалізованих станів Mn^{3+} і Mn^{4+} . Усереднена валентність $\bar{w} = 3.4$ означає, що при високочастотному подвійному обміні ймовірність знаходження марганцю в одній і тій же В-позиції в Mn^{3+} стані становить 60%, а в Mn^{4+} стані – 40%. Відсутність впливу тиску пресування на резонансну частоту $F_0 = 375.4$ МГц, усереднену валентність $\bar{w} = 3.4$ та магнітну однорідність $(\Delta F_0)_{1/2} = 21.7$ МГц означає еквівалентність магнітного стану для всіх пресувань. Розбіжності функціональних властивостей пресувань, отриманих при різних тисках пресування, будуть обумовлені лише різницею довжини тунелювання при переносі заряду між FM частинками.

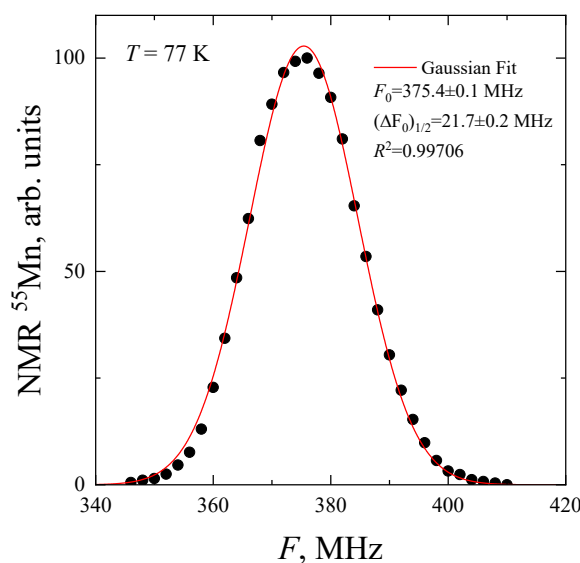


Рис. 3. Спектр NMR ^{55}Mn нанопорошку LSMO та його апроксимація функцією Гауса

Примітка: F_0 – резонансна частота, $(\Delta F_0)_{1/2}$ – ширина резонансної кривої її піввисоти

Транспортні та магнітотранспортні властивості LSMO пресувань. На рис. 4 наведено температурні залежності питомого опору $\rho(T)$ та магніторезистивного ефекту $MR(T)$. На залежностях $\rho(T)$ спостерігається напівпровідниковий тип провідності та відсутність фазового переходу «метал-напівпровідник». Зі зростанням тиску пресування відбувається монотонне зменшення ρ , зумовлене зменшенням відстані між наночастинками при ущільненні LSMO нанопорошку. Лінійний хід температурної залежності $\ln\rho(T)$ у всіх LSMO пресуваннях підтвердив термоактивовану природу активаційного процесу провідності тунельного типу.

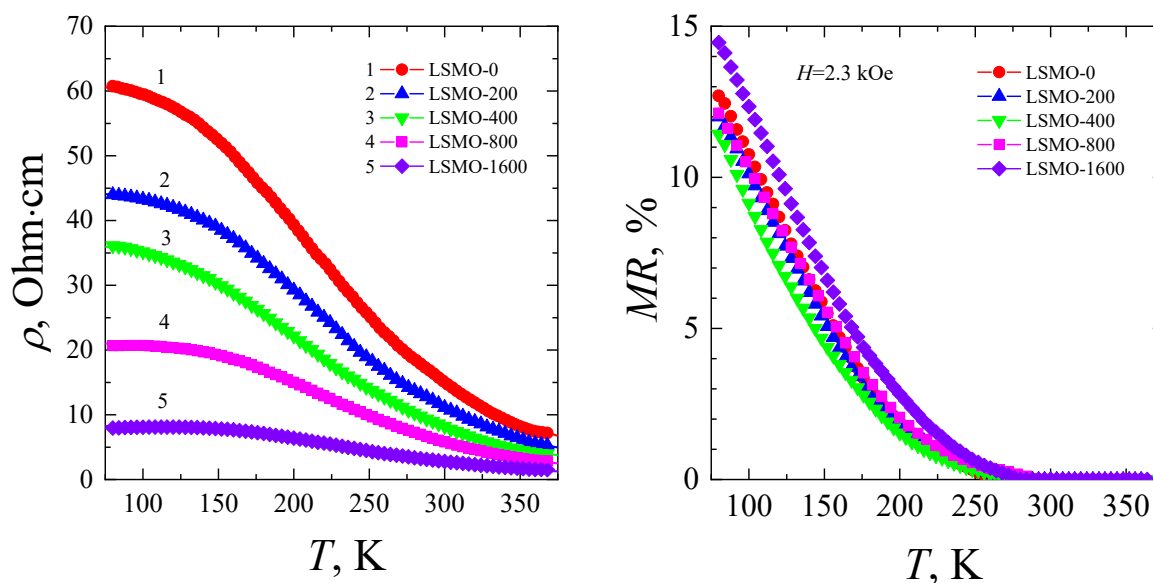


Рис. 4. Вплив тиску пресування $P = 0$ (1), 200 МПа (2), 400 МПа (3), 800 МПа (4) та 1600 МПа (5) на температурні залежності питомого опору $\rho(T)$ та магніторезистивного ефекту $MR(T)$ пресувань LSMO

Важливою характеристикою властивостей магніторезистивних функціональних матеріалів є температурна залежність $MR(T)$. З Рис. 4 видно, що зі зростанням тиску спостерігаються немонотонне збільшення MR ефекту тунельного типу [28]. При $T = 80$ °K у магнітному полі $H = 2.3$ kOe величина MR ефекту перебуває у діапазоні 12.7–14.5 %. MR ефект спочатку зменшується від 12.7 до 11.4 % із зростанням тиску P від 0 до 400 МПа, а потім збільшується до 12.1% при подальшому збільшенні тиску до 1600 МПа. Слід зазначити, що значення $MR > 10$ % для La-Sr-Mn систем вважається високим навіть для керамічних зразків [29]. Важливою функціональною особливістю LSMO пресувань є низька температура появи магнітоопору при

$T^{\text{baset}} = 282 \text{ }^{\circ}\text{K}$ ($9 \text{ }^{\circ}\text{C}$), що набагато нижче температури появи FM взаємодій при $T_{\text{C}} = 365 \text{ K}$ ($92 \text{ }^{\circ}\text{C}$). В об'ємних зразках повинна виконуватись рівність $T^{\text{baset}} \approx T_{\text{C}}$ [30]. Причиною появи сильної відмінності температур T^{baset} та T_{C} в LSMO нанопорошках є їхня ультрадисперсність, оскільки в ультрадисперсній магнітній наночастинці зі зменшенням її розміру спостерігається різке збільшення коерцитивності та часу релаксації на багато порядків. Низькі значення температури T^{baset} сильно обмежують функціональні можливості використання MR ефекту в прикладних цілях через низькі значення температури появи магнітоопору.

Барорезистивний ефект у LSMO пресуваннях. З рис. 5 видно, що в LSMO пресування спостерігається барорезистивний ефект $BR = (\rho_0 - \rho_p)/\rho_0$ у всьому широкому вимірювальному температурному інтервалі від 80 до 370 °K (від $-193 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+97 \text{ }^{\circ}\text{C}$). При збільшенні тиску пресування барорезистивний ефект досягає гігантських значень $BR = 28.2 \pm 1.3\%$ при $P = 200 \text{ МПа}$ (LSMO-200), $41.0 \pm 2.4 \%$ при $P = 400 \text{ МПа}$ (LSMO-400), $63.9 \pm 1.2 \%$ при $P = 800 \text{ МПа}$ (LSMO-800) та $84.0 \pm 1.7\%$ при $P = 1600 \text{ МПа}$ (LSMO-1600).

Відмінною особливістю BR ефекту є те, що він існує в дуже широкому температурному діапазоні від -193 до $+97 \text{ }^{\circ}\text{C}$ і, на відміну від MR ефекту, спостерігається як у FM, так і у стані PM незалежно від температури Кюрі. Більш того, як видно з ізотерм намагніченості (див. Рис. 5), величина BR ефекту залежить тільки від тиску P і з точністю похибки експерименту $\pm 5 \%$ залишається постійною у всьому температурному інтервалі від -193 до $+97 \text{ }^{\circ}\text{C}$.

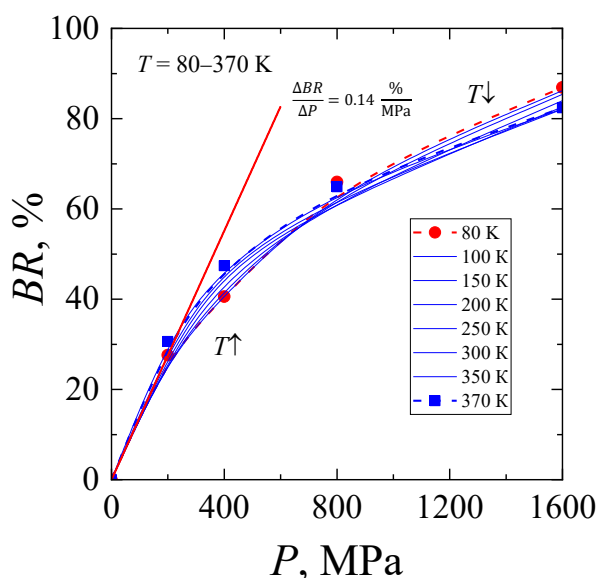


Рис. 5. Барорезистивний ефект у LSMO нанопорошку

Також слід відзначити високу чутливість BR ефекту $\frac{\Delta BR}{\Delta P} = 0.14 \frac{\%}{\text{МПа}}$ до зміни тиску на початковій стадії кривої $BR(T)$, що дозволяє використовувати магнітний нанопорошок LSMO у пристроях захисного відключення та контролю за тиском при виконанні гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин. А відсутність насичення при $P > 1 \text{ ГПа}$ є необхідною умовою при створенні датчиків високого та надвисокого тиску. Такі функціональні особливості LSMO пресування представляють великий інтерес з точки зору їх використання при створенні датчиків тиску для сучасних інтелектуальних систем управління технологічними процесами.

Дослідно-промислова апробація пристроїв захисного відключення і датчиків автоматичного контролю тиску з функціональними сенсорами на основі створеного наноматеріалу підтвердила їх високу ефективність в підвищенні рівня безпеки праці при виконанні гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин [1].

Висновки. Створений магнітний нанопорошок впроваджений в пружну діелектричну матрицю, дозволив отримати нанокомпозит з ефектом магнітної пам'яті та з властивостями магнітоактивного еластомеру, що дозволило використовувати функціональні властивості нового магнітного нанопорошку при створенні датчиків високого тиску для сучасних інтелектуальних систем управління технологічними процесами;

Наноматеріал з великим барорезистивним ефектом і запропонований концептуальний підхід використання його як елемента до функціональних сенсорів пристроїв захисного відключення та контролю за високим тиском є ефективним технічним засобом підвищення рівня безпеки праці під час виконання гідроструминної водополімерної перфорації нафтогазових свердловин.

Список використаних джерел:

1. Pogrebnyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyak A. V., Perkun I. V. Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution. *Nafta – Gaz*. 2022. № 78 (1), P. 3–12. doi: 10.18668/NG.2022.01.01.
2. Pogrebnyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyak A. V., Perkun I. V. High-efficiency Casing Perforation Oil and Gas Wells. *SOCAR Proceedings*. 2021. № 2, P. 112–120. doi: 10.5510/OGP2021SI200578.
3. Liu H., Wang F., Wang Y., Gao Y., Cheng J. Oil well perforation technology: Status and prospects. *Petroleum Exploration and Development*. 2014. № 41 (6), P. 798–804. doi: 10.1016/S1876-3804(14)60096-3.
4. Grove B., Werner A., Han C. Explosion-induced damage to oilwell perforating gun carriers. *WIT Transactions on the Built Environment*. 2006. № 87, P. 165–176. doi: 10.2495/SU060171.
5. Pashchenko A. V., Pashchenko V. P., Prokopenko V. K., Pogrebnyak V. G. [et al.]. Imperfection of the clustered perovskite structure, phase transitions, and magnetoresistive properties of ceramic $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1.2-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3\pm\delta}$ ($x = 0-0.3$). *Physics of the Solid State*. 2012. № 54 (4), P. 767–777. doi: 10.1134/S106378341204021X.
6. Wei Z., Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Pogrebnyak V. G. [et al.]. Multifunctionality of lanthanum-strontium manganite nanopowder. *Physical Chemistry Chemical Physics*. 2020. № 22(21), P. 11817–11828. doi: 10.1039/d0cp01426e.
7. Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Fesych I. V., Pogrebnyak V. G. [et al.]. Smart magnetic nanopowder based on the manganite perovskite for local hyperthermia. *RSC Advances*. 2020. № 10(51), P. 30907–30916. doi: 10.1039/d0ra06779b.
8. Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Li Q., Pogrebnyak V.G. [et al.]. Control of dielectric properties in bismuth ferrite multiferroic by compacting pressure. *Materials Chemistry and Physics*. 2021. № 258, art. 123925. doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123925
9. Liedienov N. A., Fesych I. V., Prokopenko V. K., Pashchenko A. V., Pogrebnyak V.G. [et al.]. Giant baroresistance effect in lanthanum-strontium manganite nanopowder compacts. *Journal of Alloys and Compounds*. 2023. № 938, art. 168591. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.168591.
10. Xia W., Pei Z., Leng K., Zhu X. Research Progress in Rare Earth-Doped Perovskite Manganite Oxide Nanostructures. *Nanoscale Research Letters*. 2020. № 15 (1), art. 9. doi: 10.1186/s11671-019-3243-0.
11. Tokura Y. Critical features of colossal magnetoresistive manganites. *Rep. Prog. Phys.* 2006. № 69 (3), P. 797–851.
12. Liedienov N.A., Kalita V.M., Pashchenko A.V., Dzhazheriya Yu.I. [et al.]. Critical Phenomena of Magnetization, Magnetocaloric Effect, and Superparamagnetism in Nanoparticles of Non-Stoichiometric Manganite. *J. Alloys Compd.* 2020. № 836, art. 155440. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155440.
13. Haghiri-Gosnet A.-M., Renard J.-P. CMR manganites: physics, thin films and devices. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2003. № 36 (8), P. R127 – R150. doi: 10.1088/0022-3727/36/8/201.
14. Liedienov N.A., Wei Ziyu, Kalita V. M., Pashchenko A.V. [et al.]. Spin-dependent magnetism and superparamagnetic contribution to the magnetocaloric effect of non-stoichiometric manganite nanoparticles. *Appl. Mater. Today*. 2022. № 26, art. 101340. doi: 10.1016/j.apmt.2021.101340.
15. Kundys B., Szymczak H. Magnetostriction in thin films of manganites and cobaltites. *Phys. Stat. Sol. (a)*. 2004. № 201(15), P. 3247–3251. doi: 10.1002/pssa.200405427.
16. Dörr K. Ferromagnetic manganites: spin-polarized conduction versus competing interactions. *J. Phys. D: Appl. Phys.* 2006. № 39(7), P. R125 – R150. doi: 10.1088/0022-3727/39/7/R01.
17. Pashchenko A. V., Pashchenko V. P., Prokopenko V. K., Revenko Yu. F. [et al.]. Influence of structure defects on functional properties of magnetoresistance ($\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}$) $1-x\text{Mn}1+x\text{O}_3$ ceramics. *Acta Materialia*. 2014. № 70, P. 218–227. doi: 10.1016/j.actamat.2014.02.014.
18. Dyakonov V., Ślawska-Waniewska A., Nedelko N., Zubov E. [et al.]. Magnetic, resonance and transport properties of nanopowder of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010. № 322 (20), P. 3072–3079. doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.032.
19. Mikhaylov V. I., Zubov E. E., Pashchenko A. V., Varyukhin V. N. (1999). Thermally activated conductivity and current-voltage characteristic of dielectric phase in granular metals. *J. Exp. Theor. Phys.*, 88 (4), 819–825. doi: 10.1134/1.558861.
20. Dyakonov V., Ślawska-Waniewska A., Nedelko N., Zubov E. [et al.]. Magnetic, resonance and transport properties of nanopowder of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2010) № 22 (20), P. 3072–3079. doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.032.
21. Savosta M. M., Kamenev V. I., Borodin V. A., Novák P., [et al.]. Ferromagnetic insulating state in manganites: ^{55}Mn NMR study. *Phys. Rev. B*. 2003. № 67 (9), art. 094403.
22. Blaak R. Optimal packing of polydisperse hard-sphere fluids. II. *J. Chem. Phys.* 2000. № 112 (20), P. 9041–9045. doi:10.1063/1.481515.
23. Shklovskii B.I., Efros A.L. Tunnel transparency of disordered systems in a magnetic field. *JETPh*. 1983. № 57 (5), P. 470–476.
24. Morup S., Hansen M.F., Frandsen C. Magnetic interactions between nanoparticles. *Beilstein J. Nanotechnol.* 2010. № 1, P. 182–190. doi: 10.3762/bjnano.1.22.

25. Kawasaki Y., Minami T., Kishimoto Y., Ohno T. [et al.]. Phase Separation in A-Site-Ordered Perovskite Manganite $\text{LaBaMn}_2\text{O}_6$ Probed by ^{139}La and ^{55}Mn NMR. *Physical Review Letters*. 2006. № 96(3), art. 037202. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.037202.
26. Papavassiliou G., Belesi M., Fardis M., Pissas M. [et. al.]. Orbital domain state and finite size scaling in ferromagnetic insulating manganites. *Physical Review Letters*. 2003. № 91(14), art. 147205. doi: 10.1103/PhysRevLett.91.147205.
27. Savosta M. M., Novák P., Jiráček Z., Hejtmánek J., Maryško M. Temperature Dependence of ^{55}Mn NMR in $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.15}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ and $\text{Pr}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ Ferromagnetic Manganites. *Physical Review Letters*. 1997. № 79 (21), P. 4278 – 4281. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.4278.
28. Hueso L. E., Rivas J., Rivadulla F., Lopez-Quintela M. A. Tuning of colossal magnetoresistance via grain size change in $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 1999. № 86(7), P. 3881–3884. doi: 10.1063/1.371303.
29. Pashchenko A.V., Pashchenko V.P., Prokopenko V.K., Revenko Yu.F., [et. al.]. The role of structural and magnetic inhomogeneities in the formation of magneto-transport properties of the $\text{La}_{0.6-x}\text{Sm}_x\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_{3-\delta}$ ceramics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*. 2016. № 416, P. 457–465. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.010.
30. Coey J. M. D., Viret M., Molnar S. Mixed-valence manganites. *Adv. Phys.* 1999. № 48 (2), P. 167–293. doi: 10.1080/000187399243455.

References:

1. Pogrebnyyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyyak A. V., Perkun I. V. (2022). Perforation of oil and gas wells by a high-velocity jet of polymer solution. *Nafta – Gaz*, no 78 (1), pp. 3–12. doi: 10.18668/NG.2022.01.01.
2. Pogrebnyyak V. G., Chudyk I. I., Pogrebnyyak A. V., Perkun I. V. (2021). High-efficiency Casing Perforation Oil and Gas Wells. *SOCAR Proceedings*, no. 2, pp. 112–120. doi: 10.5510/OGP2021SI200578.
3. Liu H., Wang F., Wang Y., Gao Y., Cheng J. (2014). Oil well perforation technology: Status and prospects. *Petroleum Exploration and Development*, no. 41 (6), pp. 798–804. doi: 10.1016/S1876-3804(14)60096-3.
4. Grove B., Werner A., Han C. (2006). Explosion-induced damage to oilwell perforating gun carriers. *WIT Transactions on the Built Environment*, no. 87, pp. 165–176. doi: 10.2495/SU060171.
5. Pashchenko A. V., Pashchenko V. P., Prokopenko V. K., Pogrebnyyak V. G. [et al.]. (2012). Imperfection of the clustered perovskite structure, phase transitions, and magnetoresistive properties of ceramic $\text{La}_{0.6}\text{Sr}_{0.2}\text{Mn}_{1.2-x}\text{Ni}_x\text{O}_{3\pm\delta}$ ($x = 0-0.3$). *Physics of the Solid State*, no. 54 (4), pp. 767–777. doi: 10.1134/S106378341204021X.
6. Wei Z., Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Pogrebnyyak V. G. [et al.]. (2020). Multifunctionality of lanthanum-strontium manganite nanopowder. *Physical Chemistry Chemical Physics*, no. 22(21), pp. 11817–11828. doi: 10.1039/d0cp01426e.
7. Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Fesych I. V., Pogrebnyyak V. G. [et al.]. (2020). Smart magnetic nanopowder based on the manganite perovskite for local hyperthermia. *RSC Advances*, no. 10(51), pp. 30907–30916. doi: 10.1039/d0ra06779b.
8. Pashchenko A. V., Liedienov N. A., Li Q., Pogrebnyyak V.G. [et al.]. (2021). Control of dielectric properties in bismuth ferrite multiferroic by compacting pressure. *Materials Chemistry and Physics*, no. 258, art. 123925. doi: 10.1016/j.matchemphys.2020.123925.
9. Liedienov N. A., Fesych I. V., Prokopenko V. K., Pashchenko A. V., Pogrebnyyak V.G. [et al.]. (2023). Giant baroresistance effect in lanthanum-strontium manganite nanopowder compacts. *Journal of Alloys and Compounds*, no. 938, art. 168591. doi: 10.1016/j.jallcom.2022.168591.
10. Xia W., Pei Z., Leng K., Zhu X. (2020). Research Progress in Rare Earth-Doped Perovskite Manganite Oxide Nanostructures. *Nanoscale Research Letters*, no. 15 (1), art. 9. doi: 10.1186/s11671-019-3243-0.
11. Tokura Y. (2006). Critical features of colossal magnetoresistive manganites. *Rep. Prog. Phys.*, no. 69 (3), pp. 797–851.
12. Liedienov N.A., Kalita V.M., Pashchenko A.V., Dzhezherya Yu.I. [et al.]. (2020). Critical Phenomena of Magnetization, Magnetocaloric Effect, and Superparamagnetism in Nanoparticles of Non-Stoichiometric Manganite. *J. Alloys Compd.*, no. 836, art. 155440. doi: 10.1016/j.jallcom.2020.155440.
13. Haghiri-Gosnet A.-M., Renard J.-P. (2003). CMR manganites: physics, thin films and devices. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, no. 36 (8), pp. R127 – R150. doi: 10.1088/0022-3727/36/8/201.
14. Liedienov N.A., Wei Ziyu, Kalita V. M., Pashchenko A.V. [et al.]. (2022). Spin-dependent magnetism and superparamagnetic contribution to the magnetocaloric effect of non-stoichiometric manganite nanoparticles. *Appl. Mater. Today*, no. 26, art. 101340. doi: 10.1016/j.apmt.2021.101340.
15. Kundys B., Szymczak H. (2004). Magnetostriction in thin films of manganites and cobaltites. *Phys. Stat. Sol. (a)*, no. 201(15), pp. 3247–3251. doi: 10.1002/pssa.200405427.
16. Dörr K. (2006). Ferromagnetic manganites: spin-polarized conduction versus competing interactions. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, pp/ 39 (7), pp. R125 – R150. doi: 10.1088/0022-3727/39/7/R01.

-
17. Pashchenko A. V., Pashchenko V. P., Prokopenko V. K., Revenko Yu. F. [et al.]. (2014). Influence of structure defects on functional properties of magnetoresistance $(\text{Nd}_{0.7}\text{Sr}_{0.3})_{1-x}\text{Mn}_{1+x}\text{O}_3$ ceramics. *Acta Materialia*, no. 70, pp. 218–227. doi: 10.1016/j.actamat.2014.02.014.
18. Dyakonov V., Ślawska-Waniewska A., Nedelko N., Zubov E. [et al.]. (2010). Magnetic, resonance and transport properties of nanopowder of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 322 (20), pp. 3072–3079. doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.032.
19. Mikhaylov V. I., Zubov E. E., Pashchenko A. V., Varyukhin V. N. (1999). Thermally activated conductivity and current-voltage characteristic of dielectric phase in granular metals. *J. Exp. Theor. Phys.*, no. 88 (4), pp. 819–825. doi: 10.1134/1.558861.
20. Dyakonov V., Ślawska-Waniewska A., Nedelko N., Zubov E. [et al.]. (2010). Magnetic, resonance and transport properties of nanopowder of $\text{La}_{0.7}\text{Sr}_{0.3}\text{MnO}_3$ manganites. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 322 (20), pp. 3072–3079. doi: 10.1016/j.jmmm.2010.05.032.
21. Savosta M. M., Kamenev V. I., Borodin V. A., Novák P., [et al.]. (2003). Ferromagnetic insulating state in manganites: ^{55}Mn NMR study. *Phys. Rev. B.*, no. 67 (9), art. 094403.
22. Blaak R. (2000). Optimal packing of polydisperse hard-sphere fluids. II. *J. Chem. Phys.*, no. 112 (20), pp. 9041–9045. doi:10.1063/1.481515.
23. Shklovskii B.I., Efros A.L. (1983). Tunnel transparency of disordered systems in a magnetic field. *JETPh.*, no. 57 (5), pp. 470–476.
24. Morup S., Hansen M.F., Frandsen C. (2010). Magnetic interactions between nanoparticles. *Beilstein J. Nanotechnol.*, no. 1, pp. 182–190. doi: 10.3762/bjnano.1.22.
25. Kawasaki Y., Minami T., Kishimoto Y., Ohno T. [et al.]. (2006). Phase Separation in A-Site-Ordered Perovskite Manganite $\text{LaBaMn}_2\text{O}_6$ Probed by ^{139}La and ^{55}Mn NMR. *Physical Review Letters*, no. 96 (3), art. 037202. doi: 10.1103/PhysRevLett.96.037202.
26. Papavassiliou G., Belesi M., Fardis M., Pissas M. [et. al.]. (2003). Orbital domain state and finite size scaling in ferromagnetic insulating manganites. *Physical Review Letters*, no. 91 (14), art. 147205. doi: 10.1103/PhysRevLett.91.147205.
27. Savosta M. M., Novák P., Jiráček Z., Hejtmánek J., Maryško M. (1997). Temperature Dependence of ^{55}Mn NMR in $\text{Pr}_{0.7}\text{Ca}_{0.15}\text{Sr}_{0.15}\text{MnO}_3$ and $\text{Pr}_{0.7}\text{Ba}_{0.3}\text{MnO}_3$ Ferromagnetic Manganites. *Physical Review Letters*, no. 79 (21), pp. 4278 – 4281. doi: 10.1103/PhysRevLett.79.4278.
28. Hueso L. E., Rivas J., Rivadulla F., Lopez-Quintela M. A. (1999). Tuning of colossal magnetoresistance via grain size change in $\text{La}_{0.67}\text{Ca}_{0.33}\text{MnO}_3$. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 86(7), pp. 3881–3884. doi: 10.1063/1.371303.
29. Pashchenko A. V., Pashchenko V. P., Prokopenko V. K., Revenko Yu. F., [et. al.]. (2016). The role of structural and magnetic inhomogeneities in the formation of magneto-transport properties of the $\text{La}_{0.6-x}\text{Sm}_x\text{Sr}_{0.3}\text{Mn}_{1.1}\text{O}_{3-\delta}$ ceramics. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, no. 416, pp. 457–465. doi: 10.1016/j.jmmm.2016.05.010.
30. Coey J. M. D., Viret M., Molnar S. (1999). Mixed-valence manganites. *Adv. Phys.*, no. 48 (2), pp. 167–293. doi: 10.1080/000187399243455.

UDC 331.45

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.22>

Pogrebnyak A. V., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Perkun I. V., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor at the Department of Environmental Protection
Technology and Labor Safety
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-6523-1606

Pogrebnyak V. G., Doctor of Technical Sciences, Professor,
Professor at the Department of Environmental Protection Technology
and Labor Safety
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0002-6523-1606

Shymanskyi V. Ya., Associate Professor at the Department
of Environmental Protection Technology and Labor Safety
Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas
ORCID: 0000-0001-9962-8161

IMPROVEMENT OF LABOUR SAFETY AND SAFETY OF LIFE ACTIVITIES BY INCREASING THE EFFICIENCY OF WATER FIRE EXTINGUISHING SYSTEMS

Enhancing the level of occupational safety and safety of life activities for civil protection workers, such as firefighters and rescuers, is a priority task, especially during emergency response at industrial facilities. These specialists are frequently exposed to hazardous factors, notably high temperatures and intense thermal radiation. In this context, the search for ways to improve the efficiency of fire extinguishing systems is highly relevant. This work focuses on investigating opportunities to enhance water-based fire extinguishing systems through the application of polymer additives capable of reducing hydrodynamic drag, which, in turn, allows for an increase in the range and intensity of the fire extinguishing agent delivery.

During the research, the regularities of behavior and manifestations of elastic deformations in the flows of aqueous polymer solutions were studied. The experimental conditions were maximally approximated to the real conditions that occur in fire hoses during their operation on the territories of industrial enterprises. Analysis of the obtained data convincingly demonstrates that when developing and implementing technologies for reducing hydrodynamic drag by injecting polymer solutions into the boundary layer of the flow, it is necessary to consider the effects of elastic deformations of macromolecules. These deformations can significantly affect the final efficiency of the drag reduction process.

It was established that the observed decrease in the efficiency of fluid drag reduction when a polymer solution is supplied into the boundary layer of a fire hose is a complex result. It is caused by a combination of the deformational effect of the longitudinal hydrodynamic field, which is inevitably present in the polymer delivery system (pumps, injectors), and the specific molecular-concentration properties of the polymer solution itself (polymer type, its molecular weight, concentration). Uncontrolled deformations can lead to partial degradation of polymer chains or changes in their conformation, which negatively affects their ability to effectively suppress turbulent pulsations.

Understanding these processes is important not only for fire extinguishing systems but may also find application in other fields where high-velocity fluid jets with polymer additives are used, for example, in water-polymer perforation technologies, particularly in oil and gas wells.

Based on the conducted analysis, the paper outlines practical ways to increase the efficiency of systems for supplying polymer solutions into fire hoses. This includes recommendations regarding the design of injection units and the selection of optimal parameters for polymer solutions. The implementation of the proposed approaches will allow for an increase in the tactical and technical capabilities of water-based fire extinguishing systems, thereby improving the working conditions and safety of rescuers.

Key words: occupational safety, water-polymer perforation, oil and gas wells, fire, polymer solution.

© A. V. Pogrebnyak, I. V. Perkun, V. G. Pogrebnyak, V. Ya. Shymanskyi, 2025

Погребняк А. В., Перкун І. В., Погребняк В. Г., Шиманський В. Я. Підвищення рівня охорони праці та безпеки життєдіяльності шляхом удосконалення ефективності водяних систем пожежогашіння

Підвищення рівня охорони праці та безпеки життєдіяльності працівників цивільного захисту, таких як пожежники та рятувальники, є пріоритетним завданням, особливо при ліквідації надзвичайних ситуацій на промислових об'єктах. Ці фахівці часто піддаються впливу небезпечних факторів, зокрема високих температур та інтенсивного теплового випромінювання. У зв'язку з цим, актуальним є пошук шляхів підвищення ефективності систем пожежогашіння. Дана робота зосереджена на дослідженні можливостей удосконалення водяних систем пожежогашіння шляхом застосування полімерних добавок, здатних знижувати гідродинамічний опір, що, в свою чергу, дозволяє збільшити дальність та інтенсивність подачі вогнегасної речовини.

У ході дослідження було вивчено закономірності поведінки та прояви пружних деформацій у потоках водних розчинів полімерів. Експериментальні умови були максимально наближені до реальних умов, що виникають у пожежних рукавах під час їх експлуатації на територіях промислових підприємств. Аналіз отриманих даних переконливо демонструє, що при розробці та впровадженні технологій зниження гідродинамічного опору шляхом інжекції полімерних розчинів у примежовий шар потоку необхідно враховувати ефекти пружних деформацій макромолекул. Ці деформації можуть суттєво впливати на кінцеву ефективність процесу зниження опору.

Було встановлено, що спостережуване зменшення ефективності зниження опору рідини при подачі полімерного розчину в примежовий шар пожежного рукава є комплексним результатом. Воно зумовлене поєднанням деформаційного впливу поздовжнього гідродинамічного поля, яке неминуче присутнє в системі подачі полімеру (інжектори), та специфічними молекулярно-концентраційними властивостями самого полімерного розчину (тип полімеру, його молекулярна маса, концентрація). Неконтрольовані деформації можуть призводити до часткової деградації полімерних ланцюгів або зміни їхньої конформації, що негативно позначається на їхній здатності ефективно гасити турбулентне тертя.

Розуміння цих процесів є важливим не тільки для систем пожежогашіння, але й може знайти застосування в інших галузях, де використовуються високошвидкісні струмені рідин з полімерними добавками, наприклад, у технологіях водополімерної перфорації, зокрема нафтогазових свердловин.

На основі проведеного аналізу в роботі окреслено практичні шляхи підвищення ефективності систем подачі полімерних розчинів у пожежні рукави. Це включає рекомендації щодо конструкції вузлів введення та вибору оптимальних параметрів полімерних розчинів. Реалізація запропонованих підходів дозволить підвищити тактико-технічні можливості водяних систем пожежогашіння, тим самим покращуючи умови праці та безпеку рятувальників.

Ключові слова: охорона праці, водополімерна перфорація, нафтогазові свердловини, пожежа, розчин полімеру.

Statement of the problem. Open fire is one of the dangerous factors, especially on the territories of industrial facilities. It is also considered to be quite an important environmental factor, which under certain circumstances leads not only to deterioration of working conditions of operational personnel at a particular facility, but also to severe environmental pollution. This is especially true of firefighters, rescuers and other civil protection workers who are subjected to harmful effects of high temperature, thermal radiation, as well as hazardous combustion products while eliminating emergency situations [1,2]. Improvement of working conditions during emergency rescue operations can be achieved by reducing their conduct time, as well as by increasing a distance between a rescuer and ignition point. This can be achieved by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems. An increase of work efficiency of the fire extinguishing systems is one of important engineer- technological measures that allows to decrease the influence of the combustion products on a biosphere and to increase level of safety on the territories of industrial facilities. Reduction of hydrodynamic resistance of fire hoses and pipelines allows to improve the efficiency of water-based fire-suppression systems which are the most widespread and feasible methods of the fire-fighting on the territories of industrial facilities [1].

Among the well-known methods of the decrease in the hydrodynamic drag resistance through the artificial modification of the boundary layer of the fire hoses, the method of the introduction of the polymer solutions is almost unique, and certain practical results have been achieved in its development. The study has shown that the introduction of small amounts of polyethylene oxide (PEO) and polyacrylamide (PAA) into the fire-suppression liquids (water and water solutions of surfactants) make it possible to significantly (down to 80%) reduce the hydrodynamic drag resistance [1–6]. This reduction (when other parameters of the hydraulic system are unchanged) ensures that the capacity of the fire-fighting systems is 1.5–2 times higher, or the length of the fire hoses may be 3–5 times higher, or the pump power consumption may be decreased by 60–70%, or the diameter of the fire-suppression pipes may be decreased by 15–20%. Besides, it has been shown that the additions of the polymers to water or surfactant solutions considerably improve their fire-suppression properties [1,2].

This study relates to the hydrodynamics of the polymer solutions in the pipelines and problem of the improvement of the introduction devices. The hydrodynamics of polymer solutions at the polymer introduction into the boundary layer of the fire hoses has not been examined properly. It is assumed that in case of the flow of polymer solutions through the slots and other elements of the introduction systems, essential “anomalies”, which could considerably affect the Toms effect, cannot be observed [1–5]. Such a conclusion is based on the analysis of the data obtained from the study of the shear laminar flows where the effects of elastic deformations are insignificant. In the introduction systems a complex flow is dominant and it consists of superposition of the shear and predominantly

longitudinal (with stretching) flow. In case of such complex flows, the effects of elastic deformations become so significant that it may result in lessening the potential effect of the polymer additives, especially at high velocities of the flow of the fire-suppressing liquids.

Presentation of the main material. Water solutions of polyethylene oxide with the molecular masses $2 \cdot 10^6$ and $4 \cdot 10^6$ were investigated. The mass fraction of polymer was varied from 0 to 0.3%, temperature during experiments – 25°C . To achieve the required temperatures polymer solution, utilized customized thermostatzation [7,8]. The temperature stabilization was maintained at the specified level with precision up to $\pm 0.1^\circ\text{C}$.

Solutions of fully dissolved polymer were prepared in dark vessel by dissolving the ethanol-polymer suspension in distilled water at room temperature during 2–3 days or by dilution of the previously prepared solutions of polymer (0.1%, 0.2% and 0.5%) during 7–8 days before the desired concentration. Since water solutions of PEO significantly change properties at the upon prolonged storage, conformities to law of their aging process in water were preliminary studied and stabilizers to exclude it were chosen. The addition of 0.05% by mass potassium iodide solution in the PEO and PAA, which almost completely eliminates the aging of these polymers in water during storage and does not effect on the hydrodynamic activity, are used as such stabilizer [8].

We used a special hydrodynamic bench that allows achieving the exhaust velocities of the water flow through its channel of up to 35 m/s; the channel's length was 8.5 m. Orifices for measuring the pressure and for the sensors of friction force were placed on the lower wall of the channel. The injection system consisted of a dosing unit, under-slot chamber ensuring different conditions of the deformation of the polymer solution (by changing the entrance angle) at the entrance to the slot. The angle between the injected polymer stream and the wall did not vary. The following characteristics have been variable: the angle of the opening of the slot β (the angle of the entrance to the slot), concentration of the injected polymer solution, velocity of the injection, molecular mass, polymer brand, and velocity of the fire suppressing liquid (water).

The purpose of the article. The aim of this paper is to investigate methods for improving water-based fire extinguishing systems by utilizing polymer additives. This research specifically focuses on how these additives can reduce hydrodynamic drag in fire hoses, thereby increasing the projection range and intensity of the extinguishing agent. The study explores the behavior and manifestations of elastic deformations within aqueous polymer solution flows, under conditions closely simulating real-world scenarios in fire hoses at industrial facilities. A key objective is to understand how these elastic deformations impact the overall efficiency of the drag reduction process. Ultimately, this work seeks to provide insights that will contribute to enhancing the occupational safety of firefighters and rescuers during emergency operations.

Results and discussion. This paper regularities and manifestations of the elastic deformations of the polymer flow are investigated under conditions close to that of the real flows of the fire hoses in the territories of industrial facilities (at oilfield territories). The experiments described below were conducted in order to establish the conformities to law of manifestation of elastic deformations in the flow of polymer solutions under conditions typical for the internal problem in relation to the fire hoses and pipelines.

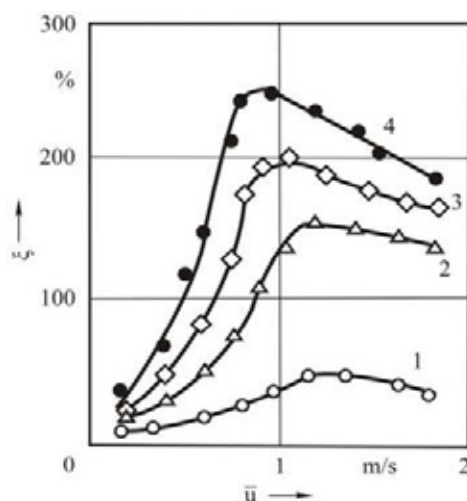


Fig. 1. Influence of $\bar{u}$ and angle of entrance into a slot on the relative pressure differential

Note: Mol. mass: $4 \cdot 10^6$, $C_{PEO} = 0.1\%$; β° : 1 – 9° , 2 – 13° , 3 – 22° , 4 – 34°

In figure 1, the experimental data related to the flow of polyethylene oxide (PEO) water solutions through the underslot camera are shown. It is clear that the phenomena, unusual for purely viscous mediums, are inherent for such flows. At a certain critical (threshold) average exhaust velocity $\bar{u}$, the relative pressure differential ξ'

increases sharply, and it is sharper at the higher polymer concentrations. The characteristics of the dependence $\xi' = f(\bar{u})$ indicate the high dissipation of energy in the polymer solutions flow through the injector, i.e. the increased hydrodynamic drag resistance is served at the supercritical flow rates.

The presented experimental data corresponds to the results obtained from the study of the flow of the polymer solutions under the simulated conditions such as through short capillary tubes and slots. These flows were thoroughly investigated in paper [6]. There should be stressed the most important moments of the elastic stress effects in the polymer solution flows with stretching. Transition to a flow mode with increased energy dissipation is accompanied by formation of so called “inlet flooded jet” as a “cord” or “fillet” enclosed by secondary flows in the shape of ring-shaped vortex. In case of the supercritical flow mode for polymer concentrations ranged from very diluted to moderately concentrated, the hydrodynamic field causes rather strong deformation effects on molecular chains. The uncoiled part of a polymer chain may be as large as 60–70% [9]. In half-diluted and moderately concentrated polymer solutions, the relaxation times of the fully stretched and slightly deformed individual chains differ more than by 2 orders of magnitude. The reason for such a large time for the curling of the polymer chain is supermolecular structures formed in the hydrodynamic field. This is reflected in the decrease of turbulent friction if the lifetime of supermolecular formations in the polymer solution at the moment of its introduction to the boundary layer is comparable to the residence time in the fire hose at industrial territories.

The results of the polymer solution injection onto the lower wall of the channel through the underslot chambers with varying angles of the entrance to the slot shows (figure 2), that when the polymer solution is introduced onto the inner surface of the fire hose at low angles of the entrance to the slot, the drop in the tangent stresses of friction is exhibited practically right behind the point of the introduction of the polymer to the flow.

If the polymer solution is introduced into the boundary layer through the chamber with a large angle of the entrance, there is a delay in development of hydrodynamic activity of the polymer molecules.

It should be mentioned that the distribution of the tangent stresses and relative pressure losses along the channel correlate with each other. As it follows from the results shown in figure 2, the change of the mode of the polymer introduction through the under slot camera from weakly dissipative to strongly dissipative by modification of the entrance conditions results in double decrease in the drag resistance coefficient.

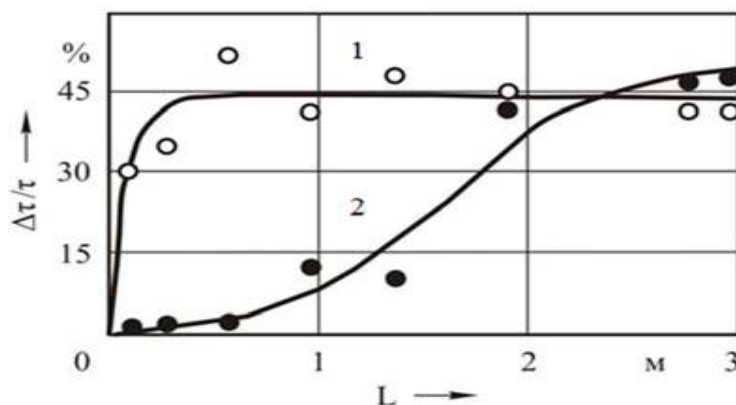


Fig. 2. Influence of the angle of the entrance to the slot on the distribution of the decrease in the tangent stresses along the lower wall of the channel for the injections of PEO solutions

Note: Mol. mass: $2 \cdot 10^6$, $C_{PEO} = 0.3\%$, $V_0 = 16.5$ m/s, $Q = 50$ cm^3/s ; β° : 1 – 7.8° , 2 – 165°

There has been (figure 3) registered a considerably larger divergence in the plots of the drop of the resistance versus the changing concentrations of the polymer in case of the introduction of the polymer onto the inner surface of the fire hose under conditions of strong deformation effect of the hydrodynamic field on the injected solution, compared to the weak gradient effect.

The visualization of the flows of the polymer solution in the underslot chamber shows that the conditions of the entrance render influence on the drop of hydrodynamic resistance only when there is a loss of stability of the flow caused by the formation of the dynamic supermolecular structures which sharply increase the dissipatedness of the flow. The reduction of efficiency of the polymeric solution due to the deformation effects in the introduction system may be as large as 25% or higher at $V_0 > 15$ m/s. The increase in the rate of the water flow results in the expansion of the area with the reduced hydrodynamic activity of the polymer.

The significance of the area with the reduced hydrodynamic activity of the polymer introduced into the boundary layer is the more, the less is the length of the fire hose. It may be explained by the fact that the lifetime of the derivative structures under conditions of the flow with stretching is in the order of magnitude of 0.1–0.2 s or higher. This is the time during which the polymer after leaving the slot in the fire hose has reduced activity due to its

memory. Obviously, the higher is the velocity of the water flow, the larger is the area behind the slot filled with the polymer solution under this condition, and its size is defined as:

$$l_{\lambda} = \theta_{sw} \cdot V_0 \quad (1)$$

where θ_{sw} – time of structural relaxation of the supermolecular formations,

V_0 – velocity of the filling flow.

Hence, for the velocity of the water flow of 25 m/s, this area should extend downwards along the stream to 2.5m, if $\theta_{sw} = 0.1$ s. The estimated size of the area with the reduced hydrodynamic activity of the polymer is in good correlation with the experimentally obtained results.

Specific concentration was used to plot a chart (figure 3)

$$\gamma = Q \cdot \frac{C_{PEO}}{\Omega \cdot V_0} \quad (2)$$

where Q – volume flow rate of the injected liquid,

C_{PEO} – concentration of the injected polymer solution (kg/m³),

Ω – moistened surface,

V_0 – velocity of the filling flow.

The results of the experiments with the introduction of the polymer solutions of the various concentration through the underslot camera with the changing angle of the entrance (figure 3) show that for the given specific average concentration of the polymer in the boundary layer the efficiency of the reduction of drag resistance is decreased with the growth of the concentration of the injected polymer solution, and it is the stronger, if the angle of the entrance is higher.

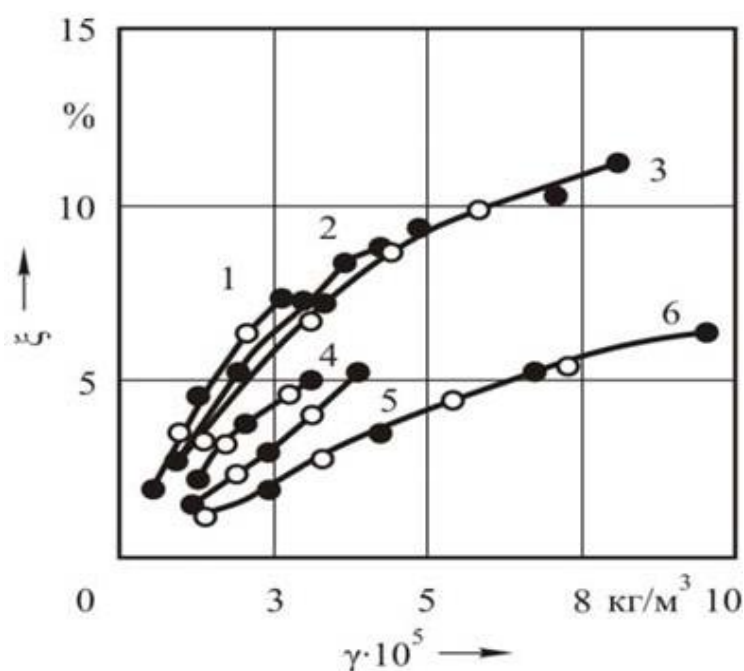


Fig. 3. Plot of the general pressure losses along the channel versus the specific concentration of PEO

Note: Mol. mass: $2 \cdot 10^6$; V_0 : $\bullet$ = 16.5 m/s, $\circ$ = 25 m/s; β° = 7.8° (1, 2, 3), β° = 165° (4, 5, 6); C_{PEO} : 1 and 4 – 0.05%, 2 and 5 – 0.1%, 3 and 6 – 0.3%

In [10], it was outlined a hypothesis that viscoelastic effects (swelling of the jet) near the slot strengthen the pull of the polymer solution by the external boundary layer and result in a faster decrease in the concentration of the polymer on the inner surface of the pipeline. The results obtained in [11] make us reconsider this hypothesis because the visualization of the flow behind the slot and the actual concentration of the polymer in the boundary layer have not evidenced to the increased diffusion of the polymer. Most feasible is the explanation based on the impact of the effective viscosity (taken in its broad sense) that does not contradict to the results of the studies on the hydrodynamic activity of the polymers under conditions of the introduction of the polymer solution to the fire suppression pipeline.

The dynamic structures of the polymer formed in the hydrodynamic field cause its compression, and this, of course, should cause a decrease in the diffusion of the polymer in the boundary layer.

The detected regularities of the manifestation of elastic deformations at the introduction of the polymer solution to the fire-suppression pipeline allow suggesting a method for evaluation of the flow resistance of the fire suppressant liquid with the polymer additives in it. The flow resistance of the liquid in the pipeline at the introduction of the polymer solution to the boundary layer caused by the elastic deformations can be determined as:

$$X = \int_0^{\ell_\lambda} \chi(x) \tau_{wo} dx + \int_{\ell_\lambda}^{\ell_p - \ell_\lambda} \chi(x) \tau_{wc} dx, \quad (3)$$

where χ is the perimeter of the pipeline cross-section,

τ_{wc} , τ_{wo} – tangential stresses with the introduction of the polymer to the boundary layer and without it,

ℓ_p – length of the pipeline,

ℓ_λ – length with the reduced hydrodynamic activity of the polymer.

The data obtained in this study shows that in solving the problems of drag reducing of the fire suppressing liquid in the fire hoses and pipeline by injecting the polymer solutions in the boundary layer, for the development of the optimum system of the introduction, it is necessary to take into account possible effects of the elastic deformations. The decrease in the effect of drag reduction at the introduction of the polymer solution into the boundary layer of the fire hose is due to the combination of the deformational effects of the longitudinal hydrodynamic field developed in the system of the injection and molecular-concentration characteristics of the polymeric solution.

Conclusions. This paper demonstrates the ways to improvement of labour safety and safety of life activities true of firefighters, rescuers and other civil protection workers who are subjected to harmful effects of high temperature, thermal radiation, as well as hazardous combustion products while eliminating emergency situations on the territories of industrial facilities by increasing the efficiency of water fire extinguishing systems.

Bibliography:

1. Симоненко А. П. Підвищення ефективності роботи пожежно-рятувальної техніки шляхом застосування гідродинамічної активності водорозчинних полімерних композицій. *Збірник наукових праць Національного університету цивільного захисту України: Проблеми пожежної безпеки*. 2012. Вип. 32. С. 195–206. URL: <https://surl.li/uozmq>
2. Baakeem S. S., Hashlamoun K., Hethnawi A., Mheibesh Y., Nassar N. Drag reduction by polymer additives: state-of-the-art advancements in experimental and numerical approaches. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024. Vol. 63. P. S1–S15. DOI:10.1021/acs.iecr.4c00202
3. Xi L. Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. *Physics of Fluids*. 2019. Vol. 31. Art. no. 121302. DOI:<https://doi.org/10.1063/1.5129619>
4. Müller H. W., Brandfellner L., Bismarck A. Long-term degradation of high molar mass poly(ethylene oxide) in a turbulent pilot-scale pipe flow. *Physics of Fluids*. 2023. Vol. 35. Art. no. 023102. DOI:<https://doi.org/10.1063/5.0131410>
5. Bonn D., Amarouchene Y., Wagner C., Cadot O. Turbulent drag reduction by polymers. *Journal of Physics: Condensed Matter*. 2005. Vol. 17. P. S1195–S1202. DOI:10.1088/0953-8984/17/14/008
6. Pogrebnyak V. G., Pisarenko A. A. Deformation effects in case of a flow with stretching of polymer solutions. *First Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. 1999. Doubletree Resort, Santa Barbara, California, USA. P. 1345–1350. DOI:10.1615/TSFP1.2160
7. Погребняк А., Погребняк В., Перкун І., Василів Н. Вплив геометричних та динамічних параметрів водополімерного струменя на характеристики процесу гідрорізання харчових продуктів. *Ukrainian Food Journal*. 2020. Vol. 9. P. 197–208. DOI:10.24263/2304-974X-2020-9-1-17
8. Karami H. R., Rahimi M., Ovaysi S. Degradation of drag reducing polymers in aqueous solutions. *Journal of Chemical Engineering*. 2018. Vol. 35. P. 34–43. DOI:10.1007/s11814-017-0264-1
9. Погребняк А., Чудик І., Погребняк В., Перкун І. Перехід клубок-розгорнутий ланцюг розчинів поліетиленоксиду при збіжній течії. *Chemistry and Chemical Technology*. 2019. Vol. 13. P. 465–470. DOI:<https://doi.org/10.23939/chcht13.04.465>
10. Wu J., Fruman D. H., Tulin M. P. Drag reduction by polymer diffusion at high Reynolds numbers. *Journal of Hydraulics*. 1978. Vol. 12. P. 134–136.
11. Fruman D. H., Galivel P. Anomalous effects connected with ejection of polymer, reducing resistance, in turbulent boundary layers of pure water. *Technical papers from the Symposium on Viscous Drag Reduction, Vought Advanced Technology Center Dallas Texas*. 1979. Vol. 72. P. 1233–1241.

References:

1. Symonenko, A. P. (2012). Pidvyshchennia efektyvnosti roboty pozhezhno-riatualnoi tekhniki shliakhom zastosuvannia hidrodynamichnoi aktyvnosti vodorozchynnykh polimernykh kompozytsii [Improving the efficiency

of firefighting equipment by applying the hydrodynamic activity of water-soluble polymer compositions]. *Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoho universytetu tsyvilnoho zakhystu Ukrainy: Problemy pozhezhnoi bezpeky*, 32, 195–206. <https://nuczu.edu.ua/sciencearchive/ProblemsOfFireSafety/vol32/simonenko.pdf>

2. Baakeem, S. S., Hashlamoun, K., Hethnawi, A., Mheibesh, Y., & Nassar, N. (2024). Drag reduction by polymer additives: state-of-the-art advancements in experimental and numerical approaches. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 63, S1–S15. DOI:10.1021/acs.iecr.4c00202

3. Xi, L. (2019). Turbulent drag reduction by polymer additives: Fundamentals and recent advances. *Physics of Fluids*, 31, 121302. <https://doi.org/10.1063/1.5129619>

4. Müller, H. W., Brandfellner, L., & Bismarck, A. (2023). Long-term degradation of high molar mass poly(ethylene oxide) in a turbulent pilot-scale pipe flow. *Physics of Fluids*, 35, 023102. <https://doi.org/10.1063/5.0131410>

5. Bonn, D., Amarouchene, Y., Wagner, C., & Cadot, O. (2005). Turbulent drag reduction by polymers. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 17, S1195–S1202. DOI:10.1088/0953-8984/17/14/008

6. Pogrebnyak V. G., Pisarenko A. A. (1999). Deformation effects in case of a flow with stretching of polymer solutions. *First Symposium on Turbulence and Shear Flow Phenomena*. Doubletree Resort, Santa Barbara, California, USA. 1345–1350. DOI:10.1615/TSFP1.2160

7. Pogrebnyak, A., Pogrebnyak, V., Perkun, I., & Vasylyv, N. (2020). Vplyv heometrychnykh ta dynamichnykh parametriv vodopolimernoho strumenia na kharakterystyky protsesu hidrorizannia kharchovykh produktiv [Influence of geometric and dynamic parameters of a water-polymer jet on characteristics of food products hydro-cutting process]. *Ukrainian Food Journal*, 9, 197–208. DOI:10.24263/2304-974X-2020-9-1-17

8. Karami, H. R., Rahimi, M., & Ovaysi, S. (2018). Degradation of drag reducing polymers in aqueous solutions. *Journal of Chemical Engineering*, 35, 34–43. DOI:10.1007/s11814-017-0264-1

9. Pogrebnyak, A., Chudyk, I., Pogrebnyak, V., & Perkun, I. (2019). Perekhid klubok-rozhornutyi lantsiuh rozchyniv polietylenoksydu pry zbizhnii techii [Coil-uncoiled chain transition of polyethylene oxide solutions under convergent flow]. *Chemistry and Chemical Technology*, 13, 465–470. <https://doi.org/10.23939/chcht13.04.465>

10. Wu, J., Fruman, D. H., & Tulin, M. P. (1978). Drag reduction by polymer diffusion at high Reynolds numbers. *Journal of Hydronautics*, 12, 134–136.

11. Fruman, D. H., & Galivel, P. (1979). Anomalous effects connected with ejection of polymer, reducing resistance, in turbulent boundary layers of pure water. *Technical papers from the Symposium on Viscous Drag Reduction, Vought Advanced Technology Center Dallas Texas*, 72, 1233–1241.

Рагулін С. В., кандидат технічних наук, доцент кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії Херсонського державного аграрно-економічного університету
ORCID: 0000-0001-8955-0380

РОЗРОБКА МЕТОДУ КЛАСИФІКАЦІЇ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВІДМОВ РАДІОЕЛЕКТРОННИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ, ЩО БАЗУЄТЬСЯ НА ТЕОРІЇ НЕЧІТКИХ МНОЖИН

Безперервне зростання складності радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден і розширення кола виконуваних ними функцій призвели до того, що для управління технічним станом радіоелектронних навігаційних систем, підприємства, що їх експлуатують змушені виконувати значний обсяг робіт з технічного обслуговування і ремонту. Експлуатаційні витрати на технічне обслуговування і ремонт радіоелектронних навігаційних систем в даний час досягають 30-40% від загальної вартості технічного обслуговування і ремонту повітряних суден [1]. Тому актуальним є питання підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту за рахунок зниження експлуатаційних витрат при збереженні льотної придатності та конкурентоспроможності повітряних суден.

У роботі проведено визначення критеріїв оптимізації технічного забезпечення радіоелектронних навігаційних систем на основі обґрунтування можливості використання різних технічних і техніко-економічних показників ефективності експлуатації, проведена класифікація радіоелектронних навігаційних систем за ознаками, які враховують специфічні особливості їх використання за призначенням. Проведена класифікація можливих варіантів стратегій технічного обслуговування і ремонту радіоелектронних навігаційних систем, які розрізняються рівнем діагностичного забезпечення і місцем відновлення блоків і модулів. Для правильного підходу до оптимізації обмінного фонду здійснена класифікація варіантів побудови системи управління запасами і визначена кількість рівнів зберігання запасів.

Відповідно до видів особливих ситуацій, встановленими нормами льотної придатності, класифіковано радіоелектронні навігаційні системи за ступенем впливу функціональних відмов на безпеку польотів повітряних судів. Розроблена класифікація на основі оцінки ймовірностей виникнення функціональних відмов в польоті за наявності інформації про показники надійності радіоелектронних навігаційних систем. Для варіанту відсутності статистичних даних для розрахунку ймовірнісних показників розроблено метод класифікації радіоелектронних навігаційних систем на основі логіко-лінгвістичному підходу з використанням теорії нечітких множин.

Ключові слова: критерії оптимізації, функціональні відмови, радіоелектронні навігаційні системи.

Rahulin S. V. Development of the method of classification of functional failures of radio electronic navigation systems based on the theory of fuzzy sets

The continuous increase in the complexity of radio electronic navigation systems of aircraft and the expansion of the circle of their functions have led to the fact that in order to manage the technical condition of radio electronic navigation systems, enterprises that operate forced to perform a considerable amount of work on maintenance and repair. The operating costs for maintenance and repair of radio electronic navigation systems are currently reaching 30-40% of the total cost of maintenance and repair of aircraft [1]. Therefore, it is urgent to increase the efficiency of the maintenance and repair system by reducing operating costs while maintaining flight shelf life and competitiveness of aircraft.

The work defines the criteria for optimizing the technical support of radio electronic navigation systems on the basis of substantiation of the possibility of using various technical and technical and economic indicators of efficiency of operation, classification of radio electronic navigation systems on the grounds that take into account the specific features of their use by purpose. Classification of possible variants of strategies for maintenance and repair of radio electronic navigation systems, which differ in the level of diagnostic support and place of restoration of blocks and modules. For the correct approach to optimization of the exchange fund, there is a classification of options for constructing the inventory management system and a determined number of storage levels of inventory. According to the types of special situations established by the standards of flight suitability, radio – electronic navigation systems were classified by the degree of influence of functional refusals on the safety of air courts. The classification was developed based on the probability assessment of functional failures in flight in the presence of information on reliability of radio electronic navigation systems. For the absence of statistics to calculate probabilistic indicators, the method of classification of radio electronic navigation systems was developed based on a logical-linguistic approach using fuzzy set theory.

Key words: optimization criteria, functional defines, radio electronic navigation systems.

Постановка проблеми. Сучасні повітряні судна оснащуються цифровими пілотажно-навігаційними комплексами нового покоління, в яких всі системи мають вбудовані системи контролю і конструктивно виконуються у вигляді ряду легкозамінного блоку. Безпека польотів сучасних повітряних суден забезпечується шляхом резервування радіоелектронних навігаційних систем, в той час як регулярність польотів – шляхом створення достатньої кількості запасних легкозамінних блоків в обмінному фонді базового аеропорту.

Висока інтеграція пілотажно-навігаційних комплексів і висока інтенсивність польотів повітряних суден призводить до того, що за результатами оперативного технічного обслуговування частину легкозамінних блоків помилково визнаються непрацездатними, демонтуються і відправляються на відновлення, приводячи до суттєвих недоліків. Згідно зі статистичними даними авіакомпаній від 40 до 85% демонтованих легкозамінних блоків радіоелектронних навігаційних систем насправді є працездатними [3-6]. Це породжує проблематику так званих непідтверджених дефектів. Північноамериканська авіаційна транспортна асоціація АТА оцінює щорічні втрати на рівні в середньому 100 тис. доларів на кожен середньомагістральний літак [2]. Велика кількість непідтверджених дефектів тягне за собою необхідність невинновданого збільшення обсягу обмінного фонду запасних легкозамінних блоків для підтримки регулярності польотів, що призводить до значних капітальних витрат. Зниження цих витрат можливо за рахунок використання наземних автоматизованих систем контролю, що здійснюють перевірку демонтованих блоків з високою достовірністю і запобігають помилкову відправку працездатних легкозамінних блоків на відновлення. Однак закупка та експлуатація наземних автоматизованих систем контролю також вимагає значних інвестицій.

Тому ефективність експлуатації повітряних суден безпосередньо визначається оптимальним варіантом організації системи технічного обслуговування і ремонту, вибір якого ґрунтується на вирішенні комплексу завдань діагностичного забезпечення, методичного, нормативного забезпечення та оптимального формування обмінного фонду.

Найважливішими етапами життєвого циклу радіоелектронних навігаційних систем є періоди гарантійного та післягарантійного обслуговування, які відрізняються різними підходами до оцінки вартісних, надійнісних та імовірнісних показників ефективності експлуатації, а також фінансовими та організаційними взаємовідносинами між постачальниками і експлуатантами. Тому методи і підходи до підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту відрізняються для кожного з періодів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Найбільш значний вплив на діяльність експлуатантів здійснює етап післягарантійного обслуговування оскільки основний фінансовий тягар по організації системи технічного обслуговування і ремонту лягає на плечі експлуатанта.

Відомі приклади вирішення окремих завдань підвищення ефективності системи технічного обслуговування і ремонту в роботах колективу дослідників С. В. Далецького, В. О. Ігнатова, О. П. Ковтуненка, Г. Ф. Конаховича, О. А. Тамаргазіна, В. В. Уланського.

Значний внесок у вирішення завдань підвищення технічної експлуатації на різних етапах експлуатації вніс І.О. Мачалін, який представив методологічні основи технічного обслуговування і ремонту повітряних суден. Проте питання, підвищення ефективності післягарантійного обслуговування висвітлені не повністю.

Таким чином, розробка методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування являє собою важливе народногосподарське наукове завдання спрямоване на удосконалення системи технічного обслуговування і ремонту, зниження експлуатаційних витрат і підтримки необхідного рівня безпеки та регулярності польотів повітряних суден.

Постановка завдання. Основною метою даної роботи є дослідження питання розробки методів підвищення ефективності експлуатації радіоелектронних навігаційних систем повітряних суден в період післягарантійного обслуговування.

Виклад основного матеріалу. Для вибору показників ефективності необхідно провести класифікацію РЕНС ПС за ознаками, які б враховували специфічні особливості їх використання за призначенням. Такими основними ознаками є: вплив систем на безпеку польотів (наслідки відмови) і можливість економічної оцінки наслідків відмови.

Для поділу множини різнотипних систем на підмножини використовуємо ієрархічну систему класифікації з порядкової реєстрацією окремих значень ознак [2].

Класифікацію будемо проводити за двома ознаками: ψ – ознака наслідків відмови; ϕ – ознака економічної оцінки наслідків відмови.

Відповідно до норм льотної придатності цивільних літаків [3] розрізняють такі особливі ситуації, що виникають у польоті при функціональних відмовах (ФВ) систем:

- ускладнення умов польоту (УУП), коли ситуація вимагає від екіпажу тільки уваги до джерела її виникнення і не вимагає екстрених дій для благополучного завершення польоту;
- складна ситуація (СС), при якій запобігання її переходу в аварійну або катастрофічну ситуацію може бути забезпечено своєчасними і правильними діями членів екіпажу, в тому числі негайною зміною плану, профілю та режиму польоту;

– аварійна ситуація (АС), що характеризується необхідністю екстреної посадки ПС і вимагає значного підвищення фізичних і психофізіологічних навантажень на екіпаж, високої професійної майстерності екіпажу для запобігання загибелі людей і втрати ПС;

– катастрофічна ситуація (КС), при якій практично неможливо запобігти загибелі людей і втрату ПС.

Ознака наслідків відмови. Встановлюються такі значення ознаки наслідків відмови: $\psi = 1$ – відповідає невиконанню системою покладених на неї відповідальних функцій в заданому обсязі, що приводить до УУП, ОС або АС; $\psi = 2$ – відповідає невиконанню системою покладених на неї відповідальних функцій в заданому обсязі при довільному моменті початку «режиму роботи», що приводить до УПП, ОС або АС; $\psi = 3$ – відповідає простою системи при користуванні її за призначенням і можливого простою, пов'язаного з відновленням (заміною).

При оцінці наслідків відмови значення ознаки $\psi = 1$ відповідає випадку, коли наслідки відмови впливають на безпеку польоту. Значення ознаки $\psi = 2$ відповідає випадку, коли система експлуатується в двох режимах. У першому режимі система знаходиться в режимі очікування до дії по тривозі, а в другому, після сигналу тривоги, система виконує відповідальні функції. Значення ознаки $\psi = 3$ відповідає випадку, коли система входить в MEL, а матеріальний збиток через відмову зумовлений простоєм системи при використанні за призначенням і (або) можливим простоєм, обумовленим відновленням працездатності системи на стоянці ПС.

Отже, на першому ступені класифікації вихідна множина РЕНС ψ_0 ділиться за ознакою ψ на три класи:

$$\psi_1, \psi_2, \psi_3, \text{ тобто } \psi_0 = \bigcup_{i=1}^3 \psi_i,$$

де $\bigcup$ – знак, що означає об'єднання підмножин.

Ознака економічної оцінки наслідків відмови. Приймає наступні значення: $\phi = 1$ – економічна оцінка можлива; $\phi = 2$ – економічна оцінка неможлива або її складно виконати в разі загибелі людей.

У випадку, коли наслідки відмови можна оцінити економічно, в якості показників ефективності обслуговування необхідно використовувати економічні показники у вигляді повних середніх експлуатаційних витрат (ПСЕЗ) або усереднених середніх витрат (витрат), наведених до часу експлуатації системи – підклас систем ψ_{31} .

Якщо матеріальний збиток від відмови системи, що належить класу ψ_3 , з якихось причин не вдається оцінити кількісно, то, для оцінки ефективності експлуатації доцільно використовувати критерій «надійність – витрати», який передбачає наявність двох показників ефективності. Один з них характеризує готовність системи до використання за призначенням, а другий – витрати на експлуатацію. Тому, в даному випадку, крім ПСЕЗ, в якості додаткового показника ефективності експлуатації слід використовувати комплексний показник надійності – коефіцієнт готовності (КГ).

Вибір цього показника пов'язаний з тим, що ПС експлуатуються в переривчастому часовому режимі. Його польоти чергуються з плановими простоями (стоянками) на Землі. Тому в основному заміна забракованих ЛБ здійснюється під час планових стоянок. При безперервному часовому режимі використанні, характерному для наземних РЕНС, непланові простой пов'язані не тільки з відмовами, але і з необхідністю відновлювальних робіт. Отже, при безперервному режимі використання РЕНС в аналогічній ситуації необхідно використовувати коефіцієнт технічного використання.

Таким чином, для підкласу РЕНС ψ_2 ефективність експлуатації необхідно характеризувати двома показниками ПСЕЗ і КГ. Причому до складу ПСЕЗ цьому випадку не входять втрати внаслідок відмови системи під час польоту. Якщо відмова системи призводить до невиконання покладених на неї відповідальних функцій, то домінуючим фактором при оцінці наслідків відмови в таких умовах є факт невиконання завдання. Тому класи ψ_1 і ψ_2 включають в себе тільки підкласи ψ_{12} і ψ_{22} , тобто $\psi_1 = \psi_{12}$ і $\psi_2 = \psi_{22}$.

Ефективність ТО підкласів РЕНС ψ_{12} і ψ_{22} також будемо оцінювати за допомогою двох показників, що характеризують відповідно експлуатаційну надійність системи і витрати на її експлуатацію. Як показник експлуатаційної надійності будемо використовувати експлуатаційну ймовірність безвідмовної роботи (ЕЙБР) для підкласу ψ_{12} і коефіцієнт оперативної готовності (КОГ) – для підкласу ψ_{22} .

Під ЕЙБР будемо розуміти ймовірність безвідмовної роботи системи на інтервалі напрацювання (t_k, t) з урахуванням того, що в моменти t_1, t_k проводилось ТО, що включає в себе експлуатаційний контроль і відновлення забракованих URUs [4,5].

Отже, на другому ступені класифікації залежно від значення ознаки ϕ , класи РЕНС поділяються на такі два підкласи:

$$\psi_1 = \psi_{12}, \psi_2 = \psi_{22}, \psi_3 = \psi_{31} \bigcup \psi_{32}.$$

Ієрархічна система класифікації РЕНС для вибору показників ефективності експлуатації показана на рис. 1.

В табл. 1 наведені шифри підкласів РЕНС і відповідні їм найменування показників ефективності. Тут прийняті наступні позначення: P_E – ЕЙБР; K_{OG} – КОГ; K_F – КГ.

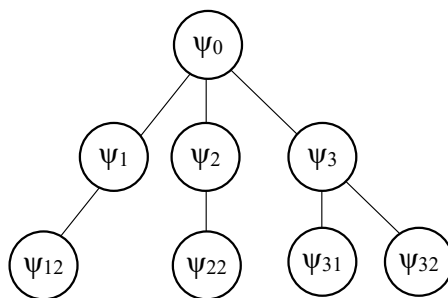


Рис. 1. Ієрархічна система класифікації РЕНС

Таблиця 1

Показники ефективності експлуатації

Клас РЕНС	Показники ефективності системи ТОіР
ψ_{31}	ПСЕЗ
ψ_{32}	ПСЕЗ, K_r
ψ_{12}	ПСЕЗ, P_E
ψ_{22}	ПСЕЗ, $K_{ог}$

Приклад 2.1. Визначити показники ефективності експлуатації короткохвильової системи посадки MLS.

Функціонування MLS впливає на безпеку польотів, так як у випадку відмови на етапі посадки можуть виникнути ситуації УУП або ОС. Тому для MLS наслідками відмови є факт невиконання відповідальних функцій, тобто $\psi = 1$. Економічна оцінка наслідків відмови не завжди можлива, тобто $\varphi = 2$.

Таким чином, MLS відноситься до підкласу ψ_{12} . Згідно з табл. 1, показниками ефективності експлуатації MLS є ПСЕЗ і ЕЙБР.

Приклад 2.2. Визначити показники ефективності експлуатації для автоматичного радіокомпасу (АРК).

Функціонування АРК не впливає на безпеку польотів ПС, оскільки при його відмові необхідна навігаційна інформація може бути отримана бортовою радіотехнічною системою ближньої навігації (РСБН). Тому, як правило, АРК входить в головний перелік мінімально-допустимого обладнання (ГПМДО). Наслідки відмови пов'язані з непрацездатністю АРК у польоті і з можливим простоем при заміні на стоянці літака ($\psi = 3$). Економічна оцінка збитку внаслідок непрацездатності АРК неможлива ($\varphi = 2$). Отже, АРК відноситься до підкласу ψ_{32} . Відповідно до табл. 1, показниками ефективності експлуатації є ПСЕЗ і КГ.

Однією з ознак для класифікації РЕНС є ознака наслідків відмови, тобто ступінь впливу систем на безпеку польотів. Для оцінки впливу РЕНС на безпеку польоту ПС необхідно провести аналіз позаштатних ситуацій, які можуть виникнути при відмові системи або її складової частини, що виконує ті ж функції. Надалі будемо вважати, що відмова складової частини системи (якщо система має резерв) або всієї системи є повною. При цьому система або її складова частина не може виконувати основні функції.

Визначення ступеня впливу ФВ РЕНС на безпеку польотів можливе за наявності такої інформації [6]:

- перелік функцій, які виконуються кожною РЕНС на різних етапах і в різних умовах польоту;
- наявність апаратурної та інформаційної надмірності по найбільш важливих функцій РЕНС;
- ступінь інформованості екіпажу про ФВ РЕНС;
- ймовірність виникнення тих чи інших ФВ і небезпечних ситуацій.

Аналіз проводиться в такій послідовності:

- з'ясовується кратність резерву виконуваних РЕНС функцій;
- визначається структура системи з точки зору надійності;
- обчислюються ймовірності різних сполучень ФВ основних і резервних с системи;
- встановлюється, з якими системами взаємодіє дана РЕНС в польоті і яку інформацію отримує і видає;
- досліджується можливість виконання функцій даної системи іншими РЕНС ПС;
- встановлюється характер появи ФВ і можливість його індикації інформаційними та сигналізують системами ПС;

- з'ясовується характер використання системи на різних етапах польоту ПС;
- проводиться класифікація РЕНС по класах особливих ситуацій.

Класифікацію РЕНС по класах особливих ситуацій пропонується проводити на підставі структурно-логічної схеми, наведеної на рис. 2, з якої видно, що для класифікації необхідно визначити значення ймовірності ФВ РЕНС протягом польоту [4,5]. Якщо відома експлуатаційна ймовірність безвідмовної роботи

(ЕЙБР-Р_Е), то ймовірність ФВ протягом польоту дорівнює $Q_E = 1 - P_E$. Далі необхідно задати допустиму ймовірність ФВ РЕНС в польоті.

У табл. 2 наведені допустимі ймовірності виникнення особливих ситуацій, які встановлені нормами льотної придатності.

На підставі табл. 4 можна визначити вимоги до нормування величини допустимої ймовірності ФВ в польоті Q_E^d .

Таким чином, якщо прийняти для $Q_E^d < 10^{-9}$, то значення допустимої ймовірності ФВ повинні лежати в межах, наведених в табл. 3.



Рис. 2. Структурно-логічна схема класифікації РЕНС по класах особливих подій

Таблиця 2

Допустимі ймовірності виникнення ФВ

Вид особливої ситуації	Допустимі ймовірності виникнення ФВ
Аварійна ситуація (АС)	$10^{-8} \leq Q_{ЕАС}^d < 10^{-7}$
Небезпечна ситуація (НС)	$10^{-7} \leq Q_{ЕНС}^d < 10^{-5}$
Ускладнення умов польоту (УУП)	$10^{-5} \leq Q_{ЕУУП}^d < 10^{-3}$
Без наслідків (БН)	$Q_{ЕБН}^d > 10^{-3}$

При оцінці ймовірностей ФВ РЕНС необхідно враховувати не тільки інтенсивності відмов ЛБ, а й основні параметри, що характеризують режим експлуатації і структуру систем. До таких параметрів відносяться періодичність виконання різних форм ТО, достовірність результатів експлуатаційного контролю, кратність резервування і тип структури системи з точки зору надійності. Тому необхідно розробити вирази для розрахунку ймовірностей відмови РЕНС, що враховують параметри режиму експлуатації.

Для використання розглянутих вище імовірнісних показників для класифікації РЕНС за ступенем їх впливу на БП та оцінки ймовірностей виникнення ФВ в польоті необхідно мати розрахункові значення показників надійності РЕНС або мати статистичну інформацію про відмови, що на етапі проектування ПС не завжди можливо. Крім того, імовірнісні показники не дозволяють оцінити можливість прояву всіх ситуацій в процесі польоту ПС, до яких можуть призвести ФВ. Такими ситуаціями, видно з рис. 2, можуть бути: зміна техніки пілотування при відмові систем на різних етапах польоту; зміна умов для екіпажу, які можуть вести до різних помилок; ускладнення дій екіпажу при зміні метеоумов.

Параметрична оцінка впливу цих ситуацій на безпеку польотів не завжди можлива. Тому в подібних випадках і при відсутності статистичної інформації про відмови РЕНС доцільно використовувати логіко-лінгвістичний підхід, що дозволяє на основі нечітких множин зробити оцінку впливу цих ситуацій на БП [2]. Наприклад, можливі такі ситуації, перелік яких наведено в табл. 3.

Як видно з табл. 3 призвести вірогідну оцінку подібних подій досить складно, тому тут доцільно використовувати логіко-лінгвістичний підхід до класифікації з використанням теорії нечітких множин.

При використанні логіко-лінгвістичного підходу необхідно провести аналіз можливих ситуацій, до яких призводить ФВ, сформулювати експертний запит, провести експертну оцінку всіх наслідків і оцінити загальний рівень впливу даного ФВ на БП. На підставі цього в сукупності з імовірнісними оцінками (якщо вони є) прийняти рішення про віднесення ФВ РЕНС до відповідного класу особливих ситуацій. Пропонований підхід складається з наступних етапів, що включають в себе обробку результатів експертних оцінок.

Аналіз можливих ситуацій польоту ПС до яких може привести ФВ. На цьому етапі експертами здійснюється аналіз можливих ситуацій $\tilde{O}_i (i=1, N)$, де N – кількість ситуацій. Далі аналізується їх вплив на раніше визначені характеристики БП. Множина цих ситуацій служить вхідною інформацією для формування експертних запитів.

Формування базового експертного опитування. Базовий експертний запит – це оціночний запит експерта, характерний для певної системи і визначає рівень впливу відмови на БП щодо заданої множини характеристик безпеки. На підставі кожної сформульованої ситуації нормуються масиви вихідних даних $D_{11}, D_{12}, D_{21}, \dots, D_{2m}, D_{i1}, \dots, D_{ip}$ (де i – кількість ситуацій у сформованій вище множині; k, m і p – кількість складових запиту першої, другої та i -ї ситуацій відповідно), які є компонентами вектора запиту.

Таблиця 3

Можливі ситуації, до яких може призвести ФВ

Номер ситуації X_i	Опис ситуації
X_1	Техніка пілотування змінюється незначно на маршруті
X_2	Ускладнення роботи екіпажу (можливі помилки екіпажу)
X_3	Ускладнення роботи екіпажу при зміні метеоумов
X_4	Техніка пілотування змінюється незначно, але можливо буде потрібна зміна плану польоту
X_5	Техніка пілотування змінюється незначно при виконанні зльоту
X_6	Техніка пілотування змінюється незначно при виконанні посадки
X_7	Змінюється техніка пілотування і ускладнюється робота екіпажу.

Ранжування вихідних даних (ВД) і побудова функції приналежності. Для побудови ФП будемо використовувати метод кількісного парного порівняння [3,4], нехай $\tilde{A}$ – нечітка підмножина з функцією n елементів наступного виду:

$$\tilde{A} = \{ \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_1) / \tilde{o}_1, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_2) / \tilde{o}_2, \dots, \mu_{\tilde{A}}(\tilde{o}_n) / \tilde{o}_n \}. \quad (1)$$

Ступінь приналежності елементів множини визначається за допомогою парних порівнянь, а кількість питань до експерта становить $n(n-1)/2$. За його оцінкою формується матриця парних порівнянь: $\tilde{A} = \|\tilde{a}_{ij}\|$, де значення $\tilde{a}_{ij}$ вибирається з табл. 4 оцінка елемента x_j порівнюється з j по x_i властивостями $\tilde{A}$.

Спрощенням процедури формування ФП є визначення вагових коефіцієнтів через розрахунок середнього геометричного зі співвідношення

$$\mu_{\tilde{A}}(x_i) = \omega_i = \sqrt[n]{\prod_{j=1}^n a_{ij}}, j = \overline{1, n}, \quad (2)$$

де a_{ij} – коефіцієнти матриці парних порівнянь, а вихідні дані представляють собою сформовану на основі експертного опитування матрицю парних порівнянь.

Складові базового експертного запиту далі упорядковуються за ступенем небезпеки ситуацій. Ранжування виконується через обчислення коефіцієнтів важливості $KB_p, \dots, KB_n$ (де n – кількість компонентів експертного опитування), які використовуються для реалізації нечітких моделей. Методи ранжирування

дозволяють виявити найбільш небезпечні ситуації для того, щоб потім розставити необхідні акценти під час оцінювання.

Таблиця 4

Шкала для побудови матриці порівнянь

Оцінка значимості	Якісна оцінка	Властивості альтернатив
1	Однакова значимість	Альтернативи мають однаковий ранг
3	Слабка перевага	Перевага однієї альтернативи перед іншою малопереконлива
5	Сильна перевага	Є надійні докази істотної переваги однієї альтернативи над іншою
7	Очевидна перевага	Існують переконливі свідчення на користь однієї альтернативи
9	Абсолютна перевага	Свідчення на користь переваги однієї альтернативи над іншою з найбільшою мірою переконливості
2,4,6,8	Проміжні значення	Використовуються, якщо необхідний компроміс

Формування лінгвістичних змінних і термів. Для формалізації лінгвістичних даних, скористаємося поняттями нечіткої змінної (НЗ) і лінгвістичної змінної (ЛЗ), введених в роботах [6].

Під ЛЗ будемо розуміти таку нечітку множину, якій присвоєно деяку назву і ця змінна визначена кортежем $\langle A, X, A \rangle$, де A – ідентифікатор НЗ, $X = \{x\}$ – область її визначення, а $\tilde{A} = \bigcup_{x \in X} \mu_{\tilde{A}}/x$ – НМ на X , яка задає обмеження на набір числових значень НЗ $\tilde{A}$.

Для формалізації суб'єктивного змісту якісних показників і побудови ФП необхідно використовувати такі вихідні дані: назва параметру $x_i (i = \overline{1, n})$; діапазон $[x_i, \bar{x}_i]$, зміни параметру x_i кількість термів, які застосовуються для лінгвістичного опису параметра x_i ; назва будь-якого терма ЛЗ.

Для визначення ЛЗ «Який вплив здійснює ФВ на УУП» відповідного кортежу $\langle \text{УУП}, T_{\text{УУП}}, X_{\text{УУП}} \rangle$, необхідно задати її базову терм-множину $T_{\text{УУП}} = \{T_i\} (i = \overline{1, L})$, де L – кількість термінів, які використовуються в якості нечітких еталонів оцінюваних параметрів). Базова терм-множина такої ЛЗ визначимо п'ятьма термами:

$T_{\text{УУП}} = \bigcup_{i=1}^5 T_{\text{УУП}} = \{ \text{“НИЗЬКА” (Н), “НИЖЧЕ СЕРЕДНЬОГО” (НС), “СЕРЕДНЄ” (С), “ВИЩЕ СЕРЕДНЬОГО” (ПС), “ВИСОКА” (В)} \}$. Після визначення термінів необхідно задати універсальну множину $X_{\text{УУП}}$, на якій будуть задані ці нечіткі еталони, а потім побудувати їх ФП.

Вибір методу обробки НЧ. Використовуємо максимінний метод, базою для якого є максимінна композиція (ММК). Ґрунтуючись на принципі узагальнення, ММК реалізується двома процедурами, перша з яких виконується за формулою:

$$\tilde{Z} = \tilde{X} \circ \tilde{Y} = \bigcup_{i=1}^n \{ \mu_{\tilde{X}}(x_i)/x_i \} \circ \bigcup_{j=1}^m \{ \mu_{\tilde{Y}}(y_j)/y_j \} = \bigcup_{i=1}^n \bigcup_{j=1}^m \{ \mu_{\tilde{X}}(x_i) \wedge \mu_{\tilde{Y}}(y_j) / (x_i * y_j) \}, \quad (3)$$

де $\tilde{X}$ і $\tilde{Y}$ – НЧ, які містять відповідно n і m компонентів; знаками $*$ і $\circ$ позначено одну з арифметичних операцій $+$, $-$, $\times$, $\div$ і одну з нечітких арифметичних операцій $\tilde{+}$, $\tilde{-}$, $\tilde{\times}$, $\tilde{\div}$ відповідно; у другій – здійснюється поглинання декількох компонентів $\mu_{\tilde{Z}}(z_k)/z_k, k = \overline{1, r}$ (r – кількість компонентів з рівнозначними носіями) одним $\mu_{\tilde{Z}}(z_s)/z_s : \mu_{\tilde{Z}}(z_s) = \max(\mu_{\tilde{Z}}(z_k))$.

Обчислення та інтерпретація рівня впливу ФВ на БП. Рівень впливу ФВ на БП будемо оцінювати на основі нечіткої моделі з бальною шкалою, яка реалізує безпосередньо кількісну оцінку на безперервній варіативної N -бальною шкалою. На підставі нечіткої моделі і вихідних даних ($\tilde{L}$ або $X_i, i = \overline{1, n}$) отриманих після опитування користувачів (представників експлуатанта), визначається показник рівня впливу ФВ РЕНС БП ($\tilde{L}S$ або μ_S).

Отриманий результат інтерпретується через визначення відповідності розрахованого рівня безпеки еталонним значенням, отриманих на етапі формування лінгвістичних термів. Вихідні дані представляються як в лінгвістичній формі, так і в числовий у вигляді НЧ і рівнів. Суть оцінки відповідно до цієї моделі наступна. Користувач відповідає на попередньо рокировані запитання (компоненти експертного запиту) за складеною експертом N – бальною шкалою. Діапазон шкали може варіюватися і залежить від складності оцінки ситуацій. Визначення стану безпеки реалізується за результатами опитування користувачів системи згідно складеного експертами питання, компоненти якого попередньо ранжуються через визначення КВ $P_j (j = \overline{1, n})$, де n – кількість компонентів.

Для ранжирування будемо використовувати метод на основі перетвореної матриці $A' = (a'_{vw})$, отриманої на підставі матриці парних порівнянь $A = (a_{ij})$ (див. табл. 4). Елемент перетвореної матриці визначається як:

$$\dot{a}_j = \begin{cases} \frac{100a_j}{a_j + 1}, & \forall i < j: v = i, w = j; \\ 1, & \forall i < j: v = w = j = i; \\ \frac{100}{a_j + 1}, & \forall i < j: v = j, w = i, \end{cases} \quad (4)$$

де $i = j = \overline{1, n}$.

Значення KB $P_i (i = \overline{1, n})$ для кожного з питань експертного опитування обчислюємо за формулою

$$P_i = \sum_{j=1}^n a'_j, \forall i \neq j. \quad (5)$$

Після визначення KB здійснюється їх нормалізація за виразом $PN_i = \frac{P_i}{\sum_{i=1}^n P_i}$ таким чином, щоб виконувалася умова $\sum_{i=1}^n PN_i = 1$.

Діапазон $[X_j, \overline{X_j}] (X_j = 0, X_j = N_j)$ зміни параметра $X_j^*, (j = \overline{1, n})$ (N_j – максимально можлива кількість балів по кожному питанню) відображається на універсальній множині еталонних НЧ $U = [0, L - 1]$ (L – кількість еталонів), для чого фіксоване значення $X_j^* \in [X_j, \overline{X_j}]$ перераховується в відповідний елемент $U_j^* \in [0, L - 1]$ по формулі [17]:

$$U_j^* = (L - 1) \frac{X_j^* - X_j}{\overline{X_j} - X_j}. \quad (6)$$

При цьому ФП $\mu_i^j(U_j^*), i = \overline{1, L}$ нечіткого терму с i -м номером обчислюється за допомогою виразу:

$$\mu_i^j(U_j^*) = \left[\frac{1}{1 + (U_j^* - i + 1)^2} \right]^{PN_j \cdot n}, \quad (7)$$

де $PN_j, j = \overline{1, n}$ KB, обчислені за оцінками експертів для кожного компонента вищенаведеного експертного запиту. На завершальній стадії визначаємо показник рівня впливу на БП за наступним логічним виразом:

$$\mu_S(X_j^*) = \bigvee_{i=1}^L \bigwedge_{j=1}^n \mu_i^j, \quad (8)$$

де $i = \overline{1, L}$ номер терма із базової терм-множини T , а $j = \overline{1, n}$ номер компоненти експертного запиту.

Приклад 2.3. Нехай $X = \{X_1, \dots, X_7\}$ – множина, що визначає ситуації, до яких призводить відповідний ФВ. Інтерпретація цих ситуацій наведена в табл. 2, а матриця парних порівнянь ситуацій (1), пронумерованих у порядку, подання у множині X , складеної на підставі табл. 4, має вигляд

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 3 & 5 & 7 & 7 & 7 & 9 \\ \frac{1}{3} & 1 & 5 & 5 & 5 & 3 & 7 \\ \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 1 & 3 & 7 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & 1 & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{3} & 1 & 3 & 5 \\ \frac{1}{7} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & \frac{1}{3} & 1 & 5 \\ \frac{1}{9} & \frac{1}{7} & \frac{1}{7} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & \frac{1}{5} & 1 \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Необхідно побудувати НМ $\tilde{A}$, яка нормалізує поняття «ФВ даної РЕНС призводить до УУП». Вагові коефіцієнти відповідно до формули (2) визначаються наступним чином:

$$\begin{aligned}\omega_1 &= \sqrt[7]{1 \cdot 3 \cdot 5 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 7 \cdot 9} = 1,688; \quad \omega_2 = \sqrt[7]{\frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 5 \cdot 3 \cdot 7} = 1,596; \\ \omega_3 &= \sqrt[7]{\frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 7} = 1,449; \quad \omega_4 = \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 3 \cdot 5} = 1,448; \\ \omega_5 &= \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1 \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 3 \cdot 5} = 1,403; \quad \omega_6 = \sqrt[7]{\frac{1}{7} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} \cdot 1 \cdot 5} = 1,333; \\ \omega_7 &= \sqrt[7]{\frac{1}{9} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{7} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot \frac{1}{5} \cdot 1} = 1,104.\end{aligned}$$

Після нормалізації отримаємо: $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_1) = 1$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_2) = 0,945$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_3) = 0,858$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_4) = 0,857$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_5) = 0,831$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_6) = 0,790$; $\mu_{\tilde{A}}(\tilde{\alpha}_7) = 0,654$. Отримане НЧ представлено на рис. 3. Як видно з рис. 3, його ФП має спадаючий характер.

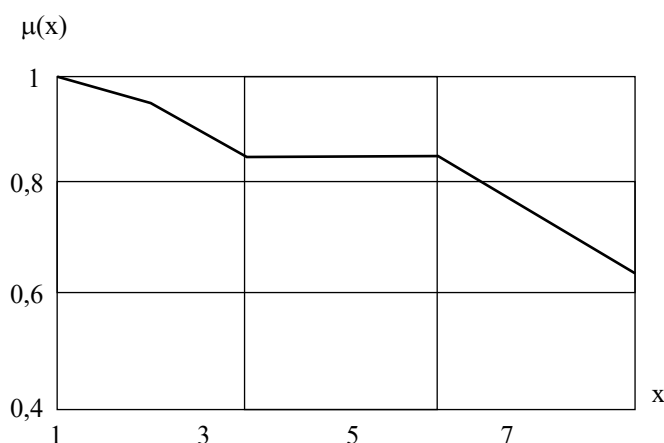


Рис. 3. Нечітке число, що оцінює ступінь впливу ФВ

Елементи перетворення матриці відповідно до виразу (4) матимуть такі значення:

$$A' = (a'_{ij}) = \begin{pmatrix} 1 & 75 & 83.3 & 87.5 & 87.5 & 87.5 & 90 \\ 25 & 1 & 83.3 & 83.3 & 83.3 & 75 & 87.5 \\ 16.7 & 16.7 & 1 & 50 & 50 & 75 & 87.5 \\ 12.5 & 16.7 & 50 & 1 & 75 & 75 & 83.3 \\ 12.5 & 16.7 & 50 & 25 & 1 & 75 & 83.3 \\ 12.5 & 25 & 25 & 25 & 25 & 1 & 83.3 \\ 90 & 12.5 & 12.5 & 16.7 & 16.7 & 16.7 & 1 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Межі зміни діапазону шкали відповідей задає експерт для кожного компонента окремо. Нехай, наприклад, для всіх компонентів межі однакові $[0; 5]$, хоча практично вони можуть бути і різні. Використовуючи матрицю парних рівнянь (9) і перетворену матрицю (10), обчислимо КВ для кожного компонента експертного запиту.

Занесемо в табл. 5 результати обчислення КВ для всіх компонентів $P_j (j = \overline{1,7})$, нормалізовані КВ $PN_j (j = \overline{1,7})$ і відповіді користувачів.

Використовуючи вирази (5) і (6), визначаємо значення $U_j^*, (j = \overline{1,7})$ і $\mu_i^*(U_j^*), i = \overline{1,7}$, а результати обчислень заносимо в табл. 6.

Таблиця 5

Результати опитування користувачів та експертів

Номер компоненти (j)	$P_j(j=\overline{1,7})$	$PN_j(j=\overline{1,7})$	Відповіді (в балах) $X_j^*(j=\overline{1,7})$
1.	$75 + 83,3 + 3 \times 87,5 + 90 = 511,5$	0,266	1
2.	$25 + 3 \times 83,3 + 75 + 87,5 = 437,4$	0,228	2
3.	$2 \times 16,7 + 2 \times 50 + 2 \times 75 + 87,5 = 370,9$	0,193	1
4.	$12,5 + 16,7 + 50 + 2 \times 75 + 83,3 = 312,5$	0,162	3
5.	$12,5 + 16,7 + 50 + 25 + 75 + 83,3 = 262$	0,136	3
6.	$12,5 + 4 \times 25 + 83,3 = 195,8$	0,102	4
7.	$90 + 12,5 + 12,5 + 3 \times 16,7 = 165,1$	0,086	5

Таблиця 6

Результати обчислень

Номер компоненти (j)	$U_j^*, (j=\overline{1,4})$	$\mu_1^j(U_j^*)$	$\mu_2^j(U_j^*)$	$\mu_3^j(U_j^*)$	$\mu_4^j(U_j^*)$	$\mu_5^j(U_j^*)$
1.	1,2	0,190	0,930	0,398	0,068	0,017
2.	2,4	0,047	0,177	0,789	0,612	0,132
3.	1,2	0,300	0,948	0,513	0,142	0,053
4.	3,6	0,050	0,098	0,237	0,706	0,846
5.	3,6	0,082	0,142	0,299	0,746	0,868
6.	4,8	0,103	0,142	0,211	0,357	0,702
7.	6,0	0,114	0,141	0,182	0,250	0,380

Згідно з виразом (8) знаходимо показник рівня впливу ФВ на УУП:

$$\begin{aligned}
 \mu_S(X_j^*) &= \bigvee_{i=1}^L \bigwedge_{j=1}^n \mu_i^j = [\mu_1^1(1,2) \wedge \mu_1^2(2,4) \wedge \mu_1^3(1,2) \wedge \mu_1^4(3,6) \wedge \mu_1^5(3,6) \wedge \mu_1^6(4,8) \wedge \mu_1^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_2^1(1,2) \wedge \mu_2^2(2,4) \wedge \mu_2^3(1,2) \wedge \mu_2^4(3,6) \wedge \mu_2^5(3,6) \wedge \mu_2^6(4,8) \wedge \mu_2^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_3^1(1,2) \wedge \mu_3^2(2,4) \wedge \mu_3^3(1,2) \wedge \mu_3^4(3,6) \wedge \mu_3^5(3,6) \wedge \mu_3^6(4,8) \wedge \mu_3^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_4^1(1,2) \wedge \mu_4^2(2,4) \wedge \mu_4^3(1,2) \wedge \mu_4^4(3,6) \wedge \mu_4^5(3,6) \wedge \mu_4^6(4,8) \wedge \mu_4^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_5^1(1,2) \wedge \mu_5^2(2,4) \wedge \mu_5^3(1,2) \wedge \mu_5^4(3,6) \wedge \mu_5^5(3,6) \wedge \mu_5^6(4,8) \wedge \mu_5^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_6^1(1,2) \wedge \mu_6^2(2,4) \wedge \mu_6^3(1,2) \wedge \mu_6^4(3,6) \wedge \mu_6^5(3,6) \wedge \mu_6^6(4,8) \wedge \mu_6^7(6)] \vee \\
 &\vee [\mu_7^1(1,2) \wedge \mu_7^2(2,4) \wedge \mu_7^3(1,2) \wedge \mu_7^4(3,6) \wedge \mu_7^5(3,6) \wedge \mu_7^6(4,8) \wedge \mu_7^7(6)] = \\
 &= [0,19 \wedge 0,047 \wedge 0,3 \wedge 0,05 \wedge 0,081 \wedge 0,103 \wedge 0,114] \vee \\
 &\vee [0,93 \wedge 0,177 \wedge 0,948 \wedge 0,098 \wedge 0,141 \wedge 0,142 \wedge 0,14] \vee \\
 &\vee [0,398 \wedge 0,789 \wedge 0,513 \wedge 0,237 \wedge 0,299 \wedge 0,211 \wedge 0,182] \vee \\
 &\vee [0,068 \wedge 0,612 \wedge 0,142 \wedge 0,706 \wedge 0,746 \wedge 0,357 \wedge 0,25] \vee \\
 &\vee [0,017 \wedge 0,132 \wedge 0,053 \wedge 0,845 \wedge 0,868 \wedge 0,702 \wedge 0,38] = \\
 &= [0,047 \wedge 0,098 \wedge 0,182 \wedge 0,068 \wedge 0,017] = 0,182
 \end{aligned}$$

Із табл. 6 видно, що обчислене значення $\mu_s = \mu_3$ (тобто $i=3$), тому для прийняття рішення вибирається нечіткий терм ТЗ, назва якого «Середній», що визначає рівень впливу ФВ на УУП. На основі цього твердження і імовірнісних характеристик, описаних вище, можна прийняти рішення про віднесення ФВ РЕНС до відповідного класу особливих ситуацій.

Висновки. Запропонована ієрархічна система класифікації радіоелектронних систем ПС, що дозволяє обґрунтовано вибрати показники ефективності їх експлуатації. Показано, що в якості імовірнісних показників для оглянутих класів РЕНС ПС доцільно використовувати КГ і ЕЙБР, а в якості техніко-економічного показника – повні експлуатаційні витрати (ПСЕЗ).

Обґрунтовані вимоги до граничних значень ймовірностей ФВ в період польоту ПС. Розроблено логіко-лінгвістичний метод класифікації ФВ РЕНС по класах особливих ситуацій, що базується на теорії нечітких множин, складений метод дозволяє провести аналіз впливу ФВ на безпеку польотів у випадках, коли відсутні необхідні показники надійності РЕНС для оцінки ймовірностей ФВ і для тих ситуацій, імовірність виникнення яких оцінити неможливо.

На підставі розроблених класифікацій показників ефективності РЕНС і систем ТО запропоновано критерій, який, на відміну від відомих, дозволяє здійснювати комплексну оптимізацію системи ТО з урахуванням показників достовірності, періодичності контролю, структури НАСК і обсягу ОФ.

Список використаних джерел:

1. Airline manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. / ed. by Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. 2nd ed. Washington, DC : Air Transport Association of America, 1993.
2. Pham H., Wang H. Reliability and Optimal Maintenance. Springer, 2006.
3. Gertsbakh I. B. Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Berlin : Springer, 2000. 219 p.
4. Pham H., Wang H. Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research. 1996. Vol. 94, no. 3. P. 425–438. URL: [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Stochastic Models in Reliability and Maintenance / ed. by S. Osaki. Berlin, Heidelberg : Springer Berlin Heidelberg, 2002.
6. Kumar U. D. Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Boston, MA : Springer US, 2000. 490 p.

References:

1. Air Transport Association of America. Maintenance Steering Group – 3 Task Force. (1993). Airline/manufacturer maintenance program planning document: MSG-3. (2nd ed.). Air Transport Association of America.
2. Pham, H., & Wang, H. (2006). Reliability and Optimal Maintenance. Springer.
3. Gertsbakh, I. B. (2000). Reliability theory: With applications to preventive maintenance. Springer.
4. Pham, H., & Wang, H. (1996). Imperfect maintenance. European Journal of Operational Research, 94(3), 425–438. [https://doi.org/10.1016/s0377-2217\(96\)00099-9](https://doi.org/10.1016/s0377-2217(96)00099-9)
5. Osaki, S. (Ред.). (2002). Stochastic Models in Reliability and Maintenance. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-24808-8>
6. Kumar, U. D. (2000). Reliability, Maintenance and Logistic Support: – A Life Cycle Approach. Springer US.

МОРСЬКИЙ ТА ВНУТРІШНІЙ ВОДНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.073.28:658.62

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.24>

Дрожжін О. Л., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри експлуатації флоту і технології морських перевезень
Одеського національного морського університету
ORCID: 0000-0002-9695-9296

ІНТЕРМОДАЛЬНІ ПЕРЕВЕЗЕННЯ: ВАРІАНТИ КОМПОЗИЦІЇ І УЧАСТЬ МОРСЬКОГО ТРАНСПОРТУ

В роботі досліджено дефініцію «від дверей до дверей» відносно інтермодальних перевезень, розглянуто її авторські тлумачення. Розглянуто визначення інтермодальних перевезень як різновиду мультимодальних перевезень, встановлено його ознаки відповідно до українського законодавства. Визначено початкові і кінцеві точки, якими формується інтермодальне перевезення і перелічено умови інтермодальності. Ідентифікація початку і кінця інтермодального перевезення є важливою з точки зору встановлення місцезнаходжень прийняття оператором інтермодального перевезення відповідальності за вантаж і позбавлення від неї. Для доказу необґрунтованості тверджень щодо доставки «від дверей до дверей», як ознаки інтермодального перевезення, наведено технологічні карти інтермодальної доставки відповідно до контрактів CIF і FOB, які можуть бути інтермодальними, але не пов'язують двері складу відправника з дверима вантажоодержувача. Ці приклади ілюструють межі інтермодального перевезення під відповідальністю оператора і ділянки, де перевезення відбувається поза його межами і не підпадають під відповідальність оператора. Таке розмежування встановлює різні статуси для зазначених двох перевізників і, як наслідок, різний рівень відповідальності за втрату і порчу, затримку вантажу. Дослідження ґрунтується на базі визначення інтермодальних перевезень відповідно до національного законодавства, а також авторських формулювань цієї дефініції, яку надають українські і закордонні науковці в своїх публікаціях. В результаті встановлені наступні висновки: ключовим чинником у трансформації звичайного сегментованого перевезення на інтермодальне є не просто використання кількох видів транспорту, а саме така їх взаємодія, яка забезпечує з'єднання між наземними та морськими ділянками маршруту. Відтак, у рамках транспортного забезпечення міжнародної торгівлі участь морського транспорту є невід'ємною складовою. Інтермодальне перевезення не обов'язково охоплює увесь шлях «від дверей відправника до дверей отримувача». – воно може починатися або завершуватися в інших точках маршруту відповідно до обраних базисних умов поставки, при умові збереження визначених ознак «інтермодальності». За будь-яких умов постачання товарів, кожному інтермодальному перевезенню відповідає один оператор інтермодального перевезення, який видає наскрізний транспортний документ, що забезпечує зв'язок між відправником і одержувачем.

Ключові слова: інтермодальні перевезення, транспортна одиниця, морське перевезення, лінійне судноплавство, контейнерні перевезення, змішані перевезення, мультимодальні перевезення, комбіновані перевезення, організація перевезень, управління перевезеннями.

Drozhzhyn O. L. Intermodal transportation: composition options and the importance of maritime transport

The paper examines the definition of “door-to-door” in relation to intermodal transportation and considers its author's interpretations. The definition of intermodal transportation as a type of multimodal transportation is considered, its features are established in accordance with Ukrainian legislation. The starting and ending points that form intermodal transportation are identified and the conditions of intermodality are listed. Identification of the beginning and end of intermodal transportation is important in terms of establishing the locations where the intermodal transportation operator assumes and disclaims liability for the cargo. To prove the groundlessness of the statements about door-to-door delivery as a sign of intermodal transportation, the author presents technological maps of intermodal delivery under CIF and FOB contracts, which may be intermodal, but do not connect the door of the sender's warehouse with the door of the consignee. These examples illustrate the boundaries of intermodal transportation under the responsibility of the operator and areas where transportation takes place outside the operator's boundaries and is not the responsibility of the operator. Such a distinction establishes different statuses for these two carriers and, as a result, different levels of liability for loss and damage, and delay of cargo. The study is based on the definition of intermodal transportation in accordance with national legislation, as well as the author's formulations of this definition provided by Ukrainian and foreign scholars in their publications. As a result, the following conclusions have been established: the key factor in transforming conventional segmented transportation into intermodal transportation is not just the use of several modes of transport, but rather their interaction, which provides a connection between land and sea sections of the route. Therefore, the

participation of maritime transport is an integral part of the transport support for international trade. Intermodal transportation does not necessarily cover the entire route "from the sender's door to the recipient's door". – It may begin or end at other points along the route in accordance with the selected basic terms of delivery, provided that certain "intermodality" features are maintained. Under any conditions of supply of goods, each intermodal transportation is managed by a single intermodal transport operator, which issues a through transport document that ensures communication between the consignor and the consignee.

Key words: intermodal transportation, transport unit, sea transportation, liner shipping, container transportation, mixed transportation, multimodal transportation, combined transportation, transportation organization, transport operation.

Постановка завдання. Відповідно до Закону «Про мультимодальні перевезення» оператор мультимодального перевезення (ОМП) – суб'єкт господарювання, який укладає договір мультимодального перевезення, приймає на час перевезення під свою відповідальність вантаж, оформлює документ мультимодального перевезення та здійснює чи забезпечує здійснення перевезення вантажу до місця призначення [1]. Оскільки інтермодальні перевезення вантажів є родовим поняттям по відношенню до мультимодального, всі ознаки мультимодального коректні і до інтермодальних перевезень [2]. Виходячи з цього, в контексті досліджень інтермодальних перевезень (ІП), як різновиду мультимодальних, всі властивості останніх є застосовними.

До особливостей інтермодальних перевезень є індивідуальний склад технологічних, організаційних і фінансових вимог вантажовідправника до оператора інтермодального перевезення (ОІП) з метою забезпечення якісної доставки дрібнопартійного вантажу в інтермодальній транспортній одиниці (ІТО). Складність змісту завдань по відношенню дрібних відправлень є наслідком в першу чергу різноманітності самих генеральних і тарно-штучних вантажів, які представляються до перевезень, широтою напрямків перевезення, багатоваріантністю потенційно прийнятних організаційних і технологічних рішень такого перевезення.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Учасники перевезення, які приймають участь при формуванні інтермодальної транспортної системи в контексті вантажних транспортно-розподільчих комплексів (ТРК) було досліджено в роботах О. М. Полякової [3]. Складом учасників інтермодальних в умовах кооперації [4-8]. Основні учасники процесу інтермодальної доставки в частині обслуговування контейнерів в морських портах визначені в роботах [9, 10].

Треба зазначити велику кількість публікацій, в яких авторами «наскрізність» організації такого перевезення подається через пов'язання двох місцеположень – склад вантажовідправника / склад отримувача. В якості прикладу поширеності зв'язку понять «інтермодальне перевезення» з доставкою «від дверей до дверей» в табл. 1 наведено перелік публікацій українських [11-15], і закордонних науковців [15-20] (табл. 2), які встановлюють такий зв'язок в авторських визначеннях.

Таблиця 1

Зв'язок поняття інтермодальних перевезень із доставкою «від дверей до дверей» в публікаціях українських авторів

Джерело	Теза
Інтермодальні перевезення	
11	«Інтермодальні перевезення – це змішані перевезення «від дверей до дверей», що підготовлюються і виконуються...».
12	«До інтермодальних перевезень відносять транспортно-технологічну систему організації перевезень ..., при якій перевезення «вантажного місця» виконується ... по варіанту «від дверей до дверей».
13	інтермодальне перевезення передбачає організацію послідовного перевезення вантажів ... в межах транспортного ланцюга (від «дверей до дверей»).
13	Інтермодальні перевезення (intermodal transport) – ... Це система транспортування з використанням двох або більше видів транспорту для перевезення однієї і тієї ж вантажної одиниці в рамках комплексного транспортного ланцюга (від дверей до дверей).
Мультимодальні перевезення	
14	«мультимодальні перевезення – це інтегрована та взаємозв'язана транспортна система, завданням якої є прискорення, здешевлення та спрощення технологічних процедур упродовж повного ланцюга доставки «від дверей до дверей».
15	поняття «мультимодальні перевезення» визначено як перевезення вантажу, що одночасно виконується двома або більше видами транспорту, організовано одним оператором, який бере на себе відповідальність доставки вантажу «від дверей до дверей».

Мета дослідження. Національним Законодавством [1] визначені учасники мультимодального перевезення вантажів як наступні:

- оператори мультимодального перевезення;
- замовники послуги мультимодального перевезення;

**Визначення інтермодального перевезення через доставку «від дверей до дверей»
в публікаціях іноземних авторів**

Джерело	Визначення	Переклад українською
16	Through transport of a container and its contents from consignor to consignee. Also known as House to House.	Перевезення контейнера та його вмісту від відправника до одержувача. Також відомий як «House to House»
17	Shipping service from shipper's door to consignee's door.	Послуга доставки від дверей вантажовідправника до дверей вантажоодержувача.
18	Shipping service from shipper's door to receiver's door.	Послуга з доставки від дверей відправника до дверей одержувача.
19	Door-to-Door. Shipping term denoting shipping services from the shipper's door to the consignee's door.	Від дверей до дверей. Термін, що означає послуги з доставки від дверей вантажовідправника до дверей вантажоодержувача.
20	In one of its most widely accepted meanings, intermodal freight transportations refers to a multi-modal chain of container-transportation services. This chain usually links the initial shipper to the final consignee of the container (so-called door-to-door service) and takes place over long distances	В одному з найбільш поширених значень інтермодальні перевезення вантажів – це мультимодальний ланцюжок контейнерно-транспортних послуг. Цей ланцюжок зазвичай пов'язує початкового відправника з кінцевим одержувачем контейнера (так звана послуга «від дверей до дверей») і здійснюється на великі відстані.

– фактичні перевізники;
– власники мультимодальних терміналів або суб'єкти господарювання, у володінні та користуванні яких на законних підставах знаходяться мультимодальні термінали;
– треті особи, залучені до надання послуги мультимодального перевезення.

Через те, що відносно «мультимодального перевезення» (яке зазначається в однині) протиставляється «оператори» у множині постає певне непорозуміння з приводу того, чи може єдине мультимодальне (чи ПП, як його різновид) забезпечуватися декількома операторами. Для надання обґрунтованої відповіді, треба розглянути варіанти організації інтермодальних перевезень (ПП) і статуси компаній-перевізників, які приймають в них участь.

Мета статті. 3 наведених визначень доставки «від дверей до дверей» впливає уява щодо можливості єдиного тлумачення виразу «door-to-door», як такого, який встановлює поєднання початкової і кінцевої точок доставки: від складу відправника до складу отримувача. Оскільки визначення чітко містять початок і кінець відповідальності перевізника, очевидно, що в цьому контексті ознаку «від дверей до дверей» неможливо сприймати як тотожне властивості інтегрованості видів транспорту, чи неперервності (наскрізності) процесів, які відбуваються протягом ПП. Наслідком цього стає одразу дві невизначеності: чи втрачається інтермодальність, якщо ПП закінчується (чи починається) не в точках «двері відправника/отримувача», і якщо таке можливе, чи може одне й те саме ПП бути організоване більш ніж одним ОПП. Метою статті і є усунення невизначеностей, вказаних вище.

Виклад основного матеріалу. Відповідно до існуючої практики інтермодального обслуговування вантажів, технологічні процеси, які забезпечуються оператором інтермодального перевезення (ОПП), можна поділити на 2 категорії:

– основні (ті, які безпосередньо пов'язані із транспортними операціями і фіксуються в документі ПП);
– додаткові послуги (страхування, пакування, сюрвей тощо), які ОПП надає замовнику поза межами перевізного процесу за окремими договорами.

Через те, що міжнародні інтермодальні перевезення потребують безпосередньої фізичної участі оператора в технологічних операціях, які відбуваються за кордоном на деяких типових для доставок із залученням морського транспорту умовах доставки «від дверей до дверей» (відповідають EXW, DDP за Інкотермс 2020) оператори вдаються до послуг закордонної мережі агентів, на яких покладаються функції із забезпечення таких операцій за кордоном. В число таких основних функцій входять такі, які пов'язані із фактичним перевезенням наземними видами транспорту, внутрішньо-портовим експедируванням в іноземному порту, контакт з вантажовідправником/вантажоодержувачем і т.д. Безумовно, організовані та таких умовах оператором перевезення перебувають у зоні виключної відповідальності оператора як договірного перевізника, який діє як перевізник «act as carrier», незалежно від кількості підрядників, яких він винаймає з метою організації перевезення і характеру робіт, які вони виконують за замовленням оператора, якщо тільки такі роботи відносяться до «основних», приклади яких зазначені вище.

Поряд із тим, практика інтермодальних перевезень передбачає випадки, коли замовники перевезення вимагають додаткових сервісів під час перевезення, які не передбачено договором перевезення. Такі

додаткові послуги (з організації сюрвеєрських послуг, складування, страхування і т. д.) можуть бути надані ОІП за іншим договором (чи окремими договорами), і взаємні права і обов'язки, які виникають внаслідок такого договору (договорів), будуть наслідками таких документів.

Між тим, модель доставки «від дверей до дверей» є не єдиною можливою вже внаслідок того, що ІП може бути наслідком таких умов купівлі-продажу товарів за Інкотермс, які не передбачають інтеграції всіх наземних і морських ділянок доставки від складу відправника до складу одержувача. Прикладом таких умов є поширені «франко-борт» FOB і «вартість і фрахт» CIF. В першому випадку (FOB) відповідальність перевізника починається не зі складу відправника, а в порту відправлення від моменту завантаження в інтермодальну транспортну одиницю (ІТО) на борт судна (не на складі відправника), і закінчується на складі в пункті кінцевого призначення. Замовником послуги інермодального перевезення виступає покупець товару. В другому (CIF) випадку, навпаки, відповідальність ОІП починається від складу відправника і закінчується в порту призначення (не на складі отримувача). За CIF послуги з ІП у ОІП замовляє продавець.

Фактично, за означених умов можлива організація ІП, яку можна описати «CY-DOOR» і «DOOR-CY» відповідно, якщо перевезення задовольняє наступному:

1. перевезення організує єдиний оператор перевезення;
2. перевезення сплачується за «наскрізною ставкою»;
3. видається єдиний транспортний документ на увесь шлях перевезення;
4. перевезення здійснюється за допомогою більш одного виду транспорту;
5. протягом перевезення не відбувається вантажних операцій безпосередньо із вантажем, а перевантажується тільки ІТО при зміні видів транспорту.

Хоча пункт 4 не визначає конкретні види транспорту, ідея провадження укрупненої міжвидової транспортної одиниці отримала розвиток тільки всередині 1950-х, коли вона отримала розповсюдження саме за участю морського транспорту в концепції «sea-land». Особливе значення морської ділянки підкреслено в роботах [23, с. 102; 24, с. 42; 25, с. 93].

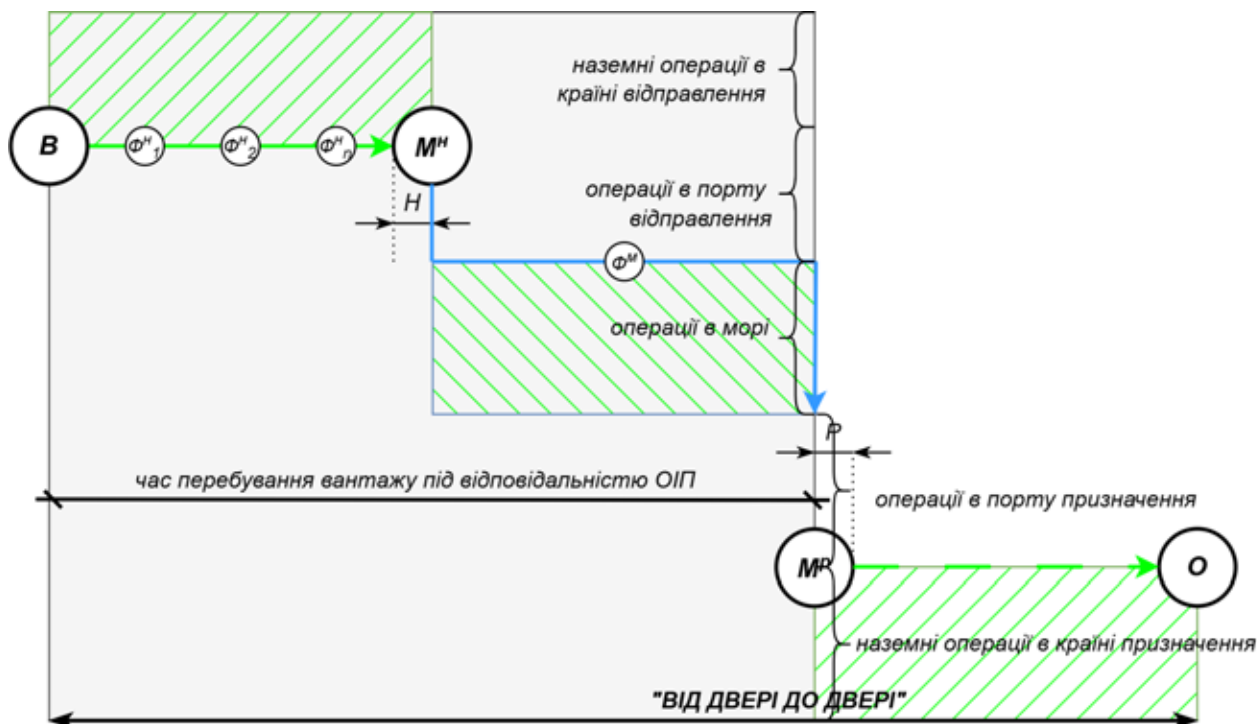


Рис. 1. Інтермодальне перевезення на умові поставки CIF (DOOR-CY)

На рис. 1 представлено схему технологічного процесу інтермодальної доставки, яка відповідає умові Інкотермс CIF (Cost, Insurance and Freight). Зобов'язання з транспортування товару до порту призначення віднесені до обов'язків продавця. Таким чином, вдаючись до послуг інтермодальної компанії, обов'язки ОІП припадають на забезпечення наземного транспортування від відправника (**В**) до порту відправлення; операції в порту відправлення (H); операції в морі (Φ^M), і закінчуються в порту призначення без зобов'язань з вивантаження в порту і організації операцій, пов'язаних із перебуванням вантажу в порту (P).

Таким чином, на умовах CIF ІП відповідає формулі, прийнятій в лінійному судноплаванні «house-to-pier» [22, с. 51], чи в контейнерних перевезеннях зветься «door-container yard». Всі зобов'язання, які починаються

від M^p (включно із розвантаженням із судна) і до складу отримувача, є обов'язком покупця, який на практиці укладає транспортний договір в країні доставки із транспортною компанією щодо доставки в місце призначення одержувачеві (O). Відповідно до рис. 1 такі обов'язки описуються прямою M^p-O (наземні операції в країні призначення) і під ними розуміють виключно операції, які пов'язані з одним чи декількома видами наземного транспорту (наприклад залізничний і автомобільний, чи автомобільний-залізничний-автомобільний і т. д.). Варіанти наземного транспортного обслуговування на цьому відрізку, як правило, не потребують укладання наскрізного транспортного документу.

Відповідно до рис. 1, що доставка від відправника до отримувача реалізується двома сегментами: від відправника до порту вивантаження ($B-M^u$) – ОП, і від порту розвантаження до отримувача (M^p-O) – фактичним(-и) перевізником(-ами). Така ділянка не утворює ІП, оскільки не містить декількох видів транспорту (в випадку використання автомобільного), чи не оформлюється наскрізним товаророзпорядчим документом. Таким чином точки складів відправника і одержувача поєднуються шляхом, в якому присутнє ІП і наземна ділянка, яка не є «інтермодальною».

Зворотна ситуація (покупець номінує ОП, який формує ІП) утворюється, якщо продаж товарів відбувається на умові «франко борт», FOB (рис. 2).

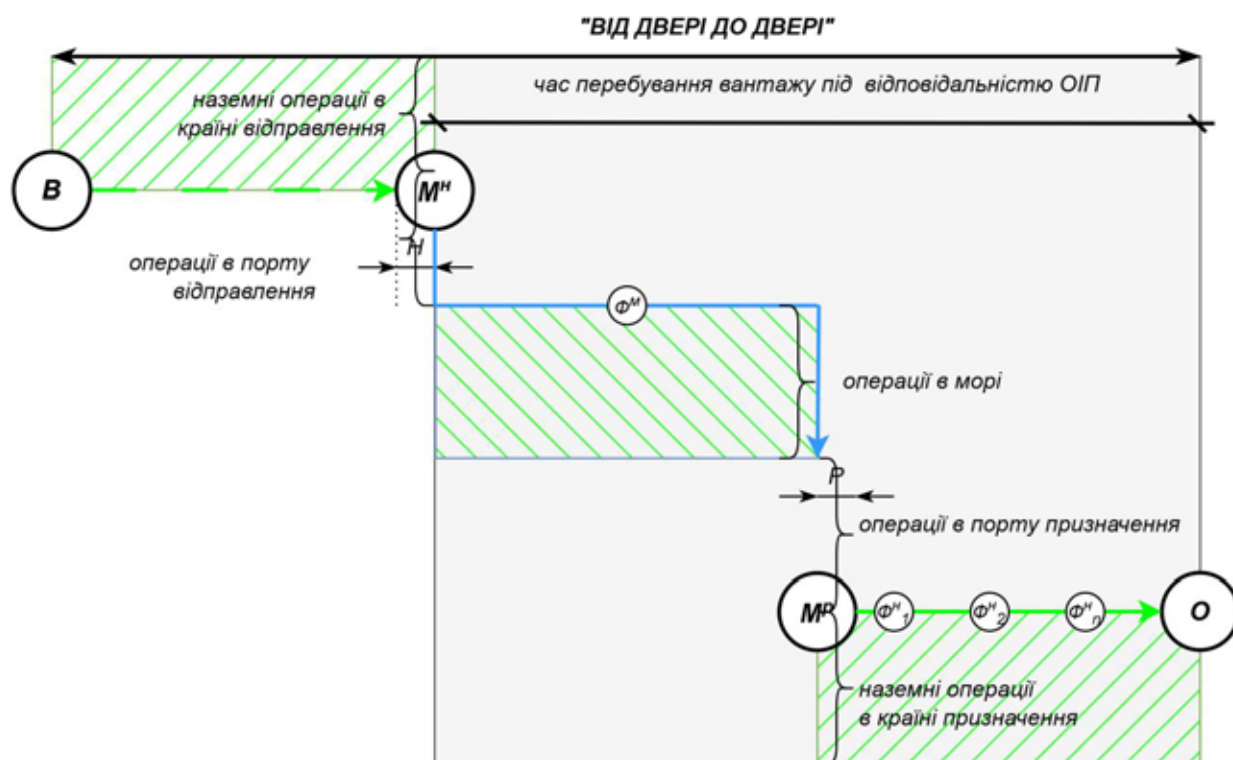


Рис. 2. Інтермодальне перевезення на умові поставки FOB (CY-DOOR)

Відповідно до цих умов поставки ОП, який діє як договірний перевізник, приймає відповідальність не на складі відправника B , а з моменту навантаження ІТО на борт судна. Наземне транспортування забезпечується таким чином фактичним перевізником, виїнятим продавцем до порту навантаження $B-M^u$, який не інтегрує двох чи більше видів транспорту (якщо використовується лише автомобільний), і не укладає наскрізного товаророзпорядчого документу. Інтермодальний транспортний документ видається з моменту прийняття ОП на себе відповідальності в порту M^u , закріплює цю відповідальність позначкою місця прийняття “port of loading”, датою “date onboard” в товаророзпорядчому транспортному документі, який він видає. Така відповідальність ОП як перевізника описується ділянкою M^u-O .

Висновки. В результаті викладеного встановлено наступне:

- визначальним в перетворенні звичайного сегментованого перевезення на інтермодальне відіграє не просто інтегрованість двох і більше видів транспорту, а така взаємодія, яка пов'язує наземні і морську ділянки перевезень. Таким чином в контексті транспортного обслуговування міжнародної торгівлі участь морського транспорту в цій взаємодії є незамінною;

- ІП не завжди є таким, що пов'язує весь шлях «від дверей відправника до дверей отримувача». Таке перевезення може бути реалізоване поєднаннями інших початкової/кінцевої точок відповідно до базисних умов поставки, наслідком якого і стало таке перевезення за умови відповідності ознакам інтермодальності;

– відповідно до будь-яких умов поставки товарів, одній інтермодальній доставці відповідає лише один перевізник-ОІП, яких видає наскрізний транспортний документ, що пов'язує відправника і отримувача.

Список використаних джерел:

1. Про мультимодальні перевезення: Закон України № 1887 від 17.11.2021 / Дата оновлення: 21.11.2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text> (дата звернення: 14.04.2025).
2. Дрожин О. Л. Інтермодальні перевезення. Суми: Університетська книга, 2024. 166 с.
3. Полякова О. М. Формування інтермодальної транспортної системи в Україні на базі вантажних транспортно-розподільчих комплексів: дис. канд. екон. наук : 08.07.04. Харків, 2019. 171 с.
4. Орда О. О. Формування стратегій організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань на принципах кооперації учасників: дис. канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2005. 188 с.
5. Орда О. О. Методологія оцінювання синергетичного ефекту при організації інтермодальних контейнерних перевезень в ланцюгах постачань на принципах кооперації учасників. Вісник машинобудування та транспорту. 2017. Вип. 2(6). С. 110–116.
6. Шраменко Н. Ю., Орда О. О. Оцінка ефективності взаємодії учасників інтермодальної доставки вантажів як пріоритетного напрямку розвитку транспортно-дорожнього комплексу України. Проблеми і перспективи розвитку транспорту» в рамках «ODESSA SMART FORUM: тези доповідей V всеукраїнської науково-практичної конференції студентів та молодих вчених. Одеса: ОНМУ, 2016. С. 57–60.
7. Шраменко Н. Ю. Формалізація процесу взаємодії суб'єктів транспортного ринку при інтермодальних контейнерних перевезеннях. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті. – 2016. – № 2. – С. 167-174.
8. Нагорний Є. В., Орда О.О. Алгоритм формування раціональних стратегій транспортно-експедиторських підприємств при взаємодії з суб'єктами транспортного ринку на умовах кооперації. Проблеми з транспортними потоками і напрямки їх розв'язання: тези доповідей II Всеукраїнської науково-теоретичної конференції. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 16–18 березня 2017 р. С. 76–77.
9. Коскіна Ю. О., Дрожин О. Л. Дослідження обробки інтермодальних транспортних одиниць в концепції «single window». Збірник наукових праць Державного університету інфраструктури та технологій Міністерства освіти і науки України: Серія «Транспортні системи і технології». Вип. 40. К.: ДУІТ. 2022. С. 227-236.
10. Naumov V., Nagorni I., & Litvinova Y. Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*. 2015. № 36. P. 43-54.
11. Пасічник В. І. Ефективність інтермодальних перевезень як елемент забезпечення високої якості транспортних послуг. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2013. № 12. С. 125-131.
12. Малахова О. А. Проблеми розвитку міжнародної транспортної системи в умовах удосконалення інтермодальних перевезень. *Вісник Нац. техн. університету "ХПИ": Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків : НТУ "ХПИ". 2009. № 8. С. 48-51.
13. Пашинська Н.М. Сучасні особливості територіальної організації транспортної системи. *Проблеми суспільної географії : Зб. наук. пр. – К.: Інститут географії НАН України*. 2010. № 1. С. 36-40.
14. Соколова О. Є. Концептуальні засади формування мультимодальної системи перевезення вантажів. *Наукоємні технології*. 2017. № 4. С. 114 – 118.
15. Кухарчик О. Г. Ринок мультимодальних перевезень регіону та стратегія його розвитку. дис. ... канд. економ. наук: 08.00.05. Херсон, 2019. 213 с.
16. Shipping glossary of terms. DCSA (*Digital Container Shipping Association*) <https://dcsa.org/standards/shipping-glossary> (date of access: 20.02.2025).
17. *Dictionary of International Trade* / ed. by Hinkelman, E. G. Brno: Tribun EU. 2008. 688 p.
18. Tian, J. C. Using collaborative transportation management in global supply chain. *Encyclopedia of E-Commerce, E-Government, and Mobile Commerce*. / ed. by M. Khosrow-Pour. 2006. P. 1126-1132.
19. Glossary of shipping terms. A.P. Moller – Maersk. <https://www.maersk.com/ru-ru/support/glossaries/shipping-terms> (date of access: 20.02.2025).
20. Crainic, T. G., & Kim, K. H. Intermodal transportation. *Transportation*. 2007. No. 14, P. 467–537. URL: [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6) (date of access: 20.02.2024).
21. Кириллова О. В. Теоретичні основи управління роботою флоту у транспортно-технологічних системах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.01. Одеса, 2017. 470 с.
22. Glossary of shipping terms. *U.S. Department of Transportation, Maritime Administration*. URL: <https://surl.li/vnyixj> (date of access: 20.02.2024).
23. U.S. Congress. Committee on Interstate and Foreign Commerce. *Intermodal transportation: Hearings, Ninety-second Congress, second session*. 1972. San Francisco: U.S. Government Printing Office. p. 199.

-
24. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. *Intermodal marine container transportation: Impediments and opportunities*. 1992. The National Academies Press. p. 138. URL: <https://doi.org/10.17226/11404> (date of access: 20.02.2024).
25. Brodie, P. *Commercial shipping handbook* (2nd ed.). London: Informa Law from Routledge, 2006. p. 368. DOI: 10.4324/9781315832685

References:

1. Pro multimodalni perevezennia: Zakon Ukrainy vid 17.11.2021 № 1887-IX [On multimodal transportation: Law of Ukraine No. 1887-IX]. (2024, November 21). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1887-20#Text>
2. Drozhzhyn O. L. (2024). Intermodalni perevezennia [Intermodal transportation]. Sumy: Universytetska knyha, 2024. 166 p.
3. Polyakova, O. M. (2019). *Formuvannia intermodalnoi transportnoi systemy v Ukraini na bazi vantazhnykh transportno-rozpodilchykh kompleksiv* [Formation of an intermodal transport system in Ukraine based on freight transport and distribution complexes] (Candidate's thesis). Kharkiv.
4. Orda, O. O. (2005). *Formuvannia stratehii orhanizatsii intermodalnykh konteinernykh perevezen v lantsiuhakh postachan na pryntsyakh kooperatsii uchastykiv* [Formation of strategies for organizing intermodal container transportation in supply chains based on cooperation principles] (Candidate's thesis). Kharkiv.
5. Orda, O. O. (2017). Model vyznachennia synerhetychnoho efektu pry orhanizatsii intermodalnykh konteinernykh perevezen v lantsiuhakh postachan [Methodology for assessing the synergistic effect in the organization of intermodal container transportation in supply chains based on cooperation principles]. *Bulletin of Mechanical Engineering and Transport*, (2)6, 110–116.
6. Shramenko, N. Yu., & Orda, O. O. (2016). Efficiency assessment of the interaction between participants of intermodal freight delivery as a priority direction for the development of Ukraine's transport and road complex. In *Problems and Prospects of Transport Development* within ODESSA SMART FORUM: Abstracts of the V All-Ukrainian Scientific and Practical Conference of Students and Young Scientists (pp. 57–60). Odesa: ONMU.
7. Shramenko, N. Yu., & Orda, O. O. (2016). Formalizatsiia protsesu vzaiemodii subiektiv transportnoho rynku pry intermodalnykh konteinernykh perevezenniakh [Formalization of the interaction process of transport market entities during intermodal container transportation]. *Modern Technologies in Mechanical Engineering and Transport*, (2), 167–174.
8. Nahorni, Ye. V., & Orda, O. O. (2017). Alhorytm formuvannia ratsionalnykh stratehii transportno-ekspedytorskykh pidpriemstv pry vzaiemodii z subiektamy transportnoho rynku na umovakh kooperatsii [Algorithm for forming rational strategies for freight forwarding companies in cooperation with transport market entities]. In *Problems of Traffic Flow and Solutions*: Abstracts of the 2nd All-Ukrainian Scientific-Theoretical Conference (pp. 76–77). Lviv: Lviv Polytechnic Publishing.
9. Koskina, Yu. O., & Drozhzhin, O. L. (2022). Doslidzhennia obrobky intermodalnykh transportnykh odynyt v kontseptsii «single window» [Research of intermodal transport unit handling within the "single window" concept]. *Scientific Bulletin of the State University of Infrastructure and Technologies*. Series: Transport Systems and Technologies, (40), 227–236. <https://doi.org/10.32703/2617-9040-2022-40-20>
10. Naumov, V., Nagorni, I., & Litvinova, Y. (2015). Model of multimodal transport node functioning. *Archives of Transport*, 36, 43–54.
11. Pasichnyk, V. I., Hrysyuk, Yu. S., & Patsiora, O. V. (2013). Efektyvnist intermodalnykh perevezen yak element zabezpechennia vysokoi yakosti transportnykh posluh [Efficiency of intermodal transportation as a component of high-quality transport services]. *Project Management, Systems Analysis and Logistics*. Technical Series, (12), 125–131.
12. Malakhova, O. A., & Seleshi, M. Y. (2009). Problemy rozvytku mizhnarodnoi transportnoi systemy v umovakh udoskonalennia intermodalnykh perevezen [Problems of international system development in the context of improving intermodal transportation. Bulletin of NTU “KhPI”]. Special issue: New Solutions in Modern Technologies, (8), 48–51.
13. Pashynska, N. M. (2010). Suchasni osoblyvosti terytorialnoi orhanizatsii transportnoi systemy [Current features of the territorial organization of the transport system]. *Problems of Social Geography: Collected Scientific Works*, (1), 36–40.
14. Sokolova, O. Ye. (2017). Kontseptualni zasady formuvannia multimodalnoi systemy perevezennia vantazhiv. [Conceptual principles of the formation of a multimodal freight transportation system]. *High Technologies*, (4), 114–118.
15. Kukharchyk, O. H. (2019). *Rynok multimodalnykh perevezen rehionu ta stratehiia yoho rozvytku* [Multimodal transport market of the region and strategy of its development] (Candidate's thesis, specialty 08.00.05 – Development of Productive Forces and Regional Economy). Kherson: International University of Business.
16. *Container shipping glossary: learn shipping terminology with DCSA*. (n.d.). DCSA – Digital Container Shipping Association. <https://dcsa.org/standards/shipping-glossary>
17. Hinkelman, E. G. (2008). *Dictionary of International Trade*. 8 vyd. Brno: Tribun EU.

-
18. Tyan, J. C. (2006). Using collaborative transportation management in global supply chain. *Encyclopedia of E-Commerce, E-Government, and Mobile Commerce* (pp. 1126-1132). IGI Global.
 19. A.P. Moller – Maersk. (n.d.). *Glossary of shipping terms*. Maersk. <https://www.maersk.com/ru-ru/support/glossaries/shipping-terms>
 20. Crainic, T. G., & Kim, K. H. (2007). Intermodal transportation. In C. Barnhart & G. Laporte (Eds.), *Transportation* (Vol. 14, pp. 467–537). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0927-0507\(06\)14008-6](https://doi.org/10.1016/S0927-0507(06)14008-6)
 21. Kyrylova, O. V. (2017). *Teoretychni osnovy upravlinnia robotoiu flotu u transportno-tehnolohichnykh systemakh* [Theoretical foundations of fleet management in transport and technological systems] (Doctoral dissertation, Odesa National Maritime University). 470 p.
 22. U.S. Department of Transportation, Maritime Administration. (1999). *Glossary of shipping terms*.
 23. U.S. Congress. Committee on Interstate and Foreign Commerce. (1972). *Intermodal transportation: Hearings, Ninety-second Congress, second session, on H.R. 15465 ... September 18, 1972 – Washington, D.C.; September 25, 26, 1972- San Francisco, Calif.* U.S. Government Printing Office.
 24. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (1992). *Intermodal marine container transportation: Impediments and opportunities* (Special Report 236). The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/11404>
 25. Brodie, P. (2006). *Commercial shipping handbook* (2nd ed.). Informa Law from Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315832685>

АВТОМОБІЛЬНИЙ ТРАНСПОРТ

УДК 656.1

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.25>

Бех П. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортного сервісу та логістики
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0002-1782-9224

Кузьменко А. І., кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-7278-3647

Рубан О. А., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0009-0004-2104-6777

Лашков О. В., старший викладач кафедри транспортного сервісу та логістики
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0000-0001-7380-987X

РОЗРАХУНОК РЕЖИМІВ УПРАВЛІННЯ АВТОМОБІЛЯМИ ДЛЯ ЗМЕНШЕННЯ ЧИСЛА ДОРОЖНЬО-ТРАНСПОРТНИХ ПРИГОД

Дослідження факторів, що сприяють виникненню дорожньо-транспортних пригод, показало, що покращення активної безпеки автомобіля та модернізація дорожньої інфраструктури, спрямована на збільшення швидкості та пропускної спроможності, не забезпечує підвищення загальної безпеки системи «водій–автомобіль–дорога». Такі заходи можуть призводити до того, що водій виходить за межі безпечного керування транспортним засобом. Визначено кількісні показники якості керування, що відображають рівень безпеки дорожнього руху. Також представлені значення параметрів керування автомобілем, що відповідають різним типам дорожніх ділянок. Ці показники можуть бути використані водіями як інформаційна підтримка, як елемент взаємодії в системі «водій–автомобіль», а також для моніторингу безпеки дорожнього руху уповноваженими організаціями.

Під час аналізу умов виникнення дорожньо-транспортних пригод було встановлено, що заходи з підвищення активної безпеки системи «водій–транспортний засіб» та дорожньої інфраструктури, спрямовані на збільшення швидкості руху та пропускної здатності, не забезпечують зростання загальної активної безпеки системи відеоспостереження. Такі дії можуть дозволити водієві вийти за межі безпечного контролю над автомобілем. У зв'язку з цим було визначено і запропоновано використовувати як зворотний зв'язок, показники безпеки руху, що дають змогу вносити корективи в дії водія для запобігання дорожньо-транспортним пригодам. Ці показники застосовуються не лише самим водієм, але й слугують основою для встановлення безпечних діапазонів значень, перевищення яких під час руху може стати підставою для адміністративного втручання з боку служб нагляду.

Існує припущення, що поліпшення дорожніх умов, підвищення швидкісних і гальмівних характеристик, стійкості автомобіля, його керованості та функцій активної безпеки сприяє підвищенню загальної безпеки руху. Однак ці твердження суперечать статистичним даним по дорожньо-транспортним пригодам.

Ключові слова: дорожньо-транспортна пригода, транспортний потік, дорожні умови, активна безпека, безпечний режим руху.

Bekh P. V., Kuzmenko A. I., Ruban O. A., Lashkov A. V. Calculation of vehicle driving modes to reduce the number of road accidents

A study of factors contributing to road accidents has shown that improving active vehicle safety and modernizing road infrastructure aimed at increasing speed and capacity does not ensure an increase in the overall safety of the driver-vehicle-road

system. Such measures may lead to the driver going beyond the limits of safe vehicle control. Quantitative indicators of driving quality have been determined, reflecting the level of road safety. The values of driving parameters corresponding to different types of road sections are also presented. These indicators can be used by drivers as information support, as an element of interaction in the driver-vehicle system, and for monitoring road safety by authorized organizations.

During the analysis of the conditions of road accidents, it was found that measures to increase the active safety of the driver-vehicle system and road infrastructure, aimed at increasing the speed of movement and throughput, do not ensure an increase in the overall active safety of the video surveillance system. Such actions may allow the driver to go beyond the limits of safe control over the car. In this regard, it was determined and proposed to use as feedback, traffic safety indicators that allow making adjustments to the driver's actions to prevent road accidents. These indicators are used not only by the driver himself, but also serve as the basis for establishing safe ranges of values, exceeding which while driving may be the basis for administrative intervention by the supervisory services.

There is an assumption that improving road conditions, speed and braking characteristics, vehicle stability, handling and active safety features contribute to overall traffic safety. However, these claims are contradicted by traffic accident statistics.

The average pre-accident behavior of bus, truck, and car drivers has a ratio of 1:0.7:0.5. Analyzing the distance to an accident in the driver-passenger systems, it was found that for drivers with high dynamic characteristics, this distance is 3.3 times smaller than for drivers with low dynamic characteristics.

Key words: road accident, traffic flow, road conditions, active safety, safe driving mode.

Постановка проблеми. Професія водія є однією з найбільш відповідальних та напружених. Вона вимагає значного нервово-емоційного навантаження та постійної зосередженості. Основною метою організації робочого процесу водія є забезпечення умов, які сприятимуть ефективній роботі та збереженню його здоров'я протягом усієї зміни.

Водій повинен постійно отримувати та обробляти значну кількість інформації щодо дорожньої ситуації, стану дороги, навколишнього середовища, засобів регулювання, а також роботи систем і механізмів автомобіля. Окрім цього, він має аналізувати отримані дані та приймати швидкі рішення. Оскільки дорожня ситуація постійно змінюється, ризик помилкових дій залишається високим.

Причини неправильних дій водія можуть бути наступними:

- недостатній час для сприйняття, обробки інформації, ухвалення рішення та виконання необхідної дії;
- сприйняття неправдивої інформації (наприклад, водій помилково приймає червоний сигнал світлофора за зелений);
- хибна інтерпретація коректних даних (наприклад, водій припускає, що жовтий сигнал світлофора зміниться на зелений, але вмикається червоний);
- помилкове рішення (наприклад, замість маневру в небезпечній ситуації водій вирішує гальмувати);
- неправильне управління автомобілем (наприклад, замість натискання на гальмо під час екстреного гальмування водій натискає на педаль газу).

Психічний стан водія безпосередньо впливає на ймовірність виникнення ДТП. Оптимальний психо-емоційний стан дозволяє швидко та точно проходити всі етапи – від сприйняття інформації до виконання дій. Відхилення від цього стану, такі як надмірне збудження або депресія, ускладнюють процес обробки інформації та підвищують ризик помилок. Саме тому психологічні характеристики водія відіграють ключову роль у забезпеченні безаварійного керування.

Детальний аналіз усіх типів ДТП неможливий без визначення факторів, які їх спричиняють. У багатьох країнах громадська думка та офіційна статистика здебільшого пов'язують аварії з помилками водіїв. За даними Всесвітньої організації охорони здоров'я, 9 з 10 дорожніх пригод трапляються через дії водіїв, а решта також певною мірою залежить від їхніх рішень. У певній мірі цьому також сприяє стан дорожньої інфраструктури.

Під час розслідування ДТП може виникати враження, що технічна несправність не стала причиною аварії, а основну роль зіграло порушення правил дорожнього руху. Наприклад, наїзд на пішохода зазвичай пояснюють перевищенням швидкості або запізнілим гальмуванням. Однак, якби тиск у пневматичній системі гальм був вищим, а їх налаштування точнішим, трагедії могло б не статися. Такий глибший аналіз причин ДТП дозволяє дійти висновку, що роль технічних несправностей у виникненні аварій є суттєвішою, ніж це часто вважається.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У [1] розглянуто понятійний апарат організації дорожнього руху, транспортне планування міст, технічних засобів організації дорожнього руху, екології й економіки організації дорожнього руху, методи розв'язання транспортних проблем.

Вивченню теоретичних і практичних аспектів організаційно-правового забезпечення безпеки дорожнього руху в Україні присвячена [2]. Спираючись на здобутки вітчизняної юриспруденції, зарубіжний досвід, а також аналіз чинного законодавства, нормотворчої та правозастосовної практики, розроблено концептуальний підхід до вирішення актуальних питань формування та реалізації державної політики у сфері дорожньої безпеки. Обґрунтовано необхідність визнання безпеки дорожнього руху як невід'ємної складової національної безпеки та одного з ключових напрямів державної політики.

В [3] розглянуто понятійний апарат і методологічні основи теорії дослідження операцій, методи рішення оптимізаційних задач за допомогою лінійного, динамічного, нелінійного та цілочисельного програмування, проблеми оптимізації управляючих рішень методом стохастичного програмування, методи імітаційного моделювання.

Дослідження взаємозв'язку між залишковими деформаціями кузова автомобіля та швидкістю руху в момент удару проведено в [4]. Використані чисельні методи рішення обернених задач механіки деформованого твердого тіла: теорія пластичності, теорія пружності, а також методи 3D-моделювання та методи експериментального дослідження деформації макетів і моделей транспортних засобів.

Розгляд теоретичних, законодавчих та практичних проблем адміністративно-правової кваліфікації порушень водіями правил експлуатації автотранспортних засобів наведено в [5]. Аналізується юридичний склад адміністративних проступків, відповідальність за які передбачена КУпАП. Розроблено методичні рекомендації щодо вдосконалення нагляду співробітниками Державної автомобільної інспекції за безпекою дорожнього руху.

З'ясування та узагальнення теоретичних і практичних адміністративно-правових засад оформлення дорожньо-транспортних пригод приведено в [6], вироблення на цій основі пропозицій і рекомендацій щодо вдосконалення законодавства та адміністративної діяльності публічної адміністрації з метою забезпечення прав і законних інтересів постраждалих у ДТП, публічного інтересу держави та суспільства в цілому.

Метою [7] є покращення якості автотехнічної експертизи за рахунок підвищення точності визначення коефіцієнта зчеплення. Досліджено процес екстреного гальмування автомобіля без блокування коліс та зниження похибки визначення коефіцієнта зчеплення при проведенні автотехнічної експертизи.

Рішенням питань визначення швидкості автомобіля перед зіткненням з нерухомою перешкодою при ДТП присвячена [8]. Розроблено методи визначення швидкості автомобіля до удару, які ґрунтуються на дослідженні залишкових деформацій елементів конструкції ушкодженого автомобіля.

Постановка завдання. Метою статті є доповнення заходів з підвищення активної безпеки системи «водій-транспортний засіб» та дорожньої інфраструктури, які спрямовані на збільшення швидкості руху та пропускної здатності, але не забезпечують зростання загальної активної безпеки системи відеоспостереження. Тому пропонується використовувати як зворотний зв'язок, показники безпеки руху, що дають змогу вносити корективи в дії водія для запобігання ДТП. Ці показники застосовуються не лише самим водієм, але й слугують основою для встановлення безпечних діапазонів значень, перевищення яких під час руху може стати підставою для адміністративного втручання з боку служб нагляду.

Виклад основного матеріалу. Існує припущення, що поліпшення дорожніх умов, підвищення швидкісних і гальмівних характеристик, стійкості автомобіля, його керованості та функцій активної безпеки сприяє підвищенню загальної безпеки руху. Однак ці твердження суперечать статистичним даним ДТП. Середні показники передаварійної поведінки водіїв автобуса, вантажівки та легкового автомобіля мають співвідношення 1:0,7:0,5. Аналізуючи дистанцію до аварії в системах «водій-пасажир», встановлено, що для водіїв із високими динамічними характеристиками ця відстань в 3,3 рази менша, ніж для водіїв із низькими динамічними характеристиками [1, 2].

Для розуміння причин впливу режимів руху транспортного засобу на ймовірність ДТП, слід проаналізувати механізм виникнення аварії.

Дорожньо-транспортна пригода трапляється, коли водій не може виконати необхідний маневр для уникнення зіткнення, транспортний засіб з'їжджає з дороги або перевертається під час маневру. Також аварія може статися через неспроможність системи автоматичного гальмування ефективно відреагувати на ситуацію та уникнути зіткнення. Причинами цих ситуацій зазвичай є перевищення безпечних параметрів руху, встановлених водієм, таких як швидкість, дистанція та горизонтальний інтервал. У випадках, коли необхідно знизити швидкість на високих швидкостях, системи активної безпеки автомобіля можуть виходити за межі допустимих значень [3].

Дорожньо-транспортна пригода виникає, коли система автоматичного гальмування не виконує необхідний маневр для уникнення зіткнення або транспортний засіб перевертається під час маневру на дорозі. Такі ситуації трапляються через перевищення безпечних параметрів руху, заданих водієм, зокрема швидкості, дистанції чи горизонтального інтервалу [8]. У випадках, коли потрібне уповільнення на високих швидкостях, система активної безпеки може перевищувати допустимі межі. Наприклад, на великій швидкості може виникати небезпечна ситуація, за якої здатність до уповільнення виходить за граничні значення (рис. 1).

Керованість транспортного засобу дорівнює R до тих пір, поки початкова швидкість гальмування не перевищить безпечне значення V .

Після збільшення V і початку гальмування на швидкості V_i виникає ймовірність ДТП, що дорівнює:

$$P_i = 1 - R_i, \quad (1)$$

де R_i – ситуаційна надійність керування автомобілем.

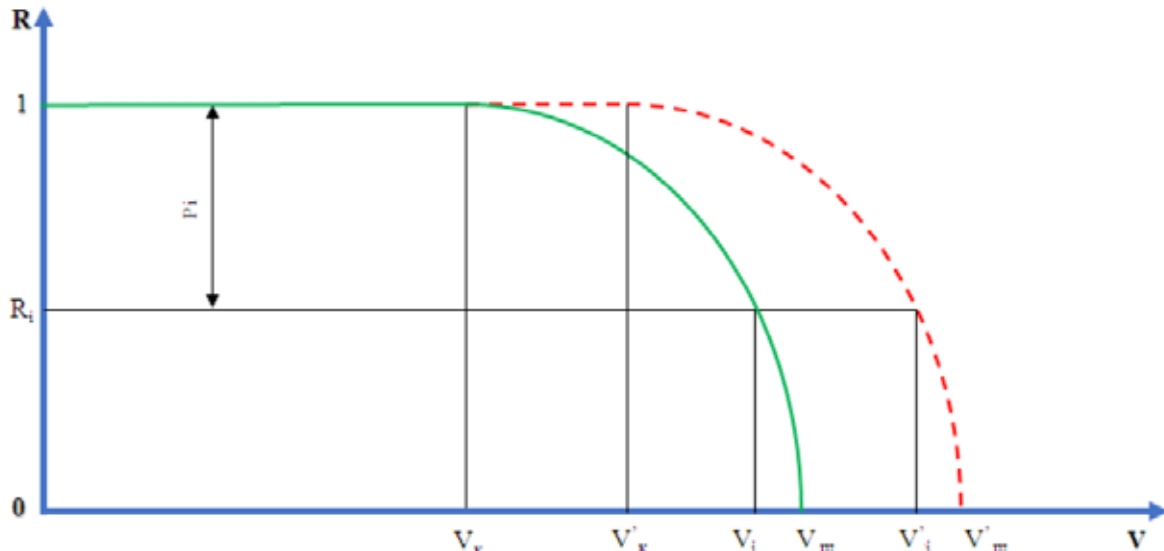


Рис. 1. Залежність швидкості проведення «гальмування» перед небезпечною ділянкою

Примітка: V_k (безпечна швидкість) і V_m (гранична швидкість) після збільшення до V'_k (збільшення безпечної швидкості) і V'_m (збільшення граничної швидкості) відповідно до небезпечного значення

При максимальній швидкості V_m надійність керування автомобілем дорівнює нулю, а ймовірність ДТП дорівнює одиниці. Якщо адгезійні властивості дорожнього покриття та гальмівні властивості автомобіля підвищуються, то водій навчається ефективному методу циклічного гальмування, і крива зниження надійності керування автомобілем зміщується вправо по пунктиру, як показано на рисунку 1.

Збільшення V_k і V_m до V'_k і V'_m відповідно повинно було сприяти підвищенню надійності, але цього не трапляється. Тут із збільшенням V_k і V_m водій збільшує миттєву швидкість V_l [3, с. 447-448]. Це явище можна пояснити за допомогою теорії гомеостазу, тобто, керуючи автомобілем, водій намагається рухатися з максимальною швидкістю через зміну дорожніх умов [4].

«Водій-перевізник» збільшує ситуативну швидкість, не перевищуючи нову безпечну швидкість V . А «водій-порушник» як і раніше виходить за межі безпеки і збільшує швидкість до V'_l , що відповідає рівню ризику P_i . Подібний графік можна побудувати і в разі зменшення гальмівного шляху при незмінній швидкості початку гальмування. Подібні графіки також можна побудувати для таких ситуацій, як об'їзд перешкоди, вхід у поворот і обгін.

З огляду на наведене вище, можна зробити три ключові висновки:

1. Основними умовами безпечного руху є дотримання встановлених обмежень швидкості та підтримання безпечної дистанції між транспортними засобами.
2. Хоча вдосконалення дорожньої інфраструктури та підвищення рівня активної безпеки транспортних засобів покращують технічні можливості, вони водночас створюють передумови для зростання швидкості руху, а не збільшують загальний рівень безпеки на дорогах.
3. Підвищення безпеки дорожнього руху можливе лише за умови зменшення кількості водіїв, які перевищують допустимі межі безпеки. Для цього необхідно вирішити дві важливі задачі. Перш за все, водії мають бути поінформовані про рівень безпеки керування транспортним засобом. Для цього слід забезпечити контроль за показниками безпеки під час руху та передати ці дані відповідним органам, які зможуть вживати заходів у разі порушення безпечних параметрів.

Проведені дослідження дозволили визначити три показники якості керування автомобілем, що характеризують безпеку режиму руху: максимальну швидкість V_{max} , коефіцієнт швидкості k_v та середньоквадратичне відхилення поздовжнього прискорення автомобіля від середнього значення σ_j , так званий шум прискорення [1, 3]. Ці показники фіксуються на всіх етапах руху автомобіля і оновлюється середнє значення кожні 5 км. Потрібно обґрунтувати вибір цих показників.

По-перше, вибір V_{max} як показника максимальної швидкості очевидний і не потребує спеціального обґрунтування. Його значення обмежене правилами дорожнього руху, характеризує діапазон зміни швидкості під час руху. Чим менше k_v , тим більше ситуаційна швидкість автомобіля перевищує середню швидкість транспортного потоку. Згідно з [6], якщо швидкість автомобіля нижча або вища за середню швидкість транспортного потоку і кількість зіткнень відбувається частіше, відстань, пройдена до ДТП, зменшується. Відхилення V_{max} в нижню сторону відповідає значенням k_v , близьким до одиниці. У зв'язку з цим значення k_v необхідно обмежувати не тільки знизу, а й зверху.

Середнє квадратичне відхилення середнього значення поздовжнього прискорення σ_j характеризує швидкість зміни швидкості автомобіля. Підвищення σ_j негативно впливає на безпеку дорожнього руху. Його назвали шумом прискорення, щоб підкреслити його шкідливий вплив на транспортний потік, подібно до шкідливих сигналів у радіоканалах, які називаються шумом [1, 7]. Його величина повинна бути обмежена зверху. Виходячи з використання поняття прискорення, як комплексний показник, що характеризує вплив швидкісних і гальмівних властивостей (динамічності) автомобіля на активну безпеку, прийнято максимальний шум прискорення. Цей показник отримав назву конструктивного шуму прискорення. Значення конструктивного шуму прискорення були розраховані для автомобілів зі статистичними даними про середню виконану роботу до аварії.

За результатами розрахунків побудовано графік залежності середньої роботи перед аварією S_j від величини конструктивного шуму прискорення σ_j (рис. 2).

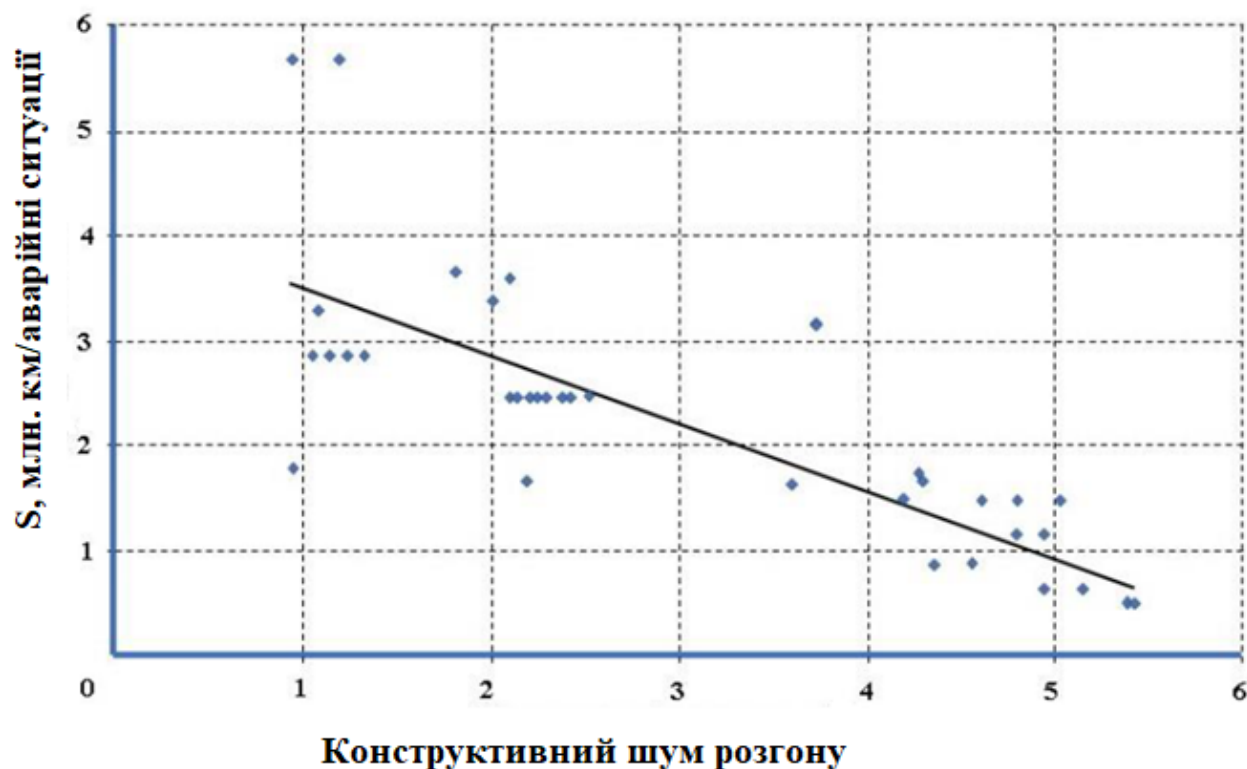


Рис. 2. Залежність передаварійних характеристик автомобіля від величини конструктивного шуму розгону

Як видно на рисунку 2, збільшення конструктивного шуму розгону призводить до зменшення середньої роботи до аварії. Іншими словами, збільшення так званих активних функцій безпеки автомобіля призводить до зниження активної безпеки.

Проведені дослідження дозволили визначити значення показників якості автомобілів, які на перший погляд відповідають різним рівням безпеки руху. Максимальні значення V_{max} становлять +10 км/год до швидкісних обмежень ділянок доріг. За результатами вимірювань були створені гістограми розподілу значень k під час руху по місту та трасі. За нижню межу значень k_v , що відповідають безпечним умовам руху в місті, були прийняті найбільш вірогідні значення k_v 0,45, 0,75 і 0,8 на магістралях і магістральних дорогах відповідно. В якості верхньої межі значення ймовірності k_v перевищували 0,05. Для міста це значення дорівнює 0,75, для шосе – 0,9, а для магістралі – 0,95. Ступінь небезпеки місць ДТП визначається ступенем уповільнення транспортного засобу, який потрапив у нього. Залежно від ступеня уповільнення виділяють такі ступені небезпеки: легкий, середній і критичний. У [1] запропоновано рівняння для визначення середнього значення продуктивності транспортного засобу до аварії з оцінки небезпеки аварії. Шум прискорення можна визначити за формулою:

$$\sigma_j = \frac{j_{max}}{3}, \text{ м/с}^2 \quad (2)$$

Відповідно до нижнього та верхнього значень прискорення визначено порогові значення для застосування відповідних адміністративних заходів у разі, якщо зареєстровані водієм значення під час руху вищі

або нижчі, наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Значення якісних показників керування легковим автомобілем, що відповідають безпечним режимам і режимам руху, які вимагають накладення на водія адміністративного стягнення

Показники	Місто			Шосе			Автомагістраль		
	Безпечно	В межах норми	Небезпечно	Безпечно	В межах норми	Небезпечно	Безпечно	В межах норми	Небезпечно
Максимальна швидкість, V_{max} , км/год	50^{+10}	$50^{+(20...60)}$	$50^{(>60)}$	90^{+10}	$90^{+(20...60)}$	$90^{(>60)}$	110^{+10}	$110^{+(40...60)}$	$110^{(>60)}$
Коефіцієнти швидкості, k_v	0,45...0,75	0,35...0,25	Менше 0,25	0,75...0,9	0,65...0,55	Менше 0,55	0,8...0,95	0,7...0,6	Менше 0,6
Прискорення, σ_j , м/с ²	0,75 та менше	1,0...1,25	Набагато більше 1,25	0,6 та менше	0,75...1,0	Набагато більше 1,0	0,4 та менше	0,5...0,75	Набагато більше 0,75

Щоб знизити ймовірність аварійності та впевнено та безпечно керувати автомобілем, необхідно контролювати максимальну швидкість V_{max} , коефіцієнт швидкості k_v та шум розгону σ_j відповідно до допустимої швидкості в транспортному потоці.

Одним з критеріїв, що впливає на визначення прискорення транспортного засобу у разі аварії, являється просторове розташування та геометрія проїзної частини. В залежності від нерівностей проїзної частини на транспортний засіб діють зусилля, що не розглядаються при проектуванні та виготовленні транспортного засобу. Нерівності проїзної частини можуть бути обумовлені різними причинами від властивостей і особливостей основи та елементів дорожнього одягу. Геометрія проїзної частини є результатом дії достатньої значної кількості факторів. Оцінити вплив кожного з них можливо на основі загальновідомих принципів, які традиційно застосовуються у вирішенні такого роду задач. З урахуванням можливості застосування ІТ-технологій достатньо значні площі дорожнього покриття можуть бути екстрапольовані у просторове геометричне поле, яке є основою для руху транспортних засобів.

Метод кінцевих елементів дозволяє вирішити поставлену задачу. При цьому точність визначення залежить від кількості прийнятих елементів. Найбільший інтерес в цьому сенсі побудова поля проїзної частини в статичному стані, а також зв'язкові зміни геометрії проїзної частини, за якими загалом можливо визначити додаткові зусилля, що виникають під час руху транспортного засобу по проїзній частині, яка має вільну геометрію, що у свою чергу може динамічно змінюватися. Таким чином на основі моделі проїзної частини, що взаємодіє з транспортними засобами, можливо визначити вплив останніх на характеристики комфортності перевезення пасажирів та надійності доставки вантажів.

Геометрія проїзної частини впливає в кінцевому розрахунку на основні логістичні показники транспортних засобів. Одним з таких показників є швидкість транспортних засобів при перевезеннях. В кінцевому розрахунку швидкість транспортних засобів в логістичній системі визначає вартість доставки вантажів, як один із основних критеріїв. Тому поставлена задача визначення безпечних швидкостей руху доставки, є основною і актуальною. Цей критерій залежить від значної кількості факторів, у тому числі локальних нерівностей проїзної частини. Розглядаючи модель взаємодії рухомого складу з проїзною частиною можливо визначити додаткові зусилля, що виникають в результаті руху транспортних засобів по нерівній поверхні. Задача їх визначення зводиться до встановлення функціональної залежності зміни відповідної координати з часом. У подальшому це дає можливість отримання функціональних величин прискорення, які вже безпосередньо можливо використовувати при розрахунках, і визначенні безпечних швидкостей по критерію геометрії дорожнього одягу. Загально відомий принцип Д'аламбер дає можливість розглядання системи динамічної задачі взаємодії «транспортний засіб – дорожнє покриття» через вирішення у статистиці.

Математичну моделі поверхні проїзної частини [9] пропонується представити у наступному вигляді.

Нехай D – деяка область в площині xOy , яка деформується в наслідок ослаблення основи, обмежена замкнутою кусково-гладкою кривою L . Контур L пересікається з будь-якою прямою, паралельною до однієї з осей координат, кінцевому числі точок або кінцевим числом цілих відрізків. Нехай область D визначена у загальному випадку хаотична сітка характерних точок рельєфу та конструкцій (реперів) $D_h = \{(x_i, y_i), i = 1, N\}$ та нехай у вузлах сітки реперів (x_i, y_i) задані значення деякої функції $f_i = f(x_i, y_i)$, отриманої за результатами вимірювання геодезичними службами. Необхідно відновити непереривну всюди $D + L$ функцію, яка приймає завдання значення в вузлах сітки: $u(x_i, y_i) = f_i, i = 1, N$. Ця задача має більше

ніж одне рішення. Розглянемо одну з можливих її рішень у вигляді безперервної кусково-лінійної функції $g(x, y)$ (лінійного сплайну), для якого виконується умови

$$g(x_i, y_i) = f_i, \quad i = \overline{1, N} \quad (3)$$

Щоб побудувати сплайн, розділимо область D на кінцеві елементи, які обираємо у вигляді трикутника з вершинами у вузлах сітки D_k .

Зауважимо, що в n – вимірних ($n > 1$) просторах немає визначеного відношення між загальним числом елементів розбиття та загальним числом вузлів сітки D_h , як це має місце у одновимірному випадку. Тому розбиття на трикутникові елементи неоднозначні. Нижче будемо говорити про лінійні, квадратичні та кубічні сплайни у зв'язку з прийнятим розбиттям області D_Δ .

Розглянемо трикутний елемент d_k . Номера вузлів i, j та m вказані у послідовності, відповідний руху проти годинникової стрілки [9]. Відновлена функція $u(x, y)$ обирається лінійною $g(x, y)$ на цьому елементі.

$$g(x, y) = g^k(x, y) = a_1^k + a_2^k x + a_3^k y, \quad (x, y) \in d_k, \quad (4)$$

де a_1^k, a_2^k і a_3^k – постійні, що у загальному випадку відрізняються для різних елементів.

Вони визначаються умовами (3) та ведуть до системи рівнянь

$$\begin{cases} a_1 + a_2 x_i + a_3 y_i = f_i, \\ a_1 + a_2 x_j + a_3 y_j = f_j, \\ a_1 + a_2 x_m + a_3 y_m = f_m, \end{cases} \quad (5)$$

де f_i, f_j, f_m – вказані значення функції в вузлах i, j та m відповідно; верхній індекс « k » пропускається для спрощення запису.

Визначник системи (5)

$$2S^k = 2S = \begin{vmatrix} 1 & x_i & y_i \\ 1 & x_j & y_j \\ 1 & x_m & y_m \end{vmatrix} \neq 0 \quad (6)$$

дорівнює двічі площі трикутника d_k і не дорівнює нулю. Тому система (6) має єдине рішення, яке записується у вигляді

$$\begin{cases} a_1 = (a_i f_i + a_j f_j + a_m f_m) \cdot (2S)^{-1}, \\ a_2 = (\beta_i f_i + \beta_j f_j + \beta_m f_m) \cdot (2S)^{-1}, \\ a_3 = (y_i f_i + y_j f_j + y_m f_m) \cdot (2S)^{-1}, \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{де } a_i = x_j y_m - x_m y_j, \beta_i = y_i - y_m, y_i = x_m - x_i. \quad (8)$$

Інші змінні $a_j, a_m, \beta_m, y_j, y_m$ виходить з формули (7) циклічної перестановки індексів. Підставивши вираз (6) в (4), отримаємо наступні уявлення лінійного сплайну $g(x, y) \in C[D]$:

$$g(x, y) = g^k(x, y) = (2S)^{-1} \times \left[(a_i + \beta_i x + y_i y) f_i + (a_j + \beta_j x + y_j y) f_j + (a_m + \beta_m x + y_m y) f_m \right], \quad (x, y) \in d_k, k = \overline{1, 1} \quad (9)$$

Нехай на гладкій замкненій граничній криві L визначена безперервна функція $\varphi(x, y)$ і нехай крива L буде замінятися багатозоряною ламаною L^* , вершини яких знаходяться на L і збігаються з граничними вузлами сітки D_k . Тоді в результаті кусочно-лінійної апроксимації кордону, функції $\varphi(x, y)|_{L^*}$, яка визначена на L^* . Функція φ і φ^* збігається в точках границі; на ланках l_p^* границі L^* функція $\varphi^*(x, y)$ обчислюється відповідно до правил (7).

В результаті застосування лінійних сплайнів для отримання рішення в вказаній області з відомими значеннями функції в вузлах сітки побудована безперервна функція, що відновлюється. Ця функціональна залежність дозволяє моделювати дискретний у часі стан основи і структури на ній. Це має значний практичний інтерес для транспортних спеціалістів.

Висновки. Найнебезпечніми несправностями, які частіше за все спричиняють ДТП, є несправності гальмівної системи (до 50 %), рульового управління (14 %), системи освітлення та сигналізації (16 %).

Як свідчить статистика, розподіл причин ДТП такий:

- через помилкові дії людини – 60-70 %;
- через незадовільний стан доріг і невідповідність дорожніх умов характеру руху – 20-30 %;
- через технічні несправності автомобіля – 10-15 %.

Багато дослідників вважають, що 2/3 усіх пригод виникає з вини людей і лише 1/3 через фактори, які не залежать від їхньої волі та діяльності.

Фактори, які сприяють виникненню ДТП, можна розділити на три умовні групи: через дії людини (учасників дорожнього руху), через несправності транспортних засобів та дорожні умови.

Аналіз дозволяє звести причини, що призводять до автопригод, у наступні однорідні групи:

- невиконання Правил учасниками дорожнього руху;
- застосування водіями таких прийомів керування транспортними засобами, які призводять до заносів, перекидання чи до втрати керування під час руху, або сприяють виникненню поломок механізмів, внаслідок чого виникають аварійні ситуації;
- зниження працездатності водія внаслідок перевтоми, хвороби чи під впливом факторів, які викликають зміну самопочуття;
- незадовільний технічний стан транспортних засобів;
- неправильне розміщення та кріплення вантажу, що призводить до втрати керування, зміни режиму роботи механізмів;
- незадовільне утримання елементів дороги;
- незадовільна організація дорожнього руху.

Однак аналізуючи конкретні пригоди, можна прийти до висновку, що найчастіше вони викликані не однією, а кількома причинами. Встановлено, що на кожні 100 ДТП доводиться близько 250 причин і супутніх факторів.

Вдосконалення дорожньої інфраструктури, яке спрямоване на покращення активної безпеки автомобіля, підвищення швидкості та пропускну здатності, не забезпечує підвищення активної безпеки всієї системи дорожнього руху, а лише розширює межі безпечного водіння.

Активна безпека є характеристикою системи «водій–автомобіль». Отже, підвищення активної безпеки дорожнього руху можливе лише за рахунок зменшення кількості водіїв, які використовують режими руху поза межами безпеки в транспортному потоці.

Надання водієві інформації про рівень керованості автомобіля, необхідної для оптимізації його режиму руху з урахуванням критеріїв безпеки, не дозволяє повністю виключити випадки перевищення граничних значень через наявність водіїв, які ігнорують цю інформацію.

Для зменшення кількості водіїв, що перевищують граничні значення показників безпеки, необхідний контроль за дотриманням ними безпечних режимів руху. У разі порушення цих режимів компетентні органи мають використовувати дані про якість керування автомобілем для застосування адміністративних стягнень.

Список використаних джерел:

1. Організація та регулювання дорожнього руху : підручник / за заг. ред. В. П. Поліщука. К.: Знання України, 2014. 467 с.
2. Гуржій Т. О. Державна політика безпеки дорожнього руху: теоретично-правові та організаційні засади: Дис. ... д-ра юрид. наук : 12.00.07 / Дніпропетр. держ. ун-т внутр. справ. Дніпро, 2011. 553 с.
3. Системологія на транспорті : підручник : у 5 кн. / За заг. ред. М. Ф. Дмитриченка. К.: Знання України, 2005. Кн. 4 : Організація дорожнього руху. 452 с.
4. Ветрогон О. А. Підвищення точності результатів експертизи швидкості при дорожньо-транспортній пригоді: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2009. 21 с.
5. Голубева Г. К. Адміністративно-правова кваліфікація порушень водіями правил експлуатації автотransпортних засобів: автореф. дис. ... канд. юрид. наук: 12.00.07. Ірпінь, 2008. 20 с.
6. Граділь А. О. Адміністративні процедури при оформленні дорожньо-транспортних пригод. *Науковий вісник Національного університету біоресурсів і природокористування України. Серія «Право»*. Вип. 165. Частина 2. 2011. С. 227-230.
7. Кашканов В. А. Удосконалення методу визначення коефіцієнта зчеплення при автотехнічній експертизі ДТП: автореф. Дис. канд. техн. наук: спец. 05.22.20. Харків, 2008. 20 с.
8. Ксенофонтова В. А. Розробка методу визначення швидкості транспортного засобу до зіткнення в результаті ДТП: автореф. Дис. канд. техн. наук: 05.22.20. Харків, 2003. 21 с.
9. Рубан А. О. Стійкість шаруватих ґрунтових споруд на деформованій основі : монографія. Дніпро: ПГ АСiА, 2005. 182 с.

References:

1. Polishchuk, V. P. et al. (2014). Organization and regulation of traffic: textbook / for the total. K.: Knowledge of Ukraine, 2014. 467 p.
2. Gurzhiy T. O. (2011). *State Road Safety Policy: Theoretical and Organizational Principles* : Doctor's thesis. Dnipro: Dnipropetrus. State. Univ. affairs [in Ukrainian].
3. Dmitrychenko M. F. et al. (2005). System on transport: textbook: in 5 kn. *Road organization*. (Vol. 4). K.: Knowledge of Ukraine [in Ukrainian].
4. Vetrogon O. A. (2009). *Increasing the accuracy of the results of speed examination in a road accident*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].

-
5. Golubeva G. K. (2008). *Administrative and legal qualification of violations of drivers of the rules of operation of motor vehicles*. Extended abstract of candidate's thesis. Irpin [in Ukrainian].
 6. Gradil A. A. (2011). Administrative procedures for traffic accidents. *Scientific Bulletin of the National University of Bioresources and Environmental Management of Ukraine. Right series*. Iss. 165. Part 2. 227-230 [in Ukrainian].
 7. Kashkanov V. A. (2008). *Improvement of the method of determining the coefficient of adhesion in the auto-technical examination of an accident: abstract*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].
 8. Ksenofonova V. A. (2003). *Development of the method of determining the speed of the vehicle for collision as a result of an accident: abstract*. Extended abstract of candidate's thesis. Kharkiv [in Ukrainian].
 9. Ruban O. A. (2005). *Stability of layered soil structures on a deformed basis* : monograph. Dnipro: PG ACiA, [in Ukrainian].

Майбородіна Н. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, доцент кафедри природничо-математичних та загально інженерних дисциплін Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0003-1754-6790

Герасименко В. П., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки Відокремленого підрозділу Національного університету біоресурсів і природокористування України «Ніжинський агротехнічний інститут»
ORCID: 0000-0002-4017-1141

МОДЕЛЬ ЗАЛЕЖНОСТІ ВАНТАЖООБІГУ АВТОМОБІЛЬНОГО ТРАНСПОРТУ ВІД ЦІНИ НА БЕНЗИН А-95

Автомобільний транспорт займає друге місце в Україні серед видів транспорту за обсягом вантажних перевезень. Саме тому виникає необхідність дослідження, моделювання, аналізу та прогнозування вантажообігу на автомобільному транспорті. Поведінка та значення будь-якого економічного показника залежить практично від безлічі факторів, але всі фактори врахувати неможливо. Але в цьому і немає потреби. Зазвичай лише обмежена кількість факторів насправді істотно впливає на досліджуваний показник. Вплив інших факторів настільки незначний, що їх ігнорування не може призвести до істотних відхилень у поведінці досліджуваного об'єкта. Важливою передумовою якісного аналізу та прогнозу є виокремлення та врахування в моделі лише домінуючих факторів. Одним з найважливіших чинників, що впливає на вантажообіг автомобільного транспорту є ціна на паливе. В роботі розглянуто питання моделювання вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95. Для побудови математичної моделі використовувалися статистичні дані Державної служби статистики України. З метою автоматизації процесу побудови моделі залежності обсягу вантажних перевезень на автомобільному транспорті від ціни на бензин А-95 в даному дослідженні використано можливості табличного процесору Excel. Для забезпечення достовірності побудованої моделі, серед запропонованих варіантів ліній регресії в Excel обирали ту, яка має найбільшу величину апроксимації. В даній роботі дотримано всіх вимог до основних етапів математичного моделювання реального процесу: наведено постановку задачі, виокремлено показник, який суттєво впливає на досліджуваний об'єкт, представлено методику побудови математичної моделі, досліджено побудовану модель реального процесу та розглянуто застосування отриманих результатів до практичного питання прогнозування вантажообігу автомобільного транспорту на 2025 рік. Отримані в даному дослідженні результати відіграють важливу роль при плануванні обсягів перевезень товарів автомобільним транспортом та аналізі обсягів зовнішньої та внутрішньої торгівлі товарами.

Ключові слова: автомобільний транспорт, вантажообіг, модель, достовірність апроксимації.

Maiborodina N. V., Gerasymenko V. P. Dependence model of freight turnover in road transport on the price of A-95 gasoline

Road transport ranks second in Ukraine among modes of transport in terms of freight volume. This is why there is a need to study, model, analyze, and forecast freight traffic in road transport. The behavior and value of any economic indicator depend on a multitude of factors, but it is impossible to take all of them into account. However, this is not necessary. Typically, only a limited number of factors significantly influence the indicator under study. The impact of other factors is so negligible that ignoring them does not lead to substantial deviations in the behavior of the object under analysis. A key prerequisite for a quality analysis and forecast is identifying and considering only the dominant factors in the model. One of the most important factors influencing road freight traffic is the price of fuel. This paper examines the issue of modeling road freight traffic depending on the price of A-95 gasoline. To construct the mathematical model, statistical data from the State Statistics Service of Ukraine was used. To automate the process of building the model of the dependence of freight volume on road transport on the price of A-95 gasoline, this study employed the capabilities of the Excel spreadsheet processor. To ensure the reliability of the constructed model, the regression line option with the highest approximation value was selected among those offered in Excel. This work adheres to all the requirements for the main stages of mathematical modeling of a real-world process: the problem is stated, the key influencing indicator is identified, the methodology for constructing the mathematical model is presented, the developed model of the real process is analyzed, and the application of the obtained results for the practical task of forecasting road freight traffic for the

year 2025 is considered. The results obtained in this study play an important role in planning the volume of goods transported by road and in analyzing the volume of external and internal trade in goods.

Key words: road transport, freight turnover, model, approximation reliability.

Постановка проблеми. В Україні з кожним роком все більше розвивається інтернет індустрія, яка передбачає купівлю-продаж товарів через інтернет магазини. Саме в таких умовах доставка товарів автомобільним транспортом набуває все більшої популярності. Основними чинниками вибору автомобільного транспорту для вантажних перевезень є його переваги. Наприклад, використання автомобільного транспорту забезпечує гнучкість доставки та маршрутів, має швидку оперативність та найкращий вид транспорту для термінових вантажів. З розвитком малого бізнесу в Україні дедалі ширше використовується автомобільний транспорт для перевезень вантажів, оскільки він зручний для перевезення невеликих партій вантажів. Також використання автомобільного транспорту не потребує великих витрат на інфраструктуру, оскільки не потрібно будувати колії, порти чи аеропорти. Найвигіднішим видом транспорту на невеликих дистанціях є саме автомобільний транспорт, який забезпечує комбіновані завантаження для збірних видів вантажів.

З початком війни в 2022 році вантажні перевезення автомобільним транспортом перемістилися з другого місця серед видів транспорту за обсягом вантажних перевезень на перше. Особливими перевагами автомобільного транспорту у воєнний час є можливість зміни маршруту в реальному часі та необмеженість жорсткими графіками як у залізничного транспорту. Враховуючи той факт, що авіатранспорт в Україні не працює з 2022 року для перевезень вантажів, доводиться розподіляти дану прогалину в перевезеннях між залізничним та автомобільним транспортом. Економічна активність країни напряму впливає на попит на перевезення. Сучасна Україна потребує швидкої організації перевезень та доступ до найвіддаленіших і небезпечних точок. Саме автомобільний транспорт забезпечує таку організацію вантажоперевезень.

Отже, дослідження залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 являє собою актуальну задачу для підприємств і організацій України.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідженню сфери автомобільного транспорту приділяється велика увага вчених, оскільки забезпечення сталого розвитку є одним зі стратегічних завдань національної економіки країни. Теоретичні та методологічні питання розвитку автотранспортної галузі в національній економіці розглядалися в працях Ю. Є. Пашенко, Никифорок О.І., Чмирьова Л.Ю., Лебідь В.В. [1, 2, 3]. Правові засади регулювання автомобільного транспорту в Україні досліджено в роботах І. М. Барбір [4], В. М. Дідківського [5]. Дослідження безпеки руху та впливу автомобільного транспорту на навколишнє середовище розглянуто в роботах Б. В. Дерев'янка [6], О. М. Терентьева [7], В.С. Олішевської [8], І. Дмитріва [9].

Відаючи належне наявним науковим дослідженням учених з питань сфери діяльності автомобільного транспорту, слід зазначити, що недостатньо досліджена процедура прогнозування очікуваних обсягів вантажоперевезень та впливу домінуючих факторів на вантажообіг.

Мета статті. Основною метою даної роботи є побудова математичної моделі залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 в умовах невизначеності на основі наявних статистичних даних за попередні роки із застосуванням методів математичної статистики. Дослідження, аналіз побудованої моделі та прогнозування вантажообігу на автомобільному транспорті на 2025 рік.

Виклад основного матеріалу. Дослідження вантажообігу автомобільного транспорту має важливе значення для сучасної економіки України, оскільки дохід промислового та сільськогосподарського виробництва на пряму залежить від його можливостей.

Для успішного прогнозування обсягу вантажообігу і вибору моделі, що використовуватиметься, необхідно обирати регресійну функцію серед багатьох можливих варіантів. Для вибору адекватної моделі будемо застосовувати спеціальні критерії якості моделі [10]. З метою перевірки достовірності запропонованої моделі, скористаємося елементами дисперсійного аналізу та перевіримо значущість отриманих результатів.

Для даної задачі оберемо рівень значущості $\alpha = 0,05$ (або 5%). Тоді всі сформульовані висновки будуть виконуватись з рівнем довіри $p = 1 - \alpha = 0,95$; тобто з ймовірністю 95%.

Для створення математичної моделі залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 скористаємося даними, які розміщені на сайті Державної служби статистики України в розділі Статистична інформація / Економічна статистика / Транспорт / Вантажообіг за видами транспорту (2014-2022) [11]. Статистичні дані ціни на бензин марки А-95 та вантажообігу автомобільного транспорту за період 2014-2021 років наведено в таблиці 1.

В таблиці 1 наведено дані до 2021 року. З настанням війни в Україні 24 лютого 2022 року стало неможливим зібрати якісно статистичні дані за 2022, 2023 та 2024 роки. Скористаємося наявними статистичними даними за період 2014 – 2021 роки.

Задача регресійного аналізу полягає в тому, щоб за наявними статистичними даними:

1. Отримати найкращі оцінки $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n$ невідомих параметрів $a_0, a_1, \dots, a_n$;
2. Перевірити статистичні гіпотези про параметри моделі;
3. Перевірити, чи добре отримана модель узгоджується зі статистичними даними (перевірити адекватність моделі) [10].

Таблиця 1

Ціни на бензин марки А-95 та вантажообігу автомобільного транспорту (2014-2021)

Показник	Одиниця виміру	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021
Вантажообіг автомобільного транспорту	млн.ткм.	37747,1	34504,6	37978,6	41459,5	42569,5	48906,3	42016,9	46808,1
Ціна на бензин марки А-95	грн/л	13,1	20,4	20,1	24,6	29,1	28,6	24,9	30,5

Якість отриманих оцінок параметрів $\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n$ можна аналізувати шляхом дослідження відхилень між теоретичними значеннями моделі та фактичними (емпіричними) даними. Ці відхилення дозволяють оцінити ступінь відповідності побудованої моделі реальним спостереженням. Одним із найпоширеніших підходів для оцінювання параметрів є **метод найменших квадратів** – це статистичний метод, який передбачає знаходження таких значень параметрів, при яких **сума квадратів відхилень** теоретичних значень від емпіричних є мінімальною. Формально, він ґрунтується на мінімізації функції:

$$S(\hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n) = \sum_{i=1}^n \left((y_i - f(x_i; \hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n))^2 \right)$$

де y_i – емпіричні дані, $f(x_i; \hat{a}_0, \hat{a}_1, \dots, \hat{a}_n)$ – теоретична модель, яка залежить від параметрів. Таким чином, метод найменших квадратів забезпечує знаходження найкращої апроксимації емпіричних даних за заданою моделлю.

З метою автоматизації побудови моделі оберемо табличний процесор Microsoft Excel.

Обробку числових даних розпочнемо з використання Надстройки / Аналіз даних / Описова статистика. Результати наведено в таблиці 2.

Таблиця 2

Результати описової статистики в Excel

Характеристика	Ціна на бензин марки А-95 (грн/л)	Вантажообіг автомобільного транспорту
Середнє значення	23,91375	41498,83
Стандартна похибка	2,061029	1689,579
Медіана	24,75	41738,2
Мода	-	-
Стандартне відхилення	5,829469	4778,852
Дисперсія вибірки	33,98271	22837427
Ексцес	0,228039	-0,59313
Асиметрія	-0,81062	0,207513
Інтервал	17,43	14401,7
Мінімум	13,07	34504,6
Максимум	30,5	48906,3
Сума	191,31	331990,6
Кількість	8	8

На основі даних про вантажообіг автомобільного транспорту з 2014 року по 2021 рік:

1. Визначимо вид функції регресії.
2. Побудуємо функцію регресії.
3. Дослідимо достовірність побудованої функції регресії.
4. Виконаємо прогнозування за побудованою функцією регресії:
 - а) спрогнозуємо вантажообіг автомобільного транспорту на 2025 рік;
 - б) обчислимо довірчий інтервал для прогнозованого індивідуального значення вантажообігу автомобільного транспорту.

1. Для визначення виду функції залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 будемо кореляційне поле точок (Рис. 1).

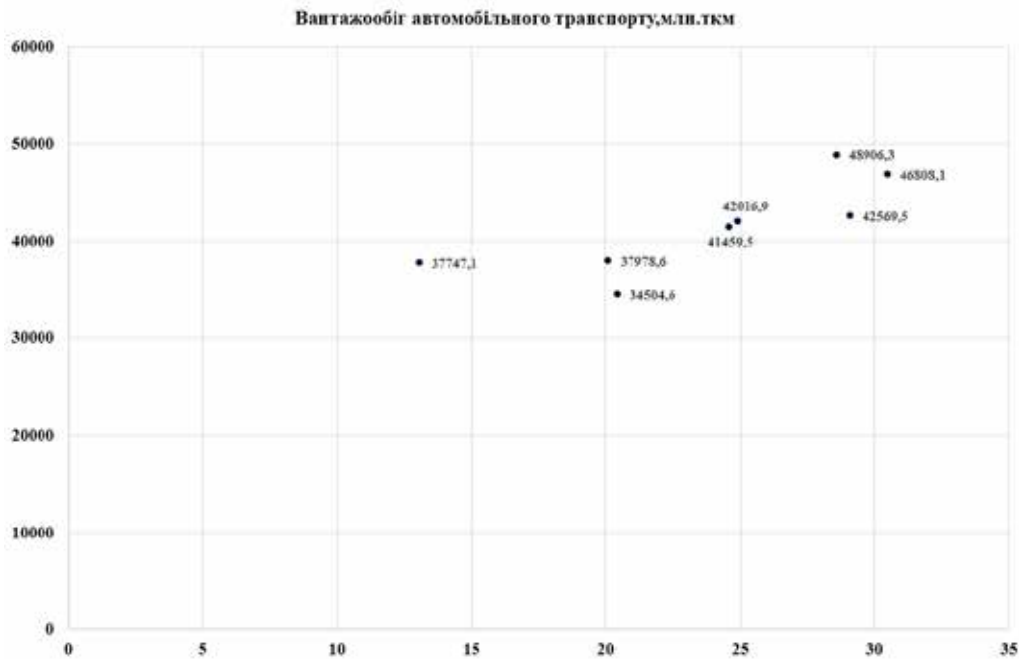


Рис. 1. Кореляційне поле точок

2. Засобами табличного процесору Microsoft Excel здійснюємо вибір функції регресії. На рис. 2 зображено вибір лінійної лінії тренду.

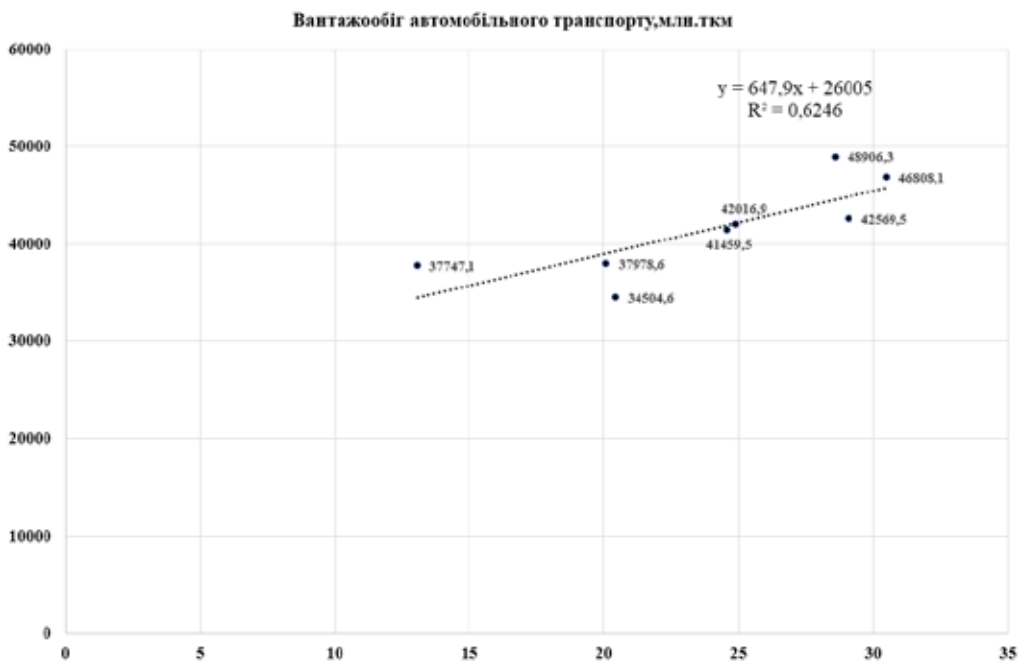


Рис. 2. Графік залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 (лінійна модель)

Отже, функціональна залежність має вигляд

$$y = 647,9x + 26005. \quad (1)$$

Величина апроксимації $R^2 = 0,6246$. Оскільки $0,5 < R^2 < 0,8$, то функціональна залежність прийнятна для опису зв'язку між величиною вантажообігу автомобільного транспорту та ціною на бензин марки А-95.

З метою збільшення показнику якості моделі R^2 оберемо поліноміальну функцію 2-го степеня. Побудована модель та графік залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 зображена на рис. 3.

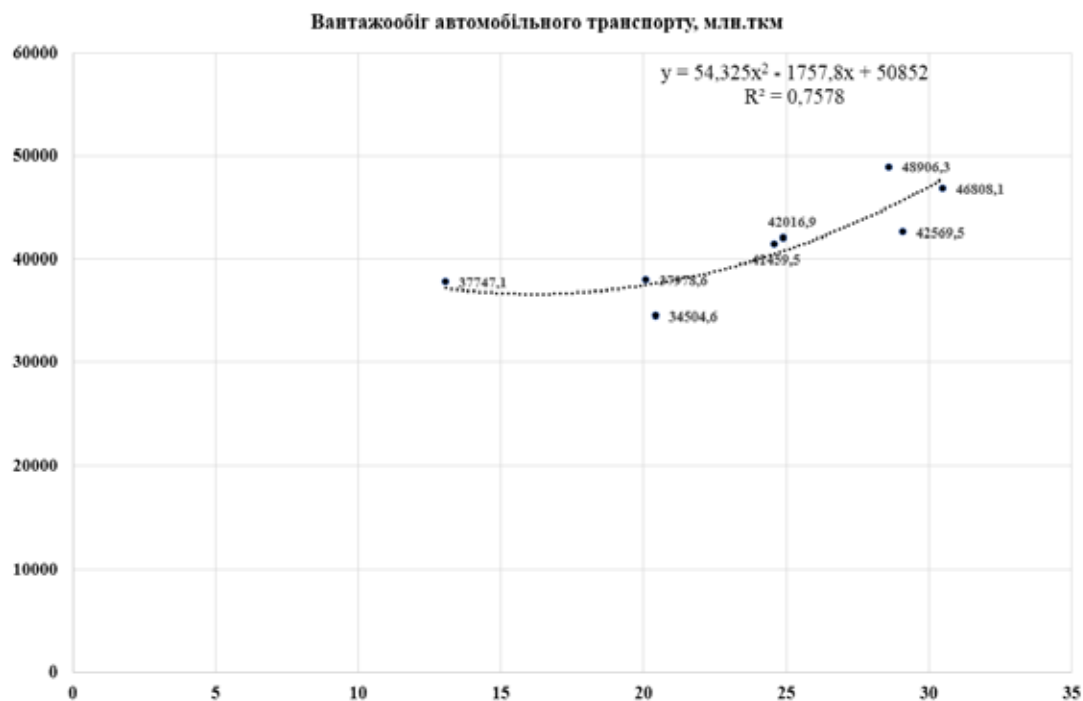


Рис. 3. Графік залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 (поліноміальна модель 2-го степеня)

Отже, функціональна залежність має вигляд

$$y = 54,325x^2 - 1757,8x + 50852. \quad (2)$$

Величина апроксимації $R^2 = 0,7578$. Оскільки $0,5 < R^2 < 0,8$, то функціональна залежність також прийнятна для опису зв'язку між величиною вантажообігу автомобільного транспорту та ціною на бензин марки А-95. В порівнянні з лінійною моделлю (1), величина апроксимації більша, тому поліноміальна модель 2-го степеня (2) краще описує залежність між розглянутими величинами.

Оберемо поліноміальну функцію 3-го степеня (рис. 4). Оскільки величина апроксимації $R^2 = 0,8162$ ($0,8 < R^2 < 1$), то функціональна залежність достатньо точно описує зв'язок між величиною вантажообігу автомобільного транспорту та ціною на бензин марки А-95. Тому для подальшого дослідження та аналізу обираємо функціональну залежність

$$y = -9,7229x^3 + 689,09x^2 - 14953x + 137200. \quad (3)$$

Отже, для подальшого дослідження та аналізу обираємо поліноміальну функцію 3-го степеня (3), одержану на основі даних вантажообігу автомобільного транспорту та ціни на бензин марки А-95 з 2014 року по 2022 рік.

Емпірична функція регресії має вигляд:

$$\hat{y} = -9,7229x^3 + 689,09x^2 - 14953x + 137200. \quad (4)$$

Теоретична функція регресії має вигляд:

$$y = -9,7229x^3 + 689,09x^2 - 14953x + 137200 + u, \quad (5)$$

де u – випадкова складова.

Причини наявності випадкової складової u в регресійній моделі (4) обумовлені введенням в модель не всіх пояснюючих змінних. Для дослідження було розглянуто залежність вантажообігу автомобільного транспорту лише від ціни на бензин марки А-95 з метою спрощення реальної ситуації, та вважаючи ціну на бензин – одним із домінуючих факторів впливу. Реальна ситуація є складною композицією різних факторів, що призводить до відхилення реальних значень вантажообігу автомобільного транспорту від його

змодельованих значень. Також похибки збору статистичних даних впливають на розбіжності між модельними та емпіричними даними, що позначається на величині випадкової складової. Обмеженість зібраних статистичних даних з 2014 по 2021 рік також відображена у випадковій складовій u . Одним із найбільш непередбачуваних факторів, що обумовлює появу випадкової складової, є людський фактор. Ця причина може “зіпсувати” найякіснішу модель. Навіть при правильному виборі форми моделі, скрупульозному доборі пояснюючих змінних неможливо спрогнозувати поведінку кожного індивідуума.

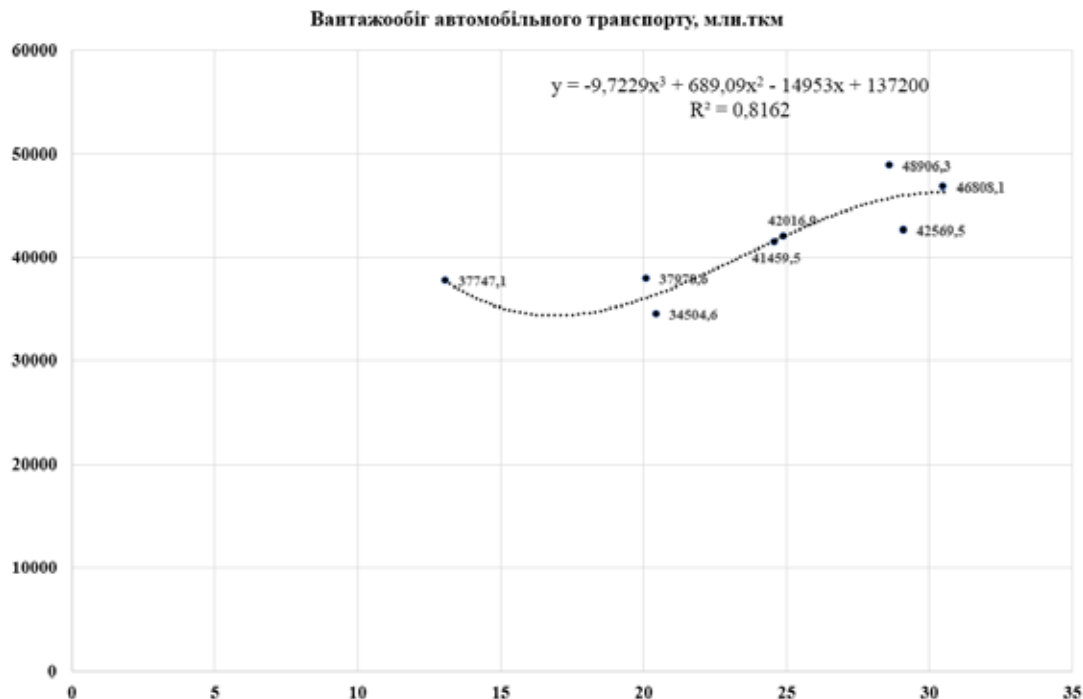


Рис. 4. Графік залежності вантажообігу автомобільного транспорту від ціни на бензин марки А-95 (поліноміальна модель 3-го степеня)

3. Для даної функції регресії (4) достовірність апроксимації [10] (коефіцієнт детермінації) $R^2 = 0,8162$ ($0,8 < R^2 < 1$), тому можна вважати, що побудована функція регресії на 81,62% відповідає вхідним статистичним даним вантажообігу автомобільного транспорту та цін на бензин марки А-95.

Обчислимо індекс кореляції R за формулою

$$R = \sqrt{R^2}. \quad (6)$$

$$R = \sqrt{0,8162} = 0,9.$$

Оскільки величини R^2 і R наближаються до одиниці, то для побудованої функції регресії (5) це свідчить про її достовірність.

Обчислимо емпіричні значення $\hat{y}_i$, використавши функцію регресії (1).

Обчислимо залишки функції регресії u_i за формулою

$$u_i = y_i - \hat{y}_i. \quad (7)$$

Обчислимо відносні похибки залишків функції регресії δ_i за формулою

$$\delta_i = \frac{u_i}{y_i} \cdot 100\%. \quad (8)$$

Обчислимо середнє значення відносної похибки залишків $\bar{\delta}$ за формулою

$$\bar{\delta} = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n \delta_i. \quad (9)$$

$$\bar{\delta} = \frac{1}{8} \cdot \sum_{i=1}^8 \delta_i = \frac{1}{8} \cdot (-1,52\%) = -0,19\%.$$

Оскільки $\bar{\delta} = -0,19\%$ значно менше 10% , то функцію регресії можна вважати достатньо точною.

4. а) обчислимо точковий прогноз y_{np} обсягу вантажообігу автомобільного транспорту для заданого значення $x_{np} = 55,55 \text{ грн}$ ціни на бензин марки А-95 станом на І квартал 2025 року.

Використавши для точкового прогнозу побудовану емпіричну функцію регресії (4):

$$\hat{y}_{np} = -9,7229x_{np}^3 + 689,09x_{np}^2 - 14953x_{np} + 137200.$$

Значення $\hat{y}_{np}$ обсягу вантажообігу автомобільного транспорту на 2025 рік за умови ціни $55,55 \text{ грн}$ за 1 л на бензин марки А-95 згідно одержаної функції регресії (4):

$$\hat{y}_{np} = 38321,1 \text{ (млн.ткм)}.$$

З ймовірністю 95% можна стверджувати, що обсяг вантажообігу автомобільного транспорту на 2025 рік за умови ціни $55,55 \text{ грн}$ за 1 л: $y_{np} = 38321,1 \text{ (млн.ткм)}$.

Висновки. У даному дослідженні, спираючись на статистичні дані, за допомогою табличного процесора Microsoft Excel побудовано функцію залежності вантажообігу автомобільного транспорту від вартості бензину марки А-95. Здійснено регресійний аналіз, в результаті якого підтверджено достовірність отриманої моделі. Статистичні висновки, зроблені у рамках дослідження, мають рівень довіри 95% , що свідчить про надійність одержаних результатів.

Побудована функція регресії є статистично значущою та може бути використана для прогнозування майбутніх обсягів вантажообігу автомобільного транспорту залежно від зміни цін на бензин марки А-95. Згідно з розрахунками, при прогнозованій вартості бензину $55,55 \text{ грн}$ за літр у 2025 році, очікуваний обсяг вантажообігу становитиме приблизно $38\,321,1 \text{ млн. ткм}$.

Результати дослідження мають важливе прикладне значення. Вони можуть бути використані у процесі стратегічного планування транспортної логістики, зокрема для оптимізації перевезень автомобільним транспортом, а також при аналізі тенденцій зовнішньої та внутрішньої торгівлі. Отримана модель дозволяє враховувати вплив паливної політики на транспортну інфраструктуру та забезпечує основу для прийняття економічно обґрунтованих управлінських рішень.

У подальших дослідженнях доцільно розширити модель, врахувавши додаткові фактори, які можуть впливати на вантажообіг автомобільного транспорту, зокрема: рівень економічної активності, зміни в законодавстві, курс національної валюти, вартість технічного обслуговування транспортних засобів, а також сезонні коливання. Також перспективним є використання більш складних моделей та машинного навчання для підвищення точності прогнозування.

Список використаних джерел:

1. Пашенко Ю.Є., Никифрук О.І., Чмирьова Л.Ю., Чернявський Ю.І. Науково-методичні основи формування стратегії розвитку транспортно-дорожнього комплексу. *Стратегічні пріоритети та сучасні завдання розвитку реального сектору економіки України*: колективна монографія РВПС України НАН України. Черкаси, 2007. С. 197–230.
2. Nykyforuk O., Stasyuk O., Chmyrova L., Fediai N. System of digital transformation indicators in transport sector. *European Journal of Intelligent Transportation Systems*. 2019. № 1(2). P. 3–12. DOI: 10.31435/rsglobal_ejits/31072019/6576.
3. Лебідь В.В., Мейш Ю.А., Майбородіна Н.В., Герасименко В.П. Застосування математичного моделювання до побудови лінійної багатофакторної моделі перевезень вантажів у міжнародному сполученні. *Вісник Національного транспортного університету. Серія «Технічні науки»*. 2022. № 51. С. 260 – 266. DOI: 10.33744/2308-6645-2022-1-51-260-266.
4. Barbir I. Regulatory and legal support of the process of involving Public Private Partnership in the field of socio-transport infrastructure at the local level in Ukraine. *International Journal of Public Administration, Management and Economic Development*. 2021. Vol. 6, № 1, P. 3–6.
5. Didkivskyi V. Development of public management system of transport safety on commercial transport by the reforming of the public authorities structure. *East European Scientific Journal*. 2021. Vol. 3 (67), № 5. P. 67–72.
6. Деревянко Б. В. Заходи підвищення рівня безпеки руху автомобільного транспорту в Україні. *Розвиток сталої мобільності: глобальні та локальні рішення* : матеріали міжнар. наук.-практ. конф., Кропивницький, 15 листоп. 2024 р. Кропивницький, 2024. С. 69–71.
7. Терентьев О. М., Сергієнко М. І., Смоляр В. Г. Вплив промислового автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Енергетика : економіка, технології, екологія : науковий журнал*. 2020. № 3 (61). С. 85–91.
8. Олішевська В. Є. Екологічний вплив автомобільного транспорту на навколишнє середовище. *Інноваційні технології підготовки кадрів для промисловості та транспорту* : зб. наук. пр. міжнар. конф., м. Дніпро, 28-29 квітня 2023р. Дніпро, 2023. С. 147–152.
9. Дмитрів І., Скиба М. Вплив вікової структури парку легкових автомобілів на екологію великого міста. *Молодий вчений*. 2022. № 8 (108). С. 8–12. DOI: 10.32839/2304-5809/2022-8-108-3.

-
10. Майбородина Н. В. Економетрика : навч. посіб. Ніжин: ПП Лисенко М. М., 2021. 280 с.
11. Державна служба статистики України. URL: <https://www.ukrstat.gov.ua/> (дата звернення: 08.04.2025).

References:

1. Pashchenko, Yu. Ye., Nykyforuk, O. I., Chmyrova, L. Yu., & Cherniavskyi Yu.I. (2007). Naukovo-metodychni osnovy formuvannia stratehii rozvytku transportno-dorozhnoho kompleksu. Stratehichni priorytety ta suchasni zavdannia rozvytku realnoho sektoru ekonomiky Ukrainy: kolektyvna monohrafiia RVPS Ukrainy NAN Ukrainy. (с. 197-230). Cherkasy.
2. Nykyforuk, O., Stasyuk, O., Chmyrova, L., & Fediai N. (2019). System of digital transformation indicators in transport sector. *European Journal of Intelligent Transportation Systems*, (1). 3-12. https://doi.org/10.31435/rsglobal_ejits/31072019/6576.
3. Lebid, V. V., Meish, Yu. A., Maiborodina, N. V., & Herasymenko, V. P. (2022). Zastosuvannia matematychnoho modeliuvannia do pobudovy liniinoi bahatofaktornoї modeli perevezen vantazhiv u mizhnarodnomu spoluchenni. *Visnyk Natsionalnoho transportnoho universytetu. Seriia «Tekhnichni nauky»*, (51), 260 – 266. <https://doi.org/10.33744/2308-6645-2022-1-51-260-266>.
4. Barbir, I. (2021). Regulatory and legal support of the process of involving Public Private Partnership in the field of socio-transport infrastructure at the local level in Ukraine. *International Journal of Public Administration, Management and Economic Development*, (6), 3.
5. Didkivskyi, V. (2021). Development of public management system of transport safety on commercial transport by the reforming of the public authorities structure. *East European Scientific Journal*. (67). 67-72.
6. Derevianko, B.V. (2024). Zakhody pidvyshchennia rivnia bezpeky rukhu avtomobilnoho transportu v Ukraini. Rozvytok staloi mobilnosti: hlobalni ta lokalni rishennia: materialy Mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 69-71.
7. Terentiev, O. M., Serhiienko, M. I., & Smoliar, V. H. (2020). Vplyv promyslovoho avtomobilnoho transportu na navkolyshnie seredovyshe. *Enerhetyka: ekonomika, tekhnolohii, ekolohiia: naukovyi zhurnal*, (61), 85-91.
8. Olishevskaya, V. Ye. (2023). Ekolohichniy vplyv avtomobilnoho transportu na navkolyshnie seredovyshe. *Innovatsiini tekhnolohii pidhotovky kadriv dlia promyslovosti ta transportu*, 147-152.
9. Dmytriv, I., & Skyba, M. Vplyv vikovoi struktury parku lehkovykh avtomobiliv na ekolohiiu velykoho mista. *Molodyi vchenyi*, (108), 8-12. <https://doi.org/10.32839/2304-5809/2022-8-108-3>.
10. Maiborodina, N. V. (2021). *Ekonometryka*. Nizhyn: PP Lysenko M.M.
11. Derzhavna sluzhba statystyky Ukrainy. Vylucheno z <https://www.ukrstat.gov.ua/>

Продан Д. Є., заступник командира частини з психологічної підтримки персоналу
Державної спеціальної служби транспорту України
ORCID: 0000-0007-9841-8286

Рибальченко Л. В., кандидат економічних наук, доцент,
доцент кафедри кібербезпеки та інформаційних технологій
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-0413-8296

Чубенко О. І., аспірант
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0007-5157-8020

Бібік М. В., студент
Українського державного університету науки і технологій
ORCID: 0009-0002-5938-6967

ЦИФРОВІЗАЦІЯ ЛОГІСТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ, УПРАВЛІННЯ РЕСУРСАМИ ТА ОПЕРАТИВНЕ ПЛАНУВАННЯ В ДЕРЖАВНІЙ СПЕЦІАЛЬНІЙ СЛУЖБІ ТРАНСПОРТУ

У статті розглянуто актуальну проблему цифровізації логістичних процесів, управління ресурсами та оперативного планування в умовах специфічних завдань Державної спеціальної служби транспорту (далі – Держспецтрансслужба). Запровадження цифрових технологій дає змогу істотно підвищити ефективність управління матеріальними та технічними ресурсами, скоротити час на прийняття рішень і оптимізувати внутрішні процеси, що є особливо важливим за умови необхідності виконання завдань із забезпечення безперервного функціонування критичної транспортної інфраструктури держави.

У межах дослідження визначено низку ключових ініціатив, спрямованих на впровадження єдиної цифрової системи управління логістикою та ресурсами, геоінформаційного моніторингу стану об'єктів інфраструктури, автоматизацію оперативного планування й реагування, а також розробку мобільних додатків для посиленої координації особового складу. Зазначено, що застосування геоінформаційних систем (ГІС) дає можливість візуалізувати та оперативно аналізувати стан об'єктів критичної транспортної інфраструктури, забезпечуючи своєчасне виконання ремонтно-відбудовних робіт і підвищуючи загальну безпеку транспортних вузлів.

Методологія дослідження передбачає порівняльний аналіз сучасних цифрових платформ, математичне моделювання логістичних процесів, а також застосування статистичних методів для оцінювання ефективності впровадження даних ініціатив. Для підтвердження гіпотез щодо впливу цифровізації на оперативність і точність планування було проведено експериментальне моделювання на основі реальних даних про використання ресурсів і транспортних засобів у підрозділах Держспецтрансслужби.

Отримані результати демонструють зменшення витрат часу й ресурсів, а також підвищення швидкості реагування завдяки вчасній обробці критично важливої інформації. На основі порівняння з попередніми дослідженнями та проєктами з цифрової трансформації у військовій і транспортній сферах зроблено висновки, що запропоновані заходи можуть забезпечити суттєвий приріст ефективності Держспецтрансслужби. Запропоновано перспективні напрями подальших досліджень, зокрема інтеграцію з іншими державними й військовими структурами задля посилення взаємодії та розширення функціональних можливостей цифрових платформ.

Ключові слова: цифровізація, логістика, ГІС, оперативне планування, управління ресурсами, Держспецтрансслужба, військова інфраструктура, інформаційні системи, транспортні потоки, оптимізація.

Prodan D. Ye., Rybalchenko L. V., Chubenko O. I., Bibik M. V. Digitalization of logistics processes, resource management and operational planning in the State Special Transport Service

The article deals with the topical problem of digitalization of logistics processes, resource management and operational planning in the conditions of specific tasks of the State Special Transport Service (hereinafter – the State Support Service). The introduction of digital technologies makes it possible to significantly increase the efficiency of managing material and technical resources, reduce decision-making time and optimize internal processes, which is especially important if the tasks of ensuring the continuous functioning of the critical transport infrastructure of the state.

The study identifies a number of key initiatives aimed at introducing a single digital logistics and resource management system, geoinformation monitoring of infrastructure facilities, automation of operational planning and response, as well as the development of mobile applications for enhanced personnel coordination. It is noted that the use of geoinformation systems (GIS) makes it possible to visualize and quickly analyze the state of critical transport infrastructure, ensuring timely repair and repair work and increasing the overall safety of transport units.

The research methodology involves a comparative analysis of modern digital platforms, mathematical modeling of logistics processes, as well as the use of statistical methods to evaluate the effectiveness of implementation of initiatives. To confirm hypotheses on the impact of digitalization on efficiency and planning accuracy was

Experimental modeling was conducted on the basis of real data on the use of resources and vehicles in the units of the State Summer Service.

The results demonstrate a reduction in time and resources, as well as increasing the response rate through timely processing of critically important information. On the basis of comparison with previous studies and areas of digital transformation in the military and transport spheres, it is concluded that the proposed measures can ensure a significant increase in the efficiency of the State Support Service. Prospective areas of further research are proposed, including integration with other state and military structures to enhance the interaction and expand the functional capabilities of digital platforms.

Key words: digitalization, logistics, GIS, operational planning, resource management, State Supreme Support, Military Infrastructure, Information Systems, Transport Flows, Optimization.

Постановка проблеми. Стрімкий розвиток цифрових технологій відкриває нові можливості для підвищення ефективності логістичних процесів і покращення оперативного планування у військовій та спеціалізованій транспортній галузі. Державна спеціальна служба транспорту (Держспецтрансслужба) виконує надзвичайно важливі функції з організації, обслуговування та відновлення транспортної інфраструктури в умовах як мирного часу, так і надзвичайних чи воєнних ситуацій [1-3]. У контексті зростаючих загроз і потреби в оперативних діях цифровізація стає ключовим інструментом, що дає змогу суттєво підвищити адаптивність і керованість у реальному часі.

Актуальність теми зумовлена такими чинниками:

- зростання обсягів інформації, що потребує швидкої та точної обробки під час планування та розподілу ресурсів;
- необхідність оперативного реагування на непередбачувані виклики, пов'язані зі збереженням та відновленням об'єктів критичної транспортної інфраструктури;
- посилення вимог до безпеки та ефективності управління матеріальними й технічними ресурсами;
- запит на інтеграцію військово-логістичних процесів у глобальну цифрову інфраструктуру для забезпечення своєчасного й синхронізованого реагування.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Науковий аналіз впливу цифровізації на логістичні процеси проводяться як в Україні, так і за кордоном, і спрямовані на вивчення ролі новітніх технологій у підвищенні ефективності управління ланцюгами постачання. У публікаціях та статтях закордонних авторів відзначається, що основними напрямками цифровізації в логістиці є використання великих даних, Інтернету речей (IoT), а також роботизація складських та транспортних операцій.

Свої роботи цьому питанню присвятили такі науковці, як Довгунь О., Стасюк К., Гуржій Н., Гавран В., Сапотніцька Н., Платуха Г., Длігач А., Скіцька В., Крикавський Є., Маковоз О., Вишневецький О., Токмакова І., Шраменко Н., Штельмашук М. [4] та інші.

Крім того, в Україні активно досліджуються питання автоматизації складських процесів, зокрема за допомогою роботизованих систем. Згідно з результатами дослідження компанії DHL, автоматизовані склади дозволяють зменшити витрати на обробку вантажів на 20% у порівнянні з традиційними складами, оскільки автоматизація значно знижує необхідність у фізичній праці та покращує швидкість обробки товарів.

Постановка завдання. Метою дослідження є: розробка комплексних підходів до цифровізації логістичних процесів у Держспецтрансслужбі; обґрунтування методів і моделей, що забезпечують оперативне планування та розподіл ресурсів на основі даних реального часу; оцінювання впливу запропонованих цифрових рішень на ефективність управління ресурсами й логістичними ланцюгами; розробка рекомендацій щодо інтеграції цифрових систем управління з існуючими процедурами й інструментами планування.

Таким чином, узагальнення наукового й практичного досвіду, а також побудова відповідної методології, можуть допомогти Держспецтрансслужбі реалізувати ефективніший підхід до управління ресурсами та швидкого реагування у кризових ситуаціях. У подальшому такі напрацювання можуть бути корисними й для інших державних установ із подібними завданнями [5, 6].

Виклад основного матеріалу. Методи. У ході дослідження було застосовано комплексний підхід, який поєднує елементи математичного моделювання логістичних процесів, методів теорії управління запасами, геоінформаційних систем (ГІС) та аналізу великих даних. Обрані методи зумовлені специфікою завдань Держспецтрансслужби, де особливу роль відіграють оперативність, точність та можливість інтегрованого аналізу різних типів даних (геопросторових, технічних, ресурсних тощо).

1. Алгоритмічна основа та математичні моделі

Біометрична ідентифікація використовує унікальні фізіологічні або поведінкові характеристики особи для підтвердження її особистості. Сучасні методи біометричної ідентифікації забезпечують високий рівень безпеки та точності, що робить їх популярними у сферах безпеки, доступу та контролю. В таблиці 1 наведено основні біометричні методи, які активно використовуються сьогодні.

Таблиця 1

Параметри та інструментарій дослідження

Параметр	Опис
Період спостереження	12 місяців у режимі реального часу
Основні дані	Обсяги ресурсів, час виконання логістичних операцій, координати об'єктів інфраструктури
Математичні моделі	Транспортна задача, стохастична оптимізація, імітаційні моделі

Кожен метод біометричної ідентифікації має свої переваги і недоліки, залежно від конкретної сфери застосування. У сучасних системах безпеки все частіше використовуються комбінації кількох біометричних методів для підвищення точності та надійності ідентифікації.

Для опису процесів планування логістичних операцій було використано мережеві моделі типу «орієнтовані граfi», де вершини відображають пункти транспортування (склади, проміжні бази, мости, ділянки доріг), а ребра – можливі маршрути пересування техніки та постачання ресурсів [7]. Оптимізаційна задача формулюється таким чином.

$$\min \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m c_{ij} x_{ij}, \quad (1)$$

де c_{ij} – вартість (або час) транспортування ресурсу з пункту i до пункту j , а x_{ij} – кількість ресурсів, що транспортуються цим маршрутом.

Обмеження накладаються на загальні доступні обсяги ресурсів, пропускну спроможність маршруту й потреби у відповідних пунктах призначення:

$$\sum_{j=1}^m x_{ij} = S_i \quad \forall i \quad (2)$$

де S_i – доступний обсяг ресурсів у пункті i .

Водночас у військово-специфічних умовах задачі з оптимізації маршрутів ускладнюються факторами ризику, недоступності певних територій, потребою в пріоритетному забезпеченні критичних об'єктів інфраструктури. Для оцінювання цих факторів застосовано методи стохастичного моделювання та імітаційні підходи [8-10].

2. Геоінформаційні технології

Інтеграція геоінформаційних систем (ГІС) дає змогу отримувати та обробляти супутникові та аерофотознімки (зокрема, з використанням безпілотних літальних апаратів), що підвищує точність даних про стан об'єктів транспорту. – Накладання шарів даних про дороги, мости, пропускні спроможності із захищеними каналами зв'язку дозволяє автоматично моделювати альтернативні логістичні сценарії та обирати оптимальні маршрути [11]. -ГІС-платформа інтегрується з мобільними додатками особового складу, де кожен виконавець отримує актуальну інформацію про стан маршрутів, потреби у матеріалах і техніці, плани евакуації тощо.

3. Методи статистичної обробки даних

Для оцінювання ефективності впровадження цифрових рішень застосовано кореляційно-регресійний аналіз, що дав змогу встановити залежність між рівнем цифровізації та оперативністю виконання завдань. – Використано дисперсійний аналіз (ANOVA) для визначення статистичної значущості змін у показниках часу прийняття рішень, оптимізації маршрутів і скорочення витрат ресурсів [12]. – З метою виявлення потенційних ризиків і аномалій у даних застосовано методи машинного навчання (Machine Learning) та розпізнавання образів, особливо під час аналізу геопросторової інформації [13-14].

Результати. На основі застосованих моделей і методів було розгорнуто пілотну інтегровану платформу, яка поєднує облік ресурсів (паливо, будівельні матеріали, запасні частини), геопросторовий аналіз маршрутів та автоматизовану систему планування робіт у підрозділах Держспецтрансслужби. Пілотний проєкт охоплював три регіони з різними умовами інфраструктури (автодорожня, залізнична, мостові переходи).

1. Покращення оперативного планування

Результатом впровадження єдиної цифрової системи став перехід від ручного (паперового) способу планування до автоматизованого. Середній час ухвалення управлінських рішень щодо розподілу ресурсів зменшився приблизно на 40%, а середній час реагування на надзвичайні ситуації скоротився майже на 35%.

Завдяки оперативному доступу до оновлених даних вдалося підвищити координацію між підрозділами та зменшити дублювання операцій і нецільове використання ресурсів [15].

2. Оптимізація логістичних процесів і зменшення витрат

В рамках моделювання маршрути транспортування було оптимізовано з урахуванням обмежень пропускної спроможності доріг і мостів, а також пріоритетності забезпечення критичних об'єктів. Застосування математичних методів (формул 1-2) дало змогу знизити загальні витрати на логістику в середньому на 20-25%, що підтверджується результатами кореляційно-регресійного аналізу (коефіцієнт кореляції між рівнем цифровізації та зниженням витрат становить близько $r=0.76$ при $p<0.05$) [16-18].

3. Аналіз стану об'єктів критичної транспортної інфраструктури

Використання ГІС-модулів для моніторингу мостів, дорожніх ділянок та залізничних вузлів (див. рис. 1) дозволило проводити оперативний аналіз пошкоджень у разі надзвичайних ситуацій. Зокрема, були розроблені шаблони оцінки ризиків, що ґрунтуються на прогнозних моделях (аналітика на базі супутникових знімків, доповнена зображеннями з дронів). Це дало можливість завчасно виявляти критичні точки, що потребують ремонту чи посилення [19].

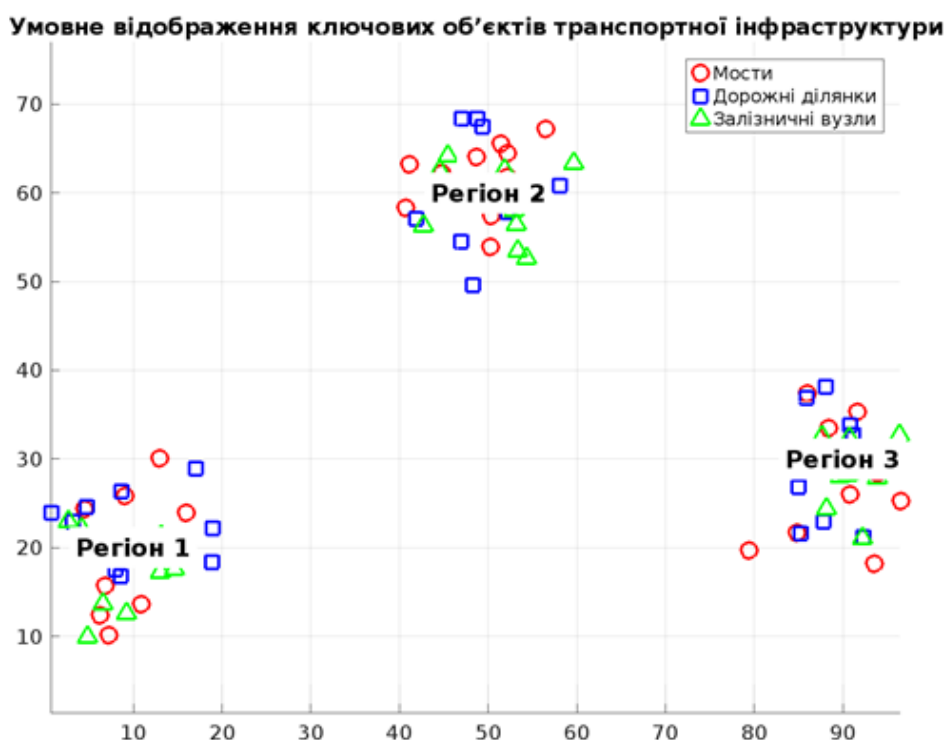


Рис. 1. Умовне відображення ключових об'єктів транспортної інфраструктури в трьох регіонах (схематичні зображення)

Узагальнення результатів. Для зручності представлені дані зведено в таблицю 2. У ній наведено порівняння ключових показників «До впровадження» та «Після впровадження» пілотного проекту цифровізації логістичних процесів.

Таблиця 2

Основні результати впровадження цифрової платформи

Показник	До впровадження	Після впровадження	Відносна зміна, %
Середній час ухвалення рішень	5 годин	3 години	-40
Час реагування на НС Логістичні витрати	2 дні	100%	1.3 дні

Таким чином, експериментальне впровадження цифрової системи для трьох регіонів підтвердило гіпотезу про позитивний вплив цифровізації на оперативність і ефективність виконання завдань Держспецтрансслужби.

Обговорення. Отримані результати свідчать, що впровадження інтегрованих цифрових рішень у Держспецтрансслужбі є високоєфективним інструментом для:

- а) скоординованого управління ресурсами в режимі реального часу;
- б) моніторингу та планування ремонтних чи відбудовних робіт на об'єктах критичної інфраструктури;
- в) оптимізації логістичних ланцюгів з урахуванням обмежень пропускної спроможності й ризиків пошкоджень.

Порівняно з іншими дослідженнями у сфері військової логістики та цифрової трансформації [20, 21], запроваджений підхід дає змогу комплексно аналізувати стан транспортної інфраструктури та оперативно реагувати на зміну ситуації. Якщо у традиційних моделях реалізується переважно управління запасами або вибір оптимальних маршрутів, то в даному проєкті вирішено завдання об'єднання ГІС-даних, моделей прогнозування ризиків і мобільних додатків для особового складу.

Водночас існують певні обмеження дослідження, а саме: неможливість урахувати всі воєнні ризики та раптові зміни обставин (наприклад, пошкодження інфраструктури) в рамках одного пілотного проєкту; залежність точності прогнозів від якості початкових даних (супутникових зображень, звітів з підрозділів тощо); необхідність подальших інвестицій у кібербезпеку для гарантування захисту інформаційної системи від несанкціонованого доступу.

Перспективні напрями подальших досліджень:

- Розширення функціоналу платформи для інтеграції з іншими державними та військовими системами, що дозволить масштабувати рішення на загальнодержавний рівень.
- Застосування штучного інтелекту (AI) для глибшого аналізу великих масивів даних у режимі реального часу (наприклад, виявлення аномалій у русі транспорту або передбачення аварійності).
- Модульні розробки для мобільних додатків, що включатимуть розширений функціонал доповненої реальності (AR) для візуалізації логістичних маршрутів та пошкоджень інфраструктури.

Загалом, результати підтверджують висунуті гіпотези про те, що комплексний підхід до цифровізації логістичних процесів, управління ресурсами та оперативного планування дозволяє суттєво скоротити витрати, зменшити час прийняття рішень і підвищити надійність функціонування критичної транспортної інфраструктури.

Висновки. У статті продемонстровано, що цифровізація логістичних процесів у Держспецтрансслужбі є потужним драйвером підвищення ефективності управління матеріально-технічними ресурсами, швидкості реагування на надзвичайні ситуації та зменшення операційних витрат. Інтеграція ГІС, автоматизованих систем планування та мобільних додатків для особового складу забезпечує централізовану координацію, оперативний моніторинг і відображення ключових показників у реальному часі. Запропонована методологія підтверджена емпіричними результатами, отриманими під час пілотного впровадження у трьох регіонах. Рекомендації для практичного застосування:

1. Поглиблення інтеграції з існуючими системами: слід врахувати можливості взаємодії з іншими державними й військовими системами, щоб уникнути дублювання даних і покращити сумісність.
 2. Забезпечення належного рівня кібербезпеки: запровадити додаткові засоби захисту даних, оскільки військова й критична транспортна інформація є об'єктом підвищеного ризику.
 3. Розширення функціоналу: включити модулі для прогнозування потреб у ресурсах на основі аналізу історичних даних і поточної ситуації в реальному часі.
 4. Безперервне навчання персоналу: постійні тренінги та симуляції допоможуть підвищити рівень кваліфікації особового складу й ефективність використання цифрових інструментів.
- Отримані в роботі результати можуть стати основою для масштабування системи на всеукраїнському рівні та бути адаптованими для потреб інших військових формувань, що відповідають за транспортну та логістичну безпеку.

Список використаних джерел:

1. Сущенко Р., Ільченко Н. Адаптація ланцюгів постачання до викликів воєнного стану. Міжнародний науково-практичний журнал «Товари та ринки». № 1 (45). 2023. С. 4-16.
2. Brandon-Jones A., Burgess N., Slack N. Essentials of Operations Management. Longman (Pearson Education). 2023. 560 с.
3. Klibi W., Martel A. Scenario-based supply chain network risk modeling. 2012. *European Journal of Operational Research*. Elsevier, vol. 223(3), p. 644-658. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.06.027
4. Штельмашук М. С. Цифровізація та автоматизація логістичних процесів: сучасний стан та перспективи. *Економіка та суспільство*. Вип. 68. 2024. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-193>
5. Kache F., Seuring S. Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*. 2017. Т. 37, № 1. С. 10–36. DOI: 10.1108/IJOPM-02-2015-0078
6. Ahuja R., Magnanti T., Orlin J. Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Upper Saddle River, Prentice-Hall, 1993. 864 с.

-
7. Law A. M. Simulation Modeling and Analysis. *Sixth Edition*. New York: McGraw-Hill, 2024. 784 c.
 8. Ross S. M. Introduction to Probability Models. 10th ed. *Academic Press is an imprint of Elsevier*. 2010. 801 c.
 9. Milewski R., Smal T. Decision making scenarios in military transport processes. *Archives of Transport* 45(1). 2018. p. 65-81. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0945
 10. Montgomery D. C. Design and Analysis of Experiments. *John Wiley & Sons*, 2021. 656 c.
 11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. Cambridge: MIT Press, 2016. p.800.
 12. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. An Introduction to Statistical Learning. New York: Springer, 2021. 617 c. DOI: 10.1007/978-1-0716-1418-1
 13. Gunasekaran, Angappa, Yusuf, Yahaya Y., Adeleye, Ezekiel O., Papadopoulos, Thanos, Kovvuri, Dharma, Geyi, Dan'Asabe G. (2018) *Agile manufacturing: an evolutionary review of practices*. International Journal of Production Research, 57 (15-16). pp. 5154-5174. DOI: 10.1080/00207543.2018.1530478
 14. Tang C. S., Tomlin B. The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*. 2008. 116(1):12-27. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.07.008
 15. Kalantari H., Ghazanfari M., Fathian M. Multi-objective optimization model in a heterogeneous weighted network through key nodes identification in overlapping communities. *Computers & Industrial Engineering*. 2020. 144:106413. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106413
 16. Prasad S. Thenkabail. Remote Sensing Handbook – Three Volume Set. Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies. 2015. p.2000
 17. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B. Supply Chain Logistics Management. McGraw-Hill, 2002. P.658.
 18. Young R. Humanitarian Logistics: Meeting the Challenge of Preparing for and Responding to Disasters. *Transportation Journal* 51(3). 2012. 280 c.
 19. Kunaka C. Logistics in lagging regions: Overcoming local barriers to global connectivity. World Bank Publications. 2010. p.80.
 20. Hao Shi, Fei Wan, Xiaokang Lei. Research on Military Logistics based on Big Data. *Advances in Computer Science Research*, volume 87. 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019). 2019. p. 231–237.
 21. Papadopoulos T., Gunasekaran A., Dubey R. Big data and analytics in operations and supply chain management: managerial aspects and practical challenges. *Production Planning & Control*. 2017. 28(11-12):873-876. DOI:10.1080/09537287.2017.1336795

References:

1. Sushchenko R., Ilchenko N. (2023). Adaptacija lancjugiv postachannja do vyklykiv vojennoho stanu. *Mizhnarodnyj naukovopraktychnyj zhurnal "Tovary i rynky"*. № 1 (45). S.4-16
2. Brandon-Jones A., Burgess N., Slack N. (2023). *Essentials of Operations Management*. Longman (Pearson Education). 560 p.
3. Klibi W., Martel A. (2012). Scenario-based supply chain network risk modeling. *European Journal of Operational Research*. Elsevier, vol. 223(3), p. 644-658. DOI: 10.1016/j.ejor.2012.06.027
4. Stelmashuk M. S. (2024). Digitalization and automation of logistics processes: current state and prospects. *Economics and society*. no. 68. DOI: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2024-68-193>
5. Kache F., Seuring S. (2017). Challenges and opportunities of digital information at the intersection of Big Data Analytics and supply chain management. *International Journal of Operations & Production Management*. (Vol. 37), no. 1. pp. 10–36. DOI: 10.1108/IJOPM-02-2015-0078
6. Ahuja R., Magnanti T., Orlin J. (1993). *Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications*. Upper Saddle River, Prentice-Hall, 864 c.
7. Law A. M. (2024). Simulation Modeling and Analysis. *Sixth Edition*. New York: McGraw-Hill, 2024. 784 c.
8. Ross S. M. (2010). Introduction to Probability Models. 10th ed. *Academic Press is an imprint of Elsevier*. 801 c.
9. Milewski R., Smal T. (2018). Decision making scenarios in military transport processes. *Archives of Transport* 45(1). p. 65-81. DOI: 10.5604/01.3001.0012.0945
10. Montgomery D. C. (2021). Design and Analysis of Experiments. *John Wiley & Sons*. 656 c.
11. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. (2016). Deep Learning. Cambridge: MIT Press. p.800.
12. James G., Witten D., Hastie T., Tibshirani R. (2021). An Introduction to Statistical Learning. New York: Springer. p. 617. DOI: 10.1007/978-1-0716-1418-1
13. Gunasekaran, Angappa, Yusuf, Yahaya Y., Adeleye, Ezekiel O., Papadopoulos, Thanos, Kovvuri, Dharma, Geyi, Dan'Asabe G. (2018). *Agile manufacturing: an evolutionary review of practices*. International Journal of Production Research, 57 (15-16). pp. 5154-5174. DOI: 10.1080/00207543.2018.1530478
14. Tang C. S., Tomlin B. (2008). The power of flexibility for mitigating supply chain risks. *International Journal of Production Economics*. 116(1):12-27. DOI: 10.1016/j.ijpe.2008.07.008

-
15. Kalantari H., Ghazanfari M., Fathian M. (2020). Multi-objective optimization model in a heterogeneous weighted network through key nodes identification in overlapping communities. *Computers & Industrial Engineering*. 144:106413. DOI: 10.1016/j.cie.2020.106413
 16. Prasad S. Thenkabail. (2015). Remote Sensing Handbook – Three Volume Set. Remotely Sensed Data Characterization, Classification, and Accuracies. P.2000.
 17. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B. (2002). Supply Chain Logistics Management. McGraw-Hill. P.658.
 18. Young R. (2012). Humanitarian Logistics: Meeting the Challenge of Preparing for and Responding to Disasters. *Transportation Journal* 51(3). 280 c.
 19. Kunaka C. (2010). Logistics in lagging regions: Overcoming local barriers to global connectivity. World Bank Publications. p.80.
 20. Hao Shi, Fei Wan, Xiaokang Lei. (2019). Research on Military Logistics based on Big Data. *Advances in Computer Science Research*, volume 87. 3rd International Conference on Mechatronics Engineering and Information Technology (ICMEIT 2019). p. 231–237.
 21. Papadopoulos T., Gunasekaran A., Dubey R. (2017). Big data and analytics in operations and supply chain management: managerial aspects and practical challenges. *Production Planning & Control*. 28(11-12):873-876. DOI:10.1080/09537287.2017.1336795

Разгонов С. А., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-1244-2047

Леснікова І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Огліх В. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, вчений секретар
Інституту транспортних систем та технологій
ORCID: 0000-0001-8788-3771

Шаповалов О. В., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-8788-3771

ПРО МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ КЕРОВАНИХ ОДНОКАНАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті розглянуто питання функціональної безпеки одноканальних транспортних пристроїв роботизованих бортових систем. Показано, що технічні пристрої на транспорті, які розробляються в даний час, в більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Так, у існуючих нормативних документах щодо надійності, комплексний показник надійності (коефіцієнт готовності пристрою) визначається у вигляді відношення середнього напрацювання на відмову до суми середнього напрацювання на відмову та середнього часу відновлення. Значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими. Таке трактування передбачає, будь-який відмова пристрою виявляється і потім відразу відновлюється, тобто вбудовані засоби контролю ідеальні. У реальних умовах складно створити засоби контролю, що забезпечують повну гарантію виявлення відмови. Розглянуто підхід, що формалізує прикладні проблеми функціональної безпеки та дає змогу знайти оптимальні рішення прикладних завдань. Технічні пристрої на транспорті, що розробляються в даний час, у більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Отримано формульні вирази стаціонарних імовірнісних для відновлюються одноканальних пристроїв із вбудованим апаратним контролем. Вони дозволяють враховувати реальні характеристики ефективності та надійності засобів контролю, підвищуючи при цьому достовірність одержуваних результатів аналізу систем. Відомо, що надійність транспортного пристрою ця властивість зберігати працездатність на протязі заданого часу із збереженням заданих експлуатаційних характеристик за відповідних технічних умов експлуатації. Ця властивість безпосередньо пов'язана з економічними експлуатаційними параметрами. В кінцевому підсумку, економічні параметри, в сучасних умовах, відіграють вирішальну роль як у виробництві цього пристрою, так і в бізнес-процесах експлуатації. Коротко розглянуте часові показники безпеки та надійності одноканального контрольованого пристрою. Визначено показники тривалості часу між відмовами та окремо між прихованими відмовами, а також часу відновлення та часу простою пристрою.

Ключові слова: модель, відмова, автоматичне керування, роботизовані бортові транспортні системи, функціональна безпека, одноканальні контрольовані пристрої.

Razghonov S. A., Lesnikova I. Yu., Oglih V. V., Shapovalov O. V. About the controlled single-channel transport devices functional safety model

The article considers the functional safety of single-channel transport devices of robotic on-board systems. It is shown that the technical devices currently being developed are mostly covered by built-in control. The safety and reliability of sin-

gle-channel controlled devices have not been given sufficient attention. Thus, in existing regulatory documents on reliability, a comprehensive reliability indicator (the device's readiness coefficient) is determined by the ratio of average work on refusal to the amount of average work on refusal and average recovery time. The values of the readiness coefficient are determined for the operating conditions of the object when the average failure of the refusal and the average duration of recovery remain constant. Such interpretation implies that any refusal of the device is detected and then immediately restored; that is, the built-in control tools are ideal. In real conditions, it is difficult to create controls that provide a complete guarantee of detection. The approach is considered that formalize applied functional safety problems and allows you to find optimal solutions to applied tasks. Technical devices the currently being developed are mostly covered by built-in control. The safety and reliability of single-channel controlled devices have not been given sufficient attention. The formula expressions of stationary probabilistic ones for renewed single-channel devices with built-in hardware have been obtained. They allow for taking into account the real characteristics of the efficiency and reliability of controls, while increasing the accuracy of the results of the analysis of the systems. It is known that the reliability of the transport device is the property to maintain performance for a given time with the preservation of the given performance characteristics under appropriate technical conditions of operation. This property is directly related to economic operational parameters. In the end, economic parameters, in modern conditions, play a crucial role in the production of this device and the business processes of operation. Briefly consider the time indicators of safety and reliability of a single-channel controlled device. The indicators of the duration of time between failures and separately between hidden failures, as well as the recovery time and downtime of the device, are determined.

Key words: model, failure, automatic control, robotic on-board transport systems, functional safety, single-channel controlled devices.

Постановка проблеми. Впровадження технологій автоматичного керування в роботизованих бортових транспортних системах вимагає побудови моделей, що формалізують прикладні проблеми функціональної безпеки та дають змогу знайти оптимальні рішення прикладних завдань.

Функціональна безпека є частиною загальної безпеки у вигляді системи або обладнання, яке залежить від системи або обладнання правильно працюючого у відповідь на його входи, в тому числі безпечного управління ймовірних помилок, збоїв обладнання і змін навколишнього середовища

З одного боку, функціональна безпека безпосередньо пов'язана з надійністю апаратної складової, і тут залишилося трохи не вирішених завдань, електроніка безвідмовно працює роками, а якщо цього недостатньо, то завжди є можливість резервування. Але є ще програмна складова, на яку якраз і покладається управління функціями безпеки. Властивість функціональної безпеки має забезпечити коректне виконання функцій системи управління, а при виникненні відмов перевести об'єкт управління на так званий безпечний стан. Об'єкти, якими управляють комп'ютерні системи, найчастіше створюють ризики для довкілля та людей (різне виробництво, газова та нафтова промисловість, медичні пристрої, залізничний, автомобільний, авіаційний транспорт тощо). Комп'ютерні системи управління такими об'єктами повинні виконувати функції безпеки і мати певні характеристики (резервування, стійкість до відмов, самодіагностика, стійкість до зовнішніх екстремальних впливів тощо). Контроль за розробкою, впровадженням та експлуатацією комп'ютерних систем управління, важливих для безпеки, здійснюється державними органами сертифікації та ліцензування. Таким чином, розробникам систем доводиться знайомитись із вимогами до функціональної безпеки.

Що входить у поняття функціональної безпеки? Очевидно, що це системи контролю та управління. Контроль або моніторинг може бути віднесений до окремого випадку управління, тому називатимемо такі системи просто системами управління. У реальному світі у цьому контурі маємо: керований процес, датчик, контролер та виконавчий механізм. Необов'язковою з погляду управління, проте невід'ємною частиною сьогоденних систем управління є людино-машинний інтерфейс і обробники даних, отриманих в результаті моніторингу. Подібна архітектура реалізується для вбудованих систем, які широко застосовуються в промисловій автоматизації, побутових пристроях, автомобільних системах, медичних пристроях, комунікаційних мережах, роботах, дронах та інше. У сфері стандартизації існує таке поняття, як "umbrella standard", тобто, основний «вертикальний» стандарт верхнього рівня. Під функціональною безпекою мається на увазі коректне функціонування як системи управління, так і керованого нею обладнання. Таким чином, для забезпечення функціональної безпеки необхідно спочатку визначити функції безпеки, необхідні для зниження ризику керованого обладнання, а також для досягнення та збереження цим обладнанням безпечного стану (наприклад, функції протиаварійного захисту). Далі, система управління повинна мати властивість так званої повноти безпеки, що передбачає ймовірність того, що система коректно виконуватиме функції безпеки за всіх заданих умов протягом заданого інтервалу часу.

При забезпеченні повноти безпеки враховуються два типи відмов: випадкові та систематичні. Випадкові відмови викликані виходом з ладу апаратних компонентів та паруються такими методами, як резервування, самодіагностика, фізичний та електричний поділ компонентів, підвищення стійкості до зовнішніх впливів тощо. Систематичні відмови викликані помилками проектування, зокрема, і помилками програмного забезпечення. Усунення систематичних відмов можливе шляхом удосконалення процесів проектування та розробки, тестування, управління конфігурацією, проектного менеджменту тощо. Крім того, оскільки класичне резервування не дозволяє уникнути систематичних відмов, застосовується так зване диверсне

резервування, коли резервні канали розроблені із застосуванням різного програмного та апаратного забезпечення. Дорого, незручно, але інколи допомагає.

Для керуючих систем, до яких належать такі архітектури, як керування одноканальних транспортних пристроїв, вбудовані системи та інтернет речей, основною властивістю є функціональна безпека. Під функціональною безпекою мається на увазі коректне функціонування як системи управління, так і керованого нею обладнання.

Моделювання є найбільш ефективним способом дослідження складних систем різного призначення, – технічних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних – як на етапі їх проектування, так і в процесі експлуатації. Можливості моделювання систем далеко не вичерпані, тому постійно з'являються найновіші методи та технології моделювання.

Створення моделі – кропіткий і творчий процес, що вимагає від дослідника не тільки глибоких теоретичних знань з різних математичних та технічних дисциплін, але й творчого підходу до розв'язання задач, уміння генерувати певні евристичні, що відповідають глибинній суті досліджуваного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології моделювання не тільки полегшили і прискорили процес побудови та дослідження моделі, але й значно наблизили сприйняття інформації спеціаліста з моделювання систем і спеціаліста, що працює у галузі, яка моделюється.

Одноканальні прилади автоматизації є великою групою виробів. Всі вони створені для участі у різних виробничих процесах. Прилади та засоби автоматизації необхідні для проведення вимірювань, контролю за роботою обладнання та забезпечення виробничих процесів. Прилади та системи автоматизації дозволяють зробити виробництво більш ефективним та безпечним. Вони застосовуються на будь-якому устаткуванні, працюють у системах опалення, на видобувних підприємствах. Кожен вид продукції пристосований для того чи іншого виробництва. Це зручно, оскільки завжди можна підібрати продукцію, що підійде для певного виду обладнання. Усі вироби мають відносно просту конструкцію. Їх корпуси виготовлені з міцних сталевих сплавів або ударостійкого пластику. Отже, представлена продукція не вийде з ладу від вібраційних чи механічних впливів. Простота конструкції означає надійність. Всі вироби зможуть опрацювати в безаварійному режимі не лише гарантійний термін, а й багато років після закінчення такого терміну. Головне це проводити поточне обслуговування виробів, їх регулярні перевірки.

Таким чином зазначені прилади характеризуються надійністю, довговічністю та зручністю експлуатації. Вони хороші тим, що будь-яке обладнання працюватиме під контролем. Прилади забезпечать контроль за температурою, тиском, інтенсивністю тиску рідини і так далі.

Будь-яке виробництво передбачає застосування відповідного устаткування. У кожному разі необхідно забезпечити нормальну роботу такого обладнання. Це означає, що треба вимірювати робоче середовище, керувати всіма процесами в автоматичному режимі. Саме для вирішення таких завдань застосовуються системи автоматизації і, зокрема, одноканальні керуючі пристрої.

Технічні пристрої на транспорті, що розробляються в даний час, в більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Так, у існуючих нормативних документах щодо надійності, наприклад, у стандарті ДСТУ [1], комплексний показник надійності (коефіцієнт готовності пристрою) визначається у вигляді відношення середнього напрацювання на відмову до суми середнього напрацювання на відмову та середнього часу відновлення. Значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими.

Таке трактування передбачає, будь-який відмова пристрою виявляється і потім відразу відновлюється, тобто вбудовані засоби контролю ідеальні. У реальних умовах складно створити засоби контролю, що забезпечують повну гарантію виявлення відмови. Це з тим, що ефективність вбудованих засобів апаратного контролю безпосередньо залежить від обсягу їх устаткування. Причому цей зв'язок має нелінійний характер – швидкість зростання обсягу обладнання перевищує швидкість зростання ефективності засобів контролю. Тому в розрахунках надійності контрольованого пристрою необхідно враховувати не ідеальність вбудованих засобів контролю як щодо їхньої ефективності, так і щодо їхньої надійності. Можливість пропуску відмови призводить до появи так званої прихованої відмови пристрою, який може існувати досить довго, до того моменту, коли він буде випадково виявлений позаплатними засобами (візуально або непрямим шляхом). Отже, можливість такої події не можна виключати у розрахунках. Більше того, прихована відмова пристрою з позиції функціональної безпеки є небезпечною відмовою. Тому представляє практичне значення факт дослідження умов, за яких середній час між прихованими відмовами пристрою (середнє напрацювання на приховану відмову) було б максимальним. Бажано, щоб за цих умов середній час простою пристрою було по можливості мінімальним. Такий підхід спрямований на одночасне підвищення надійності та безпеки пристрою. Відомо, що надійність транспортного пристрою ця властивість зберігати працездатність на протязі заданого часу із збереженням заданих експлуатаційних характеристик за відповідних технічних умов експлуатації. Ця властивість безпосередньо пов'язана з економічними експлуатаційними параметрами. В кінцевому підсумку, економічні параметри, в сучасних умовах, відіграють вирішальну роль як у виробництві цього пристрою, так і в бізнес-процесах експлуатації.

Постановка завдання. Розглядається один абстрактний пристрій. Будь-яка природна чи штучна надмірність, у тому числі структурне резервування, відсутня. Транспортний пристрій може бути охоплено однорівневим, дворівневим, n -рівневим контролем.

Під однорівневим контролем розуміється введення до складу пристрою вбудованих засобів контролю, які з ймовірністю p_1 правильно виявляють відмови пристрою. Ймовірність правильного виявлення p_1 – це комплексний показник ефективності засобів контролю, що враховує повноту контролю, безперервність, достовірність результатів контролю.

Якщо об'єм основного обладнання W_0 , а об'єм контрольного обладнання $W_{k0} = f(p_1)$, то результуючий об'єм обладнання $W_y = W_0 + W_{k0}$.

Передбачається, що при виявленні відмови основного пристрою з ймовірністю p_1 пристрій ремонтується. В іншому випадку виникає відмова, яка може існувати деякий (іноді значний) час до виявлення нештатними засобами. Відмова апаратури контролю за прийнятою передумовою не викликає відмови основного пристрою. При однорівневому контролі відмова засобів контролю не виявляється і при подальшій відмові основної апаратури виникає відмова пристрою загалом.

Під дворівневим контролем мається на увазі введення до складу пристрою засобів контролю основного та контрольного обладнання з ймовірностями правильного виявлення p_1 і p_2 відповідно. Це означає, що об'єм контрольного обладнання збільшений: $W_{k2} = W_{k1} + W_{k0}$, де $W_{k0} = f(p_1)$, а $W_{k1} = f(p_2)$. При дворівневому контролі відмова засобів контролю виявляється з ймовірністю p_2 , відновлюється і при відмові основної апаратури відмова може не виникнути. Якщо ж відмовить апаратура контролю другого рівня обсягом W_{k0} , це призведе до переходу від дворівневого до однорівневого контролю.

При n -рівневому контролі обсяг контрольного обладнання збільшено до $W_{kn} = W_{k(n-1)} + \dots + W_{k1} + W_{k0}$, где $W_{k(n-1)} = f(p_{n-1})$, ..., $W_{k(1)} = f(p_2)$, $W_{k(0)} = f(p_1)$.

У роботі [2] запропонована евристична формула оцінки p_i (де $i=1, 2, \dots, n$) залежно від необхідного для реалізації заданої ефективності pi контрольного обладнання $W_{k(n-1)}$:

$$p_i = 1 - \exp(-\delta \cdot \Delta W_{k(n-1)}) \quad (1)$$

де $\delta = 5 \dots 10$ – нормуючий коефіцієнт; $\Delta W_{k(i-1)} = W_{k(i-1)} / (W_0 + W_{k(i-1)})$.

Надалі приймаємо в умовах даної задачі, що потоки відмов, відновлень, а також прихованих відмов основного пристрою є найпростішими з параметрами λ , μ , та γ відповідно. Контроль однорівневий. Інтенсивність відмов контрольного устаткування прямо пропорційне його обсягу.

Завдання полягає в дослідженні стаціонарних ймовірнісних та тимчасових показників безпеки та надійності пристрою з вбудованим апаратним контролем з урахуванням неідеальних характеристик ефективності та надійності засобів контролю, а також можливості виявлення пропущеного засобами контролю відмови (прихованої відмови) позаштатними засобами (візуально або непрямим шляхом). Крім того, має на меті показати ідентичність результатів математичного моделювання даної задачі за допомогою традиційних рівнянь Колмогорова і за допомогою відомого графового методу, що в умовах простого завдання не становить труднощів.

Виклад основного матеріалу.

Графова модель пристрою

Граф станів роботизованого бортового транспортного пристрою з однорівневим контролем показано на рис. 1.

На рис. 1 вершиною «0» показано стан справності основного та контрольного обладнання пристрою. Інтенсивність відмов основного обладнання $\lambda = W_0$, контрольного $\lambda_1 = W_{k1}$. Ймовірність правильного виявлення відмови основного устрою p_1 . Контролюючий пристрій не охоплений власним контролем ($p_2 = p_3 = \dots = p_n = 0$).

Вершиною «1» показано стан відмови контролюючого обладнання, що не впливає на роботу основного пристрою.

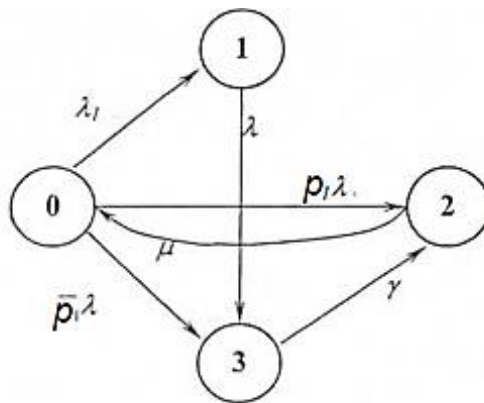


Рис. 1. Граф станів пристрою з однорівневим контролем

Стан «2» – стан відновлення, яке настає або після виявлення відмови основного обладнання з ймовірністю p_1 , або після деякого (зазвичай великого) часу існування прихованої відмови основного обладнання, коли факт цієї відмови якимось чином проявився.

Вершиною «3» показано стан прихованої відмови пристрою. У цей стан пристрій потрапляє або через відмову засобів контролю і подальшої відмови основного обладнання, або через пропуск відмови від засобів контролю. У другому випадку прийнято, що недоцільно враховувати надійність засобів контролю, оскільки вони вже не виконали своєї функції виявлення відмови.

У цьому вся задачі безліч працездатних станів $Sp = (0, 1)$; безліч непрацездатних станів $S'p = (2, 3)$.

Коефіцієнти безпеки та готовності одноканальних контрольованих відновлюваних пристроїв

Вектор початкових ймовірностей станів безпеки та надійності пристрою (рис. 1) має вигляд:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0.$$

Система диференціальних рівнянь Колмогорова (визначається за графом станів) має вигляд:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_1)P_0(t) + \mu P_2(t);$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \lambda P_1(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = p_1 \lambda P_0(t) - \mu P_2(t) + \gamma P_3(t);$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \bar{p}_1 \lambda P_0(t) + \lambda P_1(t) - \gamma P_3(t);$$

$$\sum_{i=0}^3 P_i(t) = 1.$$

При $t \rightarrow \infty$ $P_i(t) = P_i$ и $\frac{dP_i(t)}{dt} = 0$, де $i=0,1,2,3$.

Система алгебраїчних рівнянь (при $t \rightarrow \infty$) має вигляд:

$$-(\lambda + \lambda_1)P_0 + \mu P_2 = 0;$$

$$\lambda_1 P_0 - \lambda P_1 = 0;$$

$$p_1 \lambda P_0 - \mu P_2 + \gamma P_3 = 0;$$

$$\bar{p}_1 \lambda P_0 + \lambda P_1 - \gamma P_3 = 0;$$

$$\sum_{i=0}^3 P_i = 1.$$

У результаті розв'язання системи алгебраїчних рівнянь знаходимо стаціонарні ймовірності перебування пристрою у всіх станах:

$$P_0 = \frac{\lambda \mu \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \mu \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_2 = \frac{(\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_3 = \frac{(\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu}{(\lambda + \lambda_1) \gamma (\lambda + \mu) + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu}.$$

Коефіцієнти безпеки та готовності пристрою в даній задачі збігаються. Вони визначаються сумою ймовірностей перебування системи у безпечних станах «0» і «1»:

$$K_B = K_r = P_0 + P_1 = \frac{(\lambda + \lambda_1)\mu\gamma}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

У свою чергу, коефіцієнт простою пристрою знаходимо за формулою:

$$K_{II} = P_2 + P_3 = 1 - K_r = 1 - P_0 - P_1 = \frac{\lambda[(\lambda + \lambda_1)\gamma + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\mu]}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

Визначимо формульні вирази коефіцієнтів безпеки (готовності) та простою аналізованої системи, користуючись алгоритмом реалізації відомих графових напівмарківських методів. З цією метою за графом на рис. 1 виконують такі процедури:

1. Підготовчі процедури:

– знаходять перехідні ймовірності та математичні очікування часу перебування системи у всіх станах:

$$p_{01} = \frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1}; p_{02} = \frac{\bar{p}_1\lambda}{\lambda + \lambda_1}; p_{03} = \frac{\bar{p}_1\lambda}{\lambda + \lambda_1}; p_{13} = p_{20} = p_{32} = 1; T_0 = \frac{1}{\lambda + \lambda_1}; T_1 = \frac{1}{\lambda}; T_2 = \frac{1}{\mu}; T_3 = \frac{1}{\gamma}.$$

– знаходять ваги шляхів:

$$l_{01} = p_{01}; l_{02} = p_{02} + (p_{01}p_{13} + p_{03})p_{32}; l_{03} = p_{01}p_{13} + p_{03}; l_{13} = p_{13} = 1; l_{20} = p_{20} = 1; l_{32} = p_{32} = 1.$$

– знаходять ваги контурів:

$$C_1 = p_{02}p_{20}; C_2 = p_{03}p_{32}p_{20}; C_3 = p_{01}p_{13}p_{32}p_{20}.$$

2. Розрахункові процедури:

– підставляємо раніше визначені параметри в розрахункову формулу коефіцієнта безпеки (готовності) пристрою.

$$K_B = K_r = P_0 + P_1 = \frac{(\lambda + \lambda_1)\mu\gamma}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

Таким чином, переконалися, що традиційний метод дає добрі результати для нашого завдання. У міру підвищення складності завдання застосування для її вирішення традиційного методу рівнянь Колмогорова стає проблематичним, тоді як можливості розроблених графових методів обмежені лише труднощами побудови графових моделей з тисячами станів.

Проаналізуємо отриманий вираз коефіцієнта безпеки контрольованого пристрою, що відновлюється.

Якщо $\bar{p}_1 = 1$ (відсутня контроль головного пристрою):

$$K_r = \frac{\mu\gamma}{\gamma(\lambda + \mu) + \lambda\mu}. \quad (2)$$

Отримане вираз означає, що за відсутності контролю основного пристрою коефіцієнт готовності залежить не тільки від інтенсивності відмов і відновлень, а й від тривалості прихованої відмови ($\frac{1}{\gamma}$). Якби приховані відмови виявлялися миттєво ($\gamma \rightarrow \infty$), то дана формула перетворювалася б на ідеалізовану відому формулу коефіцієнта готовності:

$$K_r = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (3)$$

Така можливість ($\gamma \rightarrow \infty$) в природі не існує, тому формулу (2) слід розглядати базовою при розрахунках коефіцієнтів готовності неконтрольованих пристроїв роботизованих бортових транспортних системах.

Повернемося до отриманої раніше формули коефіцієнта готовності контрольованого пристрою і врахуємо залежність інтенсивності відмов пристрою контролю від ймовірності p_1 , тобто від ймовірності того, що пристрій правильно виявляє відмови робочого пристрою. З формули (1) при заміні $\frac{W_{k0}}{W_0 + W_{k0}}$ на $\frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1}$ при прийнятому припущенні, що інтенсивність відмов пристрою прямо пропорційна його обсягу, отримуємо:

$$\lambda_1 = -\frac{\lambda \ln \bar{p}_1}{\delta + \ln \bar{p}_1}.$$

Таким чином, $\lambda_1 = \varphi\lambda$, де $\varphi = \frac{\ln \bar{p}_1}{\delta + \ln \bar{p}_1}$, і формула розрахунку та готовності контролюємого пристрою перетворюється к виду:

$$K_r = \frac{\lambda(1+\varphi)\mu\gamma}{\lambda(1+\varphi)\gamma(\lambda+\mu) + \lambda^2(\bar{p}_1 + \varphi)\mu} = \frac{(1+\varphi)\mu\gamma}{(1+\varphi)\gamma(\lambda+\mu) + (\bar{p}_1 + \varphi)\lambda\mu}.$$

Графік залежності $\varphi = f(\bar{p}_1)$ наведено на рис. 2.

З цього графіка випливає, що обсяг (а, отже, і інтенсивність відмов) контрольної апаратури повинен нелінійно залежати від можливості пропуску відмови основного пристрою. Якщо потрібно досягти того, щоб ймовірність пропуску відмови наближалася до нуля, тобто вірогідність правильного виявлення прагнула одиниці, то, можливо, що потрібний обсяг контрольної апаратури перевищить обсяг основного пристрою ($\varphi > 1$).

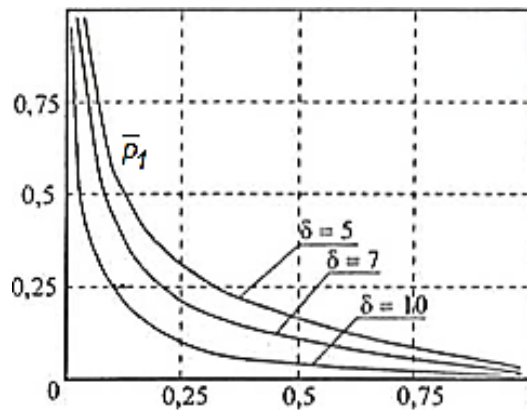


Рис. 2. Графік залежності $\varphi = f(\bar{p}_1)$

Так, наприклад, при $\bar{p}_1 = 1 - p_1 = 0,01$ (тобто 99% відмов основного пристрою правильно виявляються) коефіцієнт $\varphi \approx 2$ і, отже, $W_k \approx 2W_0$. З графіків слід також, що при $\bar{p}_1 \rightarrow 0$ коефіцієнт $\varphi \rightarrow \infty$. Зауважимо, що вплив нормувального коефіцієнта δ на прогнозоване значення інтенсивності відмов апаратури контролю щодо невелике, особливо при реальних значеннях $\bar{p}_1 \geq 0,1$.

Якщо прийняти, що $p_1 = 1$ (при умові $\varphi \rightarrow \infty$) знаходимо, що знову коефіцієнт готовності визначається за ідеалізованою формулою (3).

Таким чином, поширена формула (3) коефіцієнта готовності пристрою є ідеалізованою і представляє собою оцінку одного з двох граничних випадків:

- 1) $p_1 = 1$ при умові $\varphi \rightarrow \infty$,
або
- 2) $\gamma \rightarrow \infty$.

Коротко розглянемо часові показники безпеки та надійності одноканального контрольованого пристрою.

Визначимо показники тривалості часу між відмовами та окремо між прихованими відмовами, а також часу відновлення та часу простою пристрою.

Середні напрацювання часу між відмовами T і прихованими відмовами T_c пристрою знайдемо за формулою, отриманою в роботі [4] для випадкових Марківських процесів, $T = \frac{\sum_{i \in S_p} P_i}{\sum_{i \in S_p} P_i \sum_{j \in \bar{S}_p} \lambda_{ij}}$.

В умовах даної задачі: $\bar{S}_p$ — безліч граничних непрацездатних станів. При визначенні показника T зазначена множина включає стани 2 і 3. Стосовно показника T_c ця множина включає тільки стан 3. В останньому випадку як безліч S_p приймаються стани 0, 1 та 2.

Знайдено залежності відносної зміни середньої тривалості простою пристрою від ефективності контролю та додаткового контрольного обладнання за різних співвідношень між параметрами γ та μ .

Відношення

$$\frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{пр прод}}} = \frac{(1+\varphi)\gamma + (\bar{p} + \varphi_1)\mu}{(1+\varphi)(\gamma + \mu)}$$

дозволяє для різних значень ймовірності не виявлення відмови $\bar{p}_1$, коефіцієнті φ приросту додаткового обладнання, середньої тривалості існування прихованої відмови $\frac{1}{\gamma}$ визначити умови, при яких буде мати місце мінімальний час простою пристрою.

Отримані результати показують, що існують оптимальні значення ймовірності правильного виявлення відмови пристрою $p = 1 - \bar{p}_1$ на рівні 0,7 ... 0,9, при якому спостерігається значне (в 1,5 – 2 рази і більше) скорочення тривалості простою пристрою, якщо тривалість прихованої відмови істотно більша за тривалість відновлення. При цьому обсяг додаткового обладнання для виявлення відмов становить 30...45% від обсягу основної апаратури пристрою. Зауважимо, що аналогічні рекомендовані значення ймовірності p_1 і коефіцієнта ϕ були встановлені при дослідженні середнього часу між прихованими відмовами.

Висновки. Отримано формульні вирази стаціонарних імовірнісних для одноканальних пристроїв, що відновлюються, з вбудованим апаратним контролем. Вони дозволяють враховувати реальні характеристики ефективності та надійності засобів контролю, підвищуючи при цьому достовірність одержуваних результатів аналізу систем.

Показано, що існують оптимальне значення ймовірності правильного виявлення відмови пристрою $p = 1 - \bar{p}_1$ на рівні 0,7...0,9, при якому спостерігається значне (в 1,5-2 рази і більше) скорочення тривалості простою пристрою, якщо тривалість прихованої відмови істотно більша за тривалість відновлення.

Список використаних джерел:

1. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94 – [Чинний від 1 січня 1996] – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 75 с. – (Національні стандарти України).
2. Путінцев Н. Д. Апаратний контроль управляючих цифрових обчислювальних машин. / Путінцев Н. Д. – М.:Сов.радіо.1966. -157с.
3. Вентцель Е.С. Теорія випадкових процесів та її інженерне застосування. / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.- М.: Наука. 1991. 384 с. ISBN 5-02-014125-9
4. Надійність технічних систем: Довідник / Беляєв Ю.К., Богатирьов В.А., Болотін В.В. та ін.; За ред. І.А. Ушакова – М.: Радіо та зв'язок.1985. 608с.

References:

1. Reliability of technology. Terms and definitions: DSTU 2860-94 (1996) K.:Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
2. Putintsev N. D. Hardware control of controlling digital computers. (1966) M.: Sov.radio.
3. Ventshel E. S., Ovcharov L. A. (1991) Theory of random processes and its engineering application. M.: Navuka. ISBN 5-02-014125-9
4. Reliability of technical systems: Handbook (1985) Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. etc.; Edited by I.A. Ushakov M.: Radio and Communications.

ЕЛЕКТРОНІКА, ЕЛЕКТРОННІ КОМУНІКАЦІЇ, ПРИЛАДОБУДУВАННЯ ТА РАДІОТЕХНІКА

УДК 528.8:528.7:528.4:528.06

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.29>

Альперт С. І., кандидат технічних наук, доцент кафедри аерокосмічної геодезії та землеустрою факультету архітектури, будівництва та дизайну
Державного університету «Київського авіаційного інституту»
ORCID: 0000-0002-7284-6502

НОВІТНІ МЕТОДИ ОБРОБКИ НЕТОЧНИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАДАЧ У СФЕРІ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ТА ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ ЗЕМЛІ

У наш час вирішення задач радіолокаційного спостереження та дистанційного зондування Землі вимагає обробки, аналізу та класифікування неточної, неповної та суперечливої інформації. Однією із найважливіших процедур обробки даних є класифікування супутникових знімків. Великий обсяг неточних даних може спричинити проблему із процедурою класифікування зображень. Зазначено, що у даному випадку для класифікування зображень слід застосовувати теорію свідчень Демпстера-Шейфера, оскільки дана теорія може працювати із неточною та невизначеною інформацією. Правило комбінації Демпстера використовується для об'єднання даних, отриманих від різних експертів, спектральних каналів або радіолокаційних станцій. Теорія свідчень може моделювати невизначеність. Радіолокаційні станції об'єднують дані із різних джерел для визначення координат об'єкта. Радіолокаційні станції можуть відрізнятися за своєю надійністю, точністю і повнотою. Адаптаційні властивості різних радіолокаційних станцій є різними до одного і того ж самого середовища. Тому об'єднання інформації є однією із найбільш важливих та складних процедур при вирішенні задач радіолокаційного спостереження. Новий підхід до об'єднання даних, заснований на теорії свідчень Демпстера-Шейфера, дає надійну комплексну оцінку координат об'єкта. Зазначено, що головною метою об'єднання інформації є спрощення даних, отриманих від різних експертів, джерел, спектральних каналів та радіолокаційних станцій. Об'єднання даних спрощує обчислення. Визначення базової ймовірності є важливою задачею, яка може вплинути на остаточні результати класифікування при застосуванні теорії свідчень. Проаналізовано різні методи визначення базової ймовірності. Розглянуто частотний метод для визначення базової ймовірності. Також детально описано числовий приклад. Запропоновано метод визначення базової ймовірності із використанням нечітких множин, оскільки теорія нечітких множин може працювати із невизначеними та неповними даними. Розглянуто метод визначення базових мас із використанням відстані між класифікованими даними та нормальним розподілом кожної характеристики для кожного еталонного класу. Зазначено, що не існує загального методу для визначення базової ймовірності. Розглянуті методи можуть бути застосовані для вирішення завдань дистанційного зондування, а саме: екологічних, сільсько-господарських, геологічних задач та для вирішення завдань у сфері радіолокаційного спостереження.

Ключові слова: задачі дистанційного зондування Землі, задачі радіолокаційного спостереження, теорія свідчень Демпстера-Шейфера, неточні дані, базові ймовірності.

Alpert S. I. The novel methods of processing imprecise data for solution of radar surveillance and remote sensing tasks

Nowadays solution of radar surveillance and Remote Sensing tasks require processing, analysis and classification of ambiguous, partial and contradictory information. One of the most important data processing procedures is the satellite image classification. The large volume of inaccurate data can cause a problem with the image classification procedure. It was noted, that Dempster-Shafer evidence theory can be applied for image classification in this case, because this theory can deal with imprecise and uncertain information. The Dempster's combination rule can be applied for combining data from different experts, spectral bands or surveillance radars. Dempster-Shafer evidence theory can simulate uncertainty. The surveillance radars integrate data from different sources for object coordinate determination. Surveillance radars can differ in their reliability, precision and completeness. Adaptations of various surveillance radars to the same environment are not the same. That's why, information fusion is one of most important and difficult procedures for radar surveillance tasks. A new data fusion approach based on Dempster-Shafer evidence theory gives a reliable complex assessment for object coordinates. It was noted, that the main aim of aggregation of information is to simplify data, whether the data is coming from different experts, sources, spectral bands or surveillance radars. Data fusion simplifies calculations. The determination of basic probability is an important problem which can influence final classification results, when we apply Dempster-Shafer evidence theory. Various methods to determine basic

probabilities were analyzed in this paper. It was considered frequency method to determine the basic probabilities. The numerical example was described in detail too. It also was proposed the method to determine basic probabilities using fuzzy sets, because fuzzy set theory can deal with ambiguous and incomplete data. It was considered the method to determine basic probabilities based on the distance measure between the test data and the normal distribution model of attribute categories. It was noted, that there is no general method to determine basic probabilities. These considered methods can be applied for remote sensing tasks, such as ecological, agriculture, geological problems and for solution of radar surveillance tasks.

Key words: *remote sensing tasks, radar surveillance tasks, Dempster-Shafer evidence theory, imprecise data, basic probability assignment.*

Постановка проблеми. Досить часто при вирішенні задач радіолокаційного спостереження та задач дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) виникає потреба у проведенні аналізу, обробки та класифікування неповних та неточних даних.

На даний час відомі різні методи обробки неточної та неповної інформації для вирішення задач радіолокаційного спостереження, зокрема, для визначення координат об'єкта (цілі, повітряного судна, тощо), оскільки методи, що базуються на використанні та інтегруванні інформації, отриманої від декількох датчиків ще потребують значного вдосконалення. Тому на даний час досить актуальною залишається задача комплексного оцінювання координат об'єкта.

Теорія свідчень Демпстера-Шейфера дозволяє провести комплексне оцінювання координат об'єкта (цілі), об'єднуючи інформацію, отриману із різних датчиків (радіолокаційних станцій) [10].

Слід зазначити, що дана теорія є узагальненням класичної теорії ймовірностей, застосовується для об'єднання даних, отриманих із різних джерел за наявності неточних та суперечливих вхідних даних.

Також аналіз та класифікування неповної та суперечливої інформації є одним із найбільш важливих та складних етапів під час обробки супутникових даних, а саме гіперспектральних знімків, оскільки гіперспектральність спричинює проблему із процедурою класифікування. Різні спектральні діапазони можуть давати різні оцінки (ймовірності) приналежності одного і того ж самого об'єкта до певного класу при проведенні процедури класифікування гіперспектральних зображень. Тобто, гіперспектральність ставить перед нами багатоальтернативну задачу класифікування, яка, в свою чергу, дає багатоальтернативний розв'язок задачі у вигляді певного набору гіпотез [5].

Тому на даний момент досить актуальною залишається задача розробки нових методів обробки, зокрема, класифікування, саме гіперспектральних космічних зображень (ГКЗ), оскільки точність відомих методів обробки гіперспектральних зображень є недостатньою, особливо в умовах, коли вхідні дані є неповними, неточними та суперечливими.

У подібних умовах заслуговує на увагу підхід, що базується на використанні теорії свідчень Демпстера-Шейфера (ТСДШ) правилі комбінування Демпстера, яке дозволяє комбінувати дані, отримані від різних джерел (експертів), та яке надає багатоальтернативний розв'язок задачі (у вигляді набору гіпотез) за наявності неточних та суперечливих вхідних даних. Тобто за допомогою правила комбінування Демпстера можна опрацювати усі оцінки експертів та отримати інтегральну (узагальнену) оцінку.

Слід зазначити, що актуальність цієї роботи зумовлена необхідністю розробки науково обґрунтованих рекомендацій щодо вибору найбільш підходящих методів обробки даних для ефективного розв'язку задач у сфері радіолокаційно спостереження та завдань ДЗЗ.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. У даній статті було розглянуто матеріали для проведення порівняльного аналізу сучасних методів обробки та інтегрування даних, отриманих із різних джерел (датчиків, радіолокаційних станцій, спектральних каналів, тощо) для вирішення задач класифікування у сфері радіолокаційного спостереження та дистанційного зондування.

У статтях Бездека Дж. К., Ерліха Р., Фулла В. та Олсона К. були розглянуті деякі методи неконтрольованої класифікації, а саме алгоритми кластеризації, що дозволяють об'єднувати елементи супутникового зображення у групи за подібністю їх спектральних характеристик [3, 9].

Також зазначалося, що кластеризація потребує мінімум навчальних даних для виділення кластерів та є добре автоматизованою. Але даний тип класифікації є не досить точним [6, 9].

У роботі Чанга С. були детально розглянуті переваги та недоліки сучасних методів дешифрування супутникових зображень, використовуючи інформацію, отриману із різних спектральних каналів [5].

У статтях Чандера Г. та Мюнга І. були розглянуті методи контрольованого класифікування та їх основні сфери застосування [4, 8]. Зазначено, що методи контрольованого класифікування потребують досить високої швидкодії та значних машинних ресурсів та є точнішими за методи неконтрольованого класифікування.

Слід зазначити, що розглянуті методи класифікування дають не досить точні результати за наявності неповних та неточних вихідних даних. Тому, у даній роботі пропонується застосовувати теорію свідчень Демпстера-Шейфера, яка може працювати в умовах невизначеної, неточної та суперечливої інформації.

Постановка завдання. Отже, мета дослідження полягає у проведенні модифікації методики Демпстера-Шейфера впровадженням новітніх методів визначення «базових ймовірностей» для вирішення задач радіолокаційного спостереження та задач ДЗЗ за наявності неповних та неточних даних.

Виклад основного матеріалу. У випадку, коли вхідні дані, що одержані із різних джерел інформації є неповними та суперечливими, слід використовувати метод класифікування, який базується на теорії свідчень Демпстера-Шейфера.

Теорія свідчень Демпстера-Шейфера є узагальненням теорії ймовірностей та може бути застосована для визначення комплексної оцінки координат об'єкта (повітряного судна, цілі), використовуючи та об'єднуючи інформацію, отриману від декількох радіолокаційних станцій. Також теорія свідчень може бути використана для класифікування супутникових зображень за наявності неповних та суперечливих вхідних даних. При цьому кожен піксель відноситься до того класу, до якого він належить із найбільшою базовою ймовірністю (базовою масою). Базова ймовірність є узагальненням класичного поняття ймовірності. Але на відміну від класичної ймовірності базова ймовірність може ефективно описати незнання та дозволяє розрізнити відсутність довіри та недовіри [2, 11].

Основа аналізу Ω – це сукупність вихідних вичерпних та взаємно виключних гіпотез відносно стану об'єкта та всіх їх можливих сполучень.

Ω містить 2^Q підмножин, де Q – число гіпотез.

Базова ймовірність (базова маса) – це така функція m , що задовольняє наступним умовам:

$$\begin{cases} m(\emptyset) = 0, \\ \sum_{A_i \subseteq A_0} m(A_i) = 1, \quad (i = 0, 1, 2, \dots), \end{cases} \quad (1)$$

де A_i ($i = 1, 2, \dots$) – підмножини множини A_0 ,

A_0 – обмежена множина.

Далі розглянемо основні відмінності між базовою ймовірністю та класичною ймовірністю:

Для базової ймовірності є необов'язковим, що $m(\Omega)$ дорівнює "1", а для класичної ймовірності обов'язково виконується рівність: $p(\Omega) = 1$.

Для базової ймовірності є справедливим наступне твердження: якщо $A \subset B$, то не обов'язково буде виконуватися нерівність: $m(A) \leq m(B)$, а для класичної ймовірності обов'язково виконується твердження: якщо $A \subset B$, то $p(A) \leq p(B)$.

Для базової ймовірності не вимагається взаємозв'язок між $m(A)$ та $m(\bar{A})$, де $\bar{A}$ – доповнення до A , а саме: $A \cup \bar{A} = \Omega$, $A \cap \bar{A} = \emptyset$. Для класичної ймовірності є обов'язковою рівність: $p(A) + p(\bar{A}) = 1$.

Частотний метод знаходження базових ймовірностей

Частотний метод побудови базових ймовірностей (базових мас) заснований на статистичному аналізі частот подій, які спостерігаються. У випадку невизначеності частотний метод автоматично розподіляє частину маси на весь простір Ω .

Нехай основа аналізу $\Omega = \{\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n\}$ містить усі вихідні гіпотези та всі їх можливі сполучення.

D – множина спостережень, де кожне спостереження пов'язане із певною гіпотезою чи підмножиною гіпотез.

N – загальне число спостережень;

$N(A)$ – кількість разів, коли спостереження підтримували гіпотезу $A \subseteq \Omega$.

Тоді базова ймовірність розраховується за наступною формулою:

$$m(A) = \frac{N(A)}{N}, \quad (2)$$

A – підмножина гіпотез, що підтримуються спостереженням;

N – загальна кількість спостережень;

$N(A)$ – кількість спостережень, під час яких була зафіксована подія, що підтримує A .

При цьому базові маси повинні задовольняти умовам (1).

Частотний метод визначення базових ймовірностей може оперувати із реальними даними, враховує невизначеність вхідних даних, не потребує складних та громіздких обчислень. Слід зазначити, що даний метод є статистичним та потребує великого числа спостережень для отримання достовірних результатів.

Приклад

У даному прикладі розглянемо застосування частотного методу для знаходження базових ймовірностей.

Нехай основа аналізу Ω містить наступні гіпотези:

$$\Omega = \{A_1, A_2, A_3\}.$$

За умовою задачі маємо:

$$\begin{aligned}
N(A_1) &= 10; \\
N(A_2) &= 10; \\
N(A_1, A_2) &= 5; \\
N(A_3) &= 10; \\
N(A_1, A_3) &= 15; \\
N(A_2, A_3) &= 20; \\
N(A_1, A_2, A_3) &= 30.
\end{aligned}$$

Тепер розраховуємо загальне число спостережень:

$$N = 10 + 10 + 5 + 10 + 15 + 20 + 30 = 100.$$

Далі розраховуємо значення базових ймовірностей для усіх трьох гіпотез та їх комбінацій за формулою (2):

$$\begin{aligned}
m(A_1) &= \frac{N(A_1)}{N} = \frac{10}{100} = 0,1; \\
m(A_2) &= \frac{N(A_2)}{N} = \frac{10}{100} = 0,1; \\
m(A_1, A_2) &= \frac{N(A_1, A_2)}{N} = \frac{5}{100} = 0,05; \\
m(A_3) &= \frac{N(A_3)}{N} = \frac{10}{100} = 0,1; \\
m(A_1, A_3) &= \frac{N(A_1, A_3)}{N} = \frac{15}{100} = 0,15; \\
m(A_2, A_3) &= \frac{N(A_2, A_3)}{N} = \frac{20}{100} = 0,2; \\
m(A_1, A_2, A_3) &= \frac{N(A_1, A_2, A_3)}{N} = \frac{30}{100} = 0,3.
\end{aligned}$$

Слід зазначити, що сума отриманих базових ймовірностей гіпотез та усіх їх сполучень повинна дорівнювати “1”, тобто:

$$m(A_1) + m(A_2) + m(A_1, A_2) + m(A_3) + m(A_1, A_3) + m(A_2, A_3) + m(A_1, A_2, A_3) = 1.$$

Методи визначення базових ймовірностей із застосуванням теорії нечітких множин

Базові ймовірності можна розрахувати, використовуючи теорію нечітких множин, яка в свою чергу, широко застосовується для аналізу та обробки неточних та неповних даних.

Введемо основні поняття теорії нечітких множин.

Припустимо що, X – універсальна множина.

Нечітка підмножина $A \subset X$ описується за допомогою наступної характеристичної функції:

$$\mu_A : X \rightarrow [0,1] \quad (3)$$

Кожному елементу $x \in A$ ставиться у відповідність дійсне значення характеристичної функції $\mu_A(x)$, що належить інтервалу $[0,1]$. При цьому значення $\mu_A(x)$ відображає вагу (grade of membership) елемента x у множині A .

Тепер розглянемо нечітку множину $A \subset X$ та довільне дійсне число $\alpha \in [0,1]$. Тоді α – зріз або α – рівень, який відповідає множині A , позначається через ${}^\alpha A$. Слід зазначити, що даний α – зріз є чіткою множиною та позначається наступним чином:

$${}^\alpha A = \{x \in X : \mu_A(x) \geq \alpha\} \quad (4)$$

Трикутне нечітке число A описується за допомогою трійки чисел $[a, b, c]$. Характеристична функція трикутного числа розраховується за наступною формулою:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \end{cases} \quad (5)$$

Центральний елемент визначається за допомогою α – зрізу наступним чином:

$${}^\alpha A_i = \{x : \mu_A(x) \geq \alpha_i\} = [{}^\alpha A_{i,lower}, {}^\alpha A_{i,upper}], \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n), \quad (6)$$

де $\alpha_0 = 1 > \alpha_1 > \alpha_2 > \dots > \alpha_n = 0$, $\alpha \in [0, 1]$.

Перший підхід до визначення базових ймовірностей

В даному випадку ми беремо інтеграл від характеристичної функції між двома різними α – зрізами, отримуємо базову ймовірність ${}^\alpha A_i$ (α – зрізу):

$$m({}^\alpha A_i) = \frac{\int_{{}^\alpha A_{i,lower}}^{{}^\alpha A_{i,upper}} \mu_{(A)}(x) dx}{\sum_i \int_{{}^\alpha A_{i,lower}}^{{}^\alpha A_{i,upper}} \mu_{(A)}(x) dx} \quad (7)$$

Другий підхід до визначення базових ймовірностей

Базова ймовірність розраховується, використовуючи значення α – зрізу, за наступною формулою:

$$m({}^\alpha A_i) = \frac{\alpha_{i-1}(1 - \alpha_i)}{\sum_i \alpha_{i-1}(1 - \alpha_i)} \quad (8)$$

Третій підхід до визначення базових ймовірностей

α – зріз розглядається як інтервал довіри з рівнем довіри: $1 - \alpha$.

Базова ймовірність розраховується наступним чином:

$$m({}^\alpha A_i) = \frac{1 - \alpha_i}{\sum_i (1 - \alpha_i)} \quad (9)$$

Запропоновані методи знаходження базових ймовірностей можуть бути застосовані при вирішенні задач класифікування за наявності невизначеної та неповної інформації [1, 7].

Метод визначення базових ймовірностей із застосуванням міри відстані між класифікованими даними та еталонними даними

У даному методі застосовується міра відстані між класифікованими та еталонними даними. Проводиться розрахунок відстані між класифікованими об'єктами та нормальним розподілом кожної характеристики для кожного еталонного класу. При цьому класифіковані дані використовуються для побудови нормального розподілу еталонних даних для кожної із характеристик. Базові ймовірності розраховуються із використанням міри відстані між класифікованими даними та моделлю для кожної із характеристик для кожного еталонного класу.

Розглянемо N об'єктів та n класів. Кожен клас включає в себе l об'єктів, та має k характеристик. Нехай з першого класу обирається випадковим чином m об'єктів, розраховується середнє значення μ і середнє квадратичне відхилення δ для першої характеристики першого класу.

Далі аналогічно обираємо m об'єктів із інших класів та обчислюємо середнє значення та середнє квадратичне відхилення також для першої характеристики. Будуємо графік нормального розподілу для першої характеристики для кожного класу. Потім будуємо моделі нормального розподілу всіх інших характеристик для всіх класів.

Проводимо процедуру класифікування, а саме обираємо випадковим чином об'єкт з певними характеристиками, що класифікується, та аналізуємо взаємозв'язок між цим об'єктом та нормальним розподілом кожної характеристики кожного класу. Для цього обчислюємо міру відстані між класифікованими даними x_i та нормальним розподілом характеристики класу A :

$$d(A) = 2 \int_{\mu}^{x_i} p[x|\mu] dx, \quad (10)$$

де $p[x|\mu]$ – функція щільності нормального розподілу характеристики класу A , що розраховується за наступною формулою:

$$p[x|\mu] = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\delta} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{x-\mu}{\delta}\right]^2\right\}, \quad (11)$$

де μ – середнє значення нормального розподілу характеристики класу A , δ – середнє квадратичне (стандартне) відхилення.

Далі обчислюємо функцію похибки:

$$erf(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt \quad (12)$$

Визначаємо міру відстані $d(A)$ як функцію похибки:

$$d(A) = erf\left[\frac{x_i - \mu}{\sqrt{2}\delta}\right] \quad (13)$$

Розраховане значення міри відстані $d(A)$ показує ступінь відхилення між класифікованими даними x_i та моделлю нормального розподілу певної характеристики певного класу A .

Зазначимо, що чим більше значення міри відстані, тим меншою буде значення ймовірності, з якою класифіковані об'єкти x_i належать класу A .

При цьому ймовірність належності об'єктів x_i класу A визначається наступним чином:

$$p(A) = 1 - d(A), \quad (14)$$

де $d(A)$ є мірою відстані між певною характеристикою класифікованого об'єкта та нормальним розподілом певної характеристики кожного класу.

Далі обчислюємо усі ймовірності належності класифікованих об'єктів різним класам за певною характеристикою, нормуємо розраховані ймовірності та отримуємо базові маси (базові ймовірності).

Аналогічним чином розраховуємо базові ймовірності приналежності об'єктів різним класам за іншими характеристиками. Використовуючи правило комбінації Демпстера, отримуємо результуючі комбіновані базові маси приналежності об'єктів класам.

Правило комбінації Демпстера

Досить часто гіпотези можуть одночасно формуватися кількома різними джерелами інформації (спектральними каналами, датчиками, радіолокаційними станціями). Якщо ці джерела даних є взаємно незалежними, то можна використовувати правило комбінації Демпстера [10].

Нехай, основа аналізу Ω містить Q гіпотез;

P – кількість незалежних джерел даних гіпотез;

p – те джерело надає оцінку ймовірності гіпотези A_n у вигляді відповідної базової маси $m_p(A_n)$ або оцінку ймовірності сполучення гіпотез X у вигляді $m_p(X)$. Тоді правило комбінації Демпстера задає нову комбіновану базову ймовірність, яка розраховується за наступною формулою:

$$m_D(X) = \frac{1}{1-C} \sum_{\substack{X_1 \cap \dots \cap X_P = X \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^Q}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(X_p), \quad (15)$$

де C – коефіцієнт конфліктності, що розраховується наступним чином:

$$C = \sum_{\substack{X_1 \cap \dots \cap X_P = \emptyset \\ \forall (X \neq \emptyset) \in 2^Q}} \prod_{1 \leq p \leq P} m_p(X_p). \quad (16)$$

Коефіцієнт конфліктності відображає ступінь протиріччя між гіпотезами. C приймає значення в інтервалі $[0;1]$.

Якщо $C = 0$, то протиріччя в оцінках джерел немає.

Чим ближче значення коефіцієнту конфліктності C до «1», тим більш суперечливими є гіпотези.

Слід зазначити, що в розрахунках за правилом Демпстера (15) припускається, що $m_D(\emptyset) = 0$.

Правило комбінації Демпстера може бути застосовано для комплексного оцінювання координат об'єкта (цілі чи повітряного судна), об'єднуючи інформацію, отриману із кількох датчиків чи радіолокаційних станцій.

Також дане правило Демпстера застосовується для класифікування супутникових, зокрема, гіперспектральних зображень, коли загальна кількість спектральних каналів досягає декількох сотень. При цьому різні спектральні діапазони надають різні оцінки (ймовірності) приналежності одного й того ж об'єкта до певного класу. Іншими словами, велика кількість спектральних каналів ставить перед нами багатоальтернативну задачу класифікування, що, в свою чергу, передбачає багатоальтернативний розв'язок у вигляді

певного набору гіпотез. Саме теорія свідчень Демпстера-Шейфера може бути застосована для вирішення цієї багатоальтернативної задачі класифікування [5, 10].

Висновки. Зазвичай вирішення задач радіолокаційного спостереження та задач дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) потребують детального аналізу, обробки, класифікування та інтегрування даних, отриманих із різних джерел (датчиків, спектральних каналів, радіолокаційних станцій). Але досить часто ці дані є неповними, невизначеними та неточними, що, в свою чергу, спричинює певні труднощі під час їх обробки та аналізу. На сьогоднішній день методи, що засновані на інтегруванні інформації, отриманої від декількох датчиків ще потребують значного вдосконалення, особливо за наявності неповних та неточних даних. Тому було запропоновано використовувати методику Демпстера-Шейфера та новітні підходи до розрахунку базових ймовірностей для вирішення задач ДЗЗ, а саме класифікування супутникових знімків та для задач радіолокаційного спостереження, зокрема, визначення комплексної оцінки координат об'єкта (цілі).

У роботі було показано, що теорія свідчень Демпстера-Шейфера є певним узагальненням класичної теорії ймовірностей та може бути використана для інтегрування даних, одержаних із різних джерел за наявності неточних вхідних даних.

Були детально розглянуті новітні методи визначення базових ймовірностей. Зазначено, що частотний метод визначення базових ймовірностей враховує невизначеність та неточність вхідних даних, може оперувати із реальними даними, не потребує складних розрахунків та великих часових затрат, але вимагає наявності великого числа спостережень. Також було детально розглянуто числовий приклад розрахунку базових ймовірностей із використанням частотного методу.

У статті було розглянуто метод визначення базових ймовірностей із використанням теорії нечітких множин, оскільки при розв'язанні задач класифікування ми досить часто маємо обробляти та аналізувати неповні та невизначені дані. Розглядався метод знаходження базових мас із використанням міри відстані між класифікованими та еталонними даними.

Було розглянуто правило комбінування Демпстера, яке використовується для об'єднання оцінок (базових ймовірностей) різних експертів та дає інтегральну (узагальнену) оцінку. Зазначалося, що дане правило може бути застосовано для комплексного оцінювання координат об'єкта, інтегруючи дані, отримані із кількох датчиків та для класифікування супутникових знімків за наявності великої кількості спектральних каналів.

Запропонована методика Демпстера-Шейфера та новітні методи знаходження базових ймовірностей можуть бути широко застосовані при розв'язанні різноманітних екологічних, природоресурсних, геологічних та сільськогосподарських завдань та для вирішення численних задач у сфері радіолокаційно спостереження.

Список використаних джерел:

1. Alpert S. A new approach to applying the discount rule in hyperspectral satellite image classification. *Management of Development of Complex Systems*. 2020. Vol. 43. P. 76 – 82. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82).
2. Alpert S. I. Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*. 2021. Vol. 8(3). P. 44–48.
3. Bezdek J. C., Ehrlich R., Full W. FCM: The Fuzzy C-Means clustering algorithm. *Computers and Geosciences*. 1984. Vol.10. P.191–203.
4. Chander G., Markham B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges *Geoscience and Remote Sensing. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. 2003. Vol. 41. P. 264 – 267.
5. Chang C. I. *Hyperspectral data processing. Algorithm design and analysis*. Hoboken, NJ: John Wiley and Sons. 2013. 1164 p.
6. Hartigan J. A., Wong M. A. A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*. 1979. Vol. 28(1). P. 100–108.
7. Lu D., Weng Q. A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*. 2007. Vol. 28(5). P. 823–870.
8. Myung I. J. Tutorial on maximum likelihood Estimation. *Journal of Mathematical Psychology*. 2003. Vol. 47 (1). P. 90–100. [doi:10.1016/S0022-2496\(02\)00028-7](https://doi.org/10.1016/S0022-2496(02)00028-7).
9. Olson C. Parallel algorithms for hierarchical clustering. *Parallel Computing*. 1995. Vol. 21(8). P. 1313–1325.
10. Shafer G. *A Mathematical Theory of Evidence*. Princeton, NJ: Princeton University Press. 1976. P. 875–883.
11. Taroun A., Yang J. B. Dempster-Shafer theory of evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management. *The Built & Hum. Environ. Rev*. 2011. Vol. 4(1). P. 155–166.

References:

1. Alpert, S. (2020). A new approach to applying the discount rule in hyperspectral satellite image classification. *Management of Development of Complex Systems*, 43, 76 – 82. [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2020.43.76-82).

-
2. Alpert S. I. (2021). Data combination method in Remote Sensing tasks in case of conflicting information sources. *Ukrainian Journal of Remote Sensing*, 8(3), 44–48.
 3. Bezdek, J. C., Ehrlich, R., Full, W. (1984). FCM: The Fuzzy C-Means clustering algorithm. *Computers and Geosciences*, 10, 191–203.
 4. Chander, G., Markham, B. (2003). Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges Geoscience and Remote Sensing. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41, 2674 – 267.
 5. Chang, C. I. (2013). Hyperspectral data processing: Algorithm design and analysis. *Hoboken, N J: John Willey and Sons*, 1164 p.
 6. Hartigan, J. A., Wong, M. A. (1979). A K-means clustering algorithm. *Applied Statistics*, 28(1), 100–108.
 7. Lu, D., Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870.
 8. Myung, I. J. (2003). Tutorial on maximum likelihood Estimation. *Journal of Mathematical Psychology*, 47 (1), 90–100. doi:10.1016/S0022-2496(02)00028-7.
 9. Olson, C. (1995). Parallel algorithms for hierarchical clustering. *Parallel Computing*, 21(8), 1313–1325.
 10. Shafer, G. A. (1976). Mathematical Theory of Evidence. *Princeton, NJ: Princeton University Press*, 875–883.
 11. Taroun, A., Yang, J. B. (2011). Dempster-Shafer theory of evidence: Potential usage for decision making and risk analysis in construction project management. *The Built & Hum. Environ. Rev*, 4(1), 155–166.

Бобирь Д. С., аспірант кафедри інформаційних технологій електронних засобів
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0009-0009-6635-3582

Тягунова М. Ю., доцент кафедри комп'ютерних систем та мереж
Національного університету «Запорізька політехніка»
ORCID: 0000-0002-9166-5897

ВИМОГИ ДО АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ ПІДБОРУ ОЛИВ

У сучасних умовах розвитку транспортної інфраструктури та промислових технологій питання правильного добору мастильних матеріалів, зокрема моторної оливи, набуває особливої актуальності. Відповідність оливи технічним характеристикам і реальним умовам експлуатації безпосередньо впливає на ефективність, довговічність та безпеку роботи двигунів і машин. Однак наявність великого асортименту мастильних матеріалів на ринку, різниця у їхніх властивостях і стандартах, а також відсутність універсальних цифрових рішень для підбору ускладнюють цей процес як для професіоналів, так і для пересічних користувачів.

У роботі наведено аналіз сучасних інструментів добору оливи, серед яких онлайн-платформи, мобільні застосунки та модулі ERP-систем. Встановлено, що існуючі рішення мають суттєві обмеження: орієнтацію на конкретні бренди, недостатнє врахування умов експлуатації, обмежену масштабованість та слабку інтеграцію з іншими системами. Це підтверджує потребу у створенні нової автоматизованої системи підтримки прийняття рішень, яка була б незалежною від виробника, гнучкою, масштабованою і здатною враховувати широкий спектр технічних та експлуатаційних параметрів.

Запропоновано концепцію побудови такої системи, що включає модульну архітектуру, інтеграцію з зовнішніми базами даних через API, автоматичне оновлення інформації та застосування інтелектуальних алгоритмів обробки даних, включаючи машинне навчання. Розроблені функціональні та нефункціональні вимоги до системи передбачають високу швидкодію, стійкість до навантажень, захист персональних даних та інтуїтивно зрозумілий інтерфейс користувача.

Запропоновано вимоги до архітектури системи у вигляді клієнтського інтерфейсу як вебпорталу або мобільного застосунку, серверну логіку обробки запитів, централізоване сховище даних і аналітично-рекомендаційний модуль. Окремо розглянуто варіанти реалізації системи як у вигляді локального рішення для підприємств, так і як хмарного сервісу. Технічна реалізація повинна базуватися на відкритих технологіях, таких як Python, Django/Flask, PostgreSQL або MySQL, із використанням сучасних фреймворків для фронтенду.

Таким чином, запропонований підхід до створення автоматизованої системи добору моторної оливи забезпечує високу адаптивність, точність рекомендацій та відповідність вимогам сучасного ринку, що сприятиме підвищенню ефективності технічного обслуговування транспортних засобів і промислового обладнання.

Ключові слова: підбір оливи, автоматизована система, база даних, інтерфейс користувача, штучний інтелект.

Bobur D. S., Tiahunova M. Yu. Requirements for the automated oil selection system

In the current context of the development of transport infrastructure and industrial technologies, the issue of selecting the correct lubricants, particularly engine oils, is becoming increasingly important. The compliance of oil with technical specifications and real operating conditions directly affects the efficiency, durability, and safety of engines and machinery. However, the wide range of lubricants available on the market, differences in their properties and standards, as well as the lack of universal digital solutions for selection, complicate this process for both professionals and ordinary users.

The paper presents an analysis of modern oil selection tools, including online platforms, mobile applications, and ERP system modules. It has been established that existing solutions have significant limitations: a focus on specific brands, insufficient consideration of operating conditions, limited scalability, and weak integration with other systems. This confirms the need to create a new automated decision support system that would be manufacturer-independent, flexible, scalable, and capable of taking into account a wide range of technical and operational parameters.

A concept for building such a system is proposed, including modular architecture, integration with external databases via APIs, automatic information updates, and the use of intelligent data processing algorithms, including machine learning. Functional and non-functional requirements for the system have been developed, including high performance, load resistance, personal data protection, and an intuitive user interface.

Requirements for the system architecture are proposed in the form of a client interface as a web portal or mobile application, server-side logic for request processing, centralized data storage, and an analytical-recommendation module. Variants

of implementing the system as either a local solution for enterprises or a cloud service are considered separately. The technical implementation should be based on open technologies such as Python, Django/Flask, PostgreSQL or MySQL, using modern frontend frameworks.

Thus, the proposed approach to creating an automated engine oil selection system ensures high adaptability, recommendation accuracy, and compliance with modern market requirements, which will contribute to improving the efficiency of maintenance of vehicles and industrial equipment.

Key words: oil selection, automated system, database, user interface, artificial intelligence.

Постановка проблеми. У сучасних умовах інтенсивного розвитку транспортної інфраструктури та промислових технологій зростає потреба у надійному технічному обслуговуванні обладнання. Одним із критичних чинників, що впливають на ефективність та довговічність роботи машин і двигунів, є правильний добір мастильних матеріалів. Зокрема, якісна та коректно підібрана моторна олива забезпечує зменшення тертя, захист деталей від зносу, охолодження вузлів і стабільну роботу системи загалом.

У разі використання невідповідної оливи можуть виникати серйозні наслідки – від зниження продуктивності двигуна до його передчасного виходу з ладу. Ситуацію ускладнює велике розмаїття мастильних матеріалів на ринку, що відрізняються за показниками в'язкості, хімічним складом, експлуатаційними властивостями та відповідністю міжнародним стандартам.

У цьому контексті особливої актуальності набуває створення автоматизованої інформаційної системи, яка б дозволяла об'єктивно, швидко та з урахуванням індивідуальних характеристик техніки здійснювати вибір оптимальної оливи. Такий інструмент буде корисним як для кваліфікованих спеціалістів сервісних центрів, так і для звичайних користувачів, які бажають забезпечити належне функціонування своїх транспортних засобів. І хоча поточні інструменти частково вирішують завдання добору мастильних матеріалів, вони не забезпечують належного рівня адаптивності, масштабованості та комплексного врахування всіх факторів, що підтверджує необхідність розробки нових підходів і систем.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. На сьогоднішній день на ринку представлено широкий спектр цифрових інструментів, призначених для допомоги у виборі мастильних матеріалів [1, 2]. Ці рішення реалізуються як у вигляді вебсервісів, так і у формі мобільних додатків, і в основному розроблені безпосередньо виробниками оливи.

Найбільш поширеними є:

- онлайн-платформи провідних брендів;
- мобільні застосунки;
- інтегровані модулі в ERP-системах.

Онлайн-платформи провідних брендів, таких як Motul, Castrol, Shell або Liqui Moly [3-6] пропонують інтерактивні каталоги, в яких користувач вводить дані про транспортний засіб (модель, марку, рік випуску, тип двигуна тощо), щоб отримати рекомендації щодо сумісної продукції;

Мобільні застосунки орієнтовані на швидкий доступ до функції добору оливи. Прикладами таких сервісів є Oil Finder [7], AutoMate, Oil Selector [8]. Вони переважно розраховані на автомеханіків або автовласників;

Інтегровані модулі в ERP-системах використовуються на автосервісах. Деякі системи управління автосервісами мають вбудовану функцію підбору оливи або забезпечують з'єднання з базами даних виробників мастильних матеріалів [9].

Проте більшість із цих рішень мають значні обмеження. Вони орієнтовані виключно на продукцію одного бренду, не завжди враховують специфічні умови експлуатації, такі як зношеність обладнання, екстремальні температури, інтенсивність навантаження, та іноді вимагають ручного введення великої кількості параметрів, що ускладнює роботу користувача.

Постановка завдання. Основна мета даної роботи – розробка концептуального підходу та вимог до побудови автоматизованої системи підтримки вибору моторної оливи на основі конкретних експлуатаційних умов та технічних характеристик об'єкта.

Виклад основного матеріалу. Проведений аналіз існуючих цифрових рішень для підбору мастильних матеріалів дозволяє виявити як позитивні аспекти, так і ключові недоліки. У більшості випадків сервіси, представлені на ринку, забезпечують користувачеві швидкий доступ до інформації, що дозволяє економити час. Також варто відзначити зрозумілий інтерфейс таких систем, який не потребує спеціальної технічної підготовки з боку користувача. Багато рішень реалізовано як у форматі вебплатформ, так і у вигляді мобільних застосунків, що розширює їхню доступність. Крім того, інформація, яку вони надають, оновлюється безпосередньо виробниками, що забезпечує високу актуальність даних.

Водночас, більшість наявних систем мають ряд суттєвих обмежень. Основна проблема полягає в обмеженні асортименту мастильних матеріалів лише до продукції конкретного бренду, що зменшує варіативність гнучкого вибору. Крім того, персоналізація добору оливи в більшості випадків відсутня, не враховується специфіка умов експлуатації, таких як стиль водіння, кліматичні умови, технічний стан двигуна чи його зношеність. Обробка даних у таких системах часто виконується вручну, що підвищує ймовірність помилок на

етапі введення параметрів. Також слід зауважити, що більшість цифрових сервісів функціонує як замкнуті платформи, без можливості обміну інформацією з іншими системами або зовнішніми базами даних, що ускладнює їх інтеграцію в існуючу інфраструктуру автосервісів або логістичних комплексів.

Однією з відмінностей пропонованого підходу є незалежність від конкретного бренду, що дає змогу забезпечити об'єктивний та максимально адаптивний добір продукції.

Крім того, важливою перевагою є можливість автоматичної обробки широкого переліку вхідних параметрів. Система має бути орієнтована на використання не лише технічних характеристик транспортного засобу, а й даних, що відображають реальні умови експлуатації. Не менш важливою є гнучкість налаштувань, що дозволяє користувачеві впливати на ключові параметри добору та отримувати супровід на всіх етапах взаємодії з системою. Запропонована концепція також передбачає інтеграцію з зовнішніми сервісами – обліковими, торговельними, сервісними платформами.

Особливу увагу приділено застосуванню інтелектуальних алгоритмів, зокрема методів машинного навчання та штучного інтелекту. Завдяки цьому система буде здатна не лише аналізувати велику кількість параметрів, а й навчатися на основі зібраної статистики, що дозволить з часом підвищити точність видаваних рекомендацій.

Таким чином, правильно сформульовані вимоги є основою до створення надійної, мультифункціональної та ефективної системи підбору мастильних матеріалів, яка задовольнятиме потреби як професійних так і звичайних користувачів.

На етапі проєктування інформаційної системи [10] підбору мастильних матеріалів важливим кроком є чітке визначення вимог, які вона повинна реалізовувати для забезпечення належної функціональності, надійності та ефективності. Ці вимоги поділяються на функціональні та нефункціональні.

До функціональних вимог належить забезпечення збору технічної інформації про транспортний засіб, включно з типом автомобіля, маркою, моделлю, параметрами двигуна та роком випуску. Одним із критичних завдань є врахування умов експлуатації: температурних режимів, навантажень, зношення вузлів. Система повинна також підтримувати інтеграцію з зовнішніми джерелами (електронні каталоги виробників оливи, бази технічної документації або API-сервіси сторонніх платформ), що дозволить оперативно оновлювати інформацію та поновлювати базу даних.

Генерація рекомендацій має реалізовуватись у вигляді автоматичного добору оптимальних мастильних матеріалів із урахуванням усіх вхідних параметрів. При цьому важливою є можливість пошуку альтернатив у разі недоступності конкретного продукту. Також система повинна надавати супровідні рекомендації щодо періодичності заміни оливи та виконання відповідних сервісних операцій. Результати підбору мають формуватися у вигляді звітної документа, придатного для друку або в електронному форматі (наприклад, PDF або HTML).

Нефункціональні вимоги стосуються загальних характеристик системи, які впливають на якість її експлуатації. Зокрема, необхідно забезпечити високу швидкодію – усі запити повинні оброблятися максимально швидко.

Система має бути стійкою до навантажень та забезпечувати стабільність роботи навіть за умов пікових звернень. Особливу увагу слід приділити захисту персональної інформації, що передбачає дотримання вимог щодо безпеки користувацьких даних. Ще однією важливою характеристикою є масштабованість, яка дозволить адаптувати систему до збільшення обсягів даних та розширення користувацької бази. Крім того, інтерфейс системи повинен бути інтуїтивно зрозумілим та придатним до використання особами з різним рівнем технічної підготовки.

Завершальним елементом функціональної структури є модуль звітності та підтримки, який відповідає за генерацію структурованих документів з результатами підбору, що можуть бути збережені або роздруковані. Окрім цього, система надає користувачеві доступ до розділу довідкової інформації, включаючи пояснення, рекомендації та відповіді на найбільш поширені запитання.

Серед ключових функцій автоматизованої системи добору мастильних матеріалів варто виділити кілька базових модулів, що формують її основну функціональну структуру. Насамперед, система повинна забезпечувати збір вхідних даних, необхідних для формування доцільних рекомендацій. До цього належить інтерактивна взаємодія з користувачем у форматі опитування, а також автоматизоване зчитування технічної інформації з документів транспортного засобу, (через VIN-код або API-витяг).

Отримані дані надходять до модуля пошуку, де здійснюється їх фільтрація в межах бази даних системи. Враховуються технічні характеристики двигуна, умови експлуатації та інші параметри, що дозволяє сформувати список лише тих мастильних матеріалів, які відповідають заданим параметрам. Наступним до обробки підключається аналітичний модуль, який зіставляє специфікації обраного двигуна з властивостями доступних продуктів. У результаті користувачу пропонується оптимальний варіант моторної оливи з точки зору ефективності та відповідності умовам експлуатації. У випадках, коли базовий продукт недоступний, система генерує перелік альтернативних позицій.

Важливе значення має модуль збереження користувацької історії, що дозволяє фіксувати всі запити, здійснені у системі, а також зберігати архів даних про технічне обслуговування. Це дає можливість

формування персоналізованих рекомендацій у подальшому використанні платформи. Щоб забезпечити актуальність інформації система підтримує автоматичне оновлення даних шляхом синхронізації з зовнішніми джерелами, насамперед офіційними каталогами виробників мастильних матеріалів.

Завершальним елементом функціональної структури є модуль звітності та підтримки, який відповідає за генерацію структурованих документів з результатами підбору, що можуть бути збережені або роздруковані. Також система надає користувачеві доступ до розділу довідкової інформації, включаючи пояснення, рекомендації та відповіді на найбільш поширені запитання.

У процесі створення та впровадження автоматизованої системи підбору моторної оливи необхідно враховувати низку чинників, що можуть обмежувати функціональність або точність результатів.

Одним із ключових обмежень є неповнота наявних інформаційних джерел: для окремих моделей транспортних засобів можуть бути відсутні точні технічні характеристики або специфікації вузла. Крім того, ефективність роботи системи залежить від коректності введених користувачем даних. У випадку помилкових або неточних параметрів результат добору мастильного матеріалу може не відповідати експлуатаційним умовам.

Також проблемою є постійна зміна міжнародних та локальних стандартів у галузі класифікації моторних олив. Це вимагає регулярного оновлення бази даних системи, аби підтримувати її відповідність актуальним нормативам. Також варто враховувати, що сторонні API-сервіси, через які здійснюється взаємодія з зовнішніми базами даних або каталогами, можуть мати технічні або ліцензійні обмеження. У деяких випадках повний обсяг інформації про мастильні матеріали недоступний через відсутність відкритих даних від окремих виробників.

При розробці системи враховується низка базових припущень. Зокрема, передбачається, що користувачі володіють мінімальними знаннями щодо власного транспортного засобу та здатні коректно ввести запитовані дані. Також вважається, що система оперує достовірними та актуальними параметрами, введеними в процесі взаємодії. Стандартизація мастильних матеріалів здійснюється згідно з міжнародно визнаними класифікаціями (SAE, API або ACEA). Підтримка бази даних забезпечується або кваліфікованими фахівцями, або за допомогою автоматизованих механізмів оновлення.

Архітектура майбутньої автоматизованої системи добору моторної оливи формується за модульним принципом. Це забезпечує можливість гнучкого розширення, адаптації до нових умов використання, зручного супроводу та оновлення. Кожен функціональний блок системи реалізує окрему підсистему, яка відповідає за конкретну частину загального процесу.

До загальної структури системи входить клієнтський інтерфейс, який реалізується у вигляді вебпорту або мобільного застосунку. Він відповідає за організацію взаємодії користувача з функціональними модулями та повинен бути інтуїтивно зрозумілим і доступним для різних категорій користувачів.

Серверна логіка (бекенд) забезпечує логіку обробки запитів, реалізацію алгоритмів добору, а також взаємодію з інформаційною базою.

Централізоване сховище даних в якому зберігаються дані про транспортні засоби, мастильні матеріали, специфікації двигунів та історію взаємодій з системою.

Важливу роль відіграють інтеграційні інтерфейси, що забезпечують обмін інформацією з зовнішніми джерелами, такими як технічні каталоги, ERP-системи, бази документації та сервіси виробників техніки.

Завершальним компонентом є аналітично-рекомендаційний блок, функція якого полягає у глибокому аналізі вхідних даних, порівнянні специфікацій та формуванні переліку рекомендованих олив відповідно до заданих умов.

Вибір апаратної платформи для розгортання автоматизованої системи підбору моторної оливи залежить від масштабів її впровадження, кількості користувачів та специфіки інфраструктури підприємства. Технічні рішення мають забезпечувати надійність, стабільну роботу та можливість масштабування як у межах одного сервісного центру, так і в рамках розподіленої хмарної системи. Передбачаються кілька варіантів реалізації, включаючи локальне встановлення на серверному обладнанні підприємства, хмарну платформу з доступом через браузер, а також мобільні клієнти з базовим функціоналом для оперативної роботи в польових умовах.

У випадку локального розміщення системи рекомендується використовувати сервер із процесором рівня Intel Core i5 або еквівалентом, оперативною пам'яттю не менше 8 ГБ, жорстким диском від 100 ГБ з можливістю подальшого розширення, а також операційною системою на базі Ubuntu, Debian або Windows Server. Обов'язковою умовою є стабільне мережеве підключення для забезпечення синхронізації, оновлень та зв'язку з зовнішніми сервісами. В умовах зростання обсягів обробки даних або кількості одночасних підключень доцільно передбачити можливість розширення обчислювальних ресурсів.

Для реалізації функціоналу системи обґрунтовано використання відкритих і гнучких технологічних рішень, які забезпечують високу швидкість, зручність у розробці та підтримку сучасних стандартів інтеграції. Фронтенд-частина інтерфейсу може бути побудована з використанням HTML5, CSS3 та JavaScript у поєднанні з фреймворками React або Vue.js, що дозволяє створити динамічний, адаптивний та кросплатформний інтерфейс користувача. У якості бекенду доцільно застосовувати Python з фреймворками Django або Flask, або ж Node.js – залежно від обраної архітектурної моделі, що відповідає вимогам проекту.

Для зберігання інформації рекомендовано використовувати реляційні СУБД – PostgreSQL або MySQL, які мають хорошу продуктивність, масштабованість та активну спільноту підтримки. Обмін даними між модулями системи та зовнішніми джерелами забезпечується через RESTful або GraphQL API, що дозволяє гнучко будувати логіку взаємодії. У процесі розробки доцільно застосовувати засоби тестування, такі як Postman, Selenium, Pytest, а також реалізувати контейнеризацію з використанням Docker, що дозволить спростити розгортання та масштабування системи в різних середовищах.

Одним із важливих чинників успішного функціонування інформаційної системи є забезпечення здатності до повноцінної інтеграції з іншими програмними рішеннями. Система, що пропонується, повинна підтримувати обмін інформацією з ERP- і CRM-системами, які використовуються сервісними центрами для обліку клієнтів, транспортних засобів, витратних матеріалів та інших операцій. Також передбачається зв'язок із офіційними API каталогів виробників мастил, що дозволяє автоматизовано оновлювати перелік продукції та її технічні характеристики. Додатково інтеграція з базами технічної документації та платіжними шлюзами відкриває можливість як для розширення функціоналу обслуговування, так і для монетизації системи в комерційному середовищі.

Для забезпечення узгодженості даних важливо реалізувати уніфікацію форматів обміну, використовуючи поширені стандарти JSON або XML. Перед збереженням будь-якої інформації доцільно проводити перевірку джерел на предмет достовірності та актуальності. Захищений доступ до зовнішніх ресурсів забезпечується шляхом використання сучасних протоколів авторизації, зокрема OAuth 2.0 або API-ключів, що гарантує конфіденційність і цілісність переданої інформації.

Висновки. Таким чином, автоматизована система добору мастильних матеріалів повинна мати чітку модульну структуру для ефективної роботи всіх процесів. Основними складовими є модулі збору даних, пошуку, аналітики, історії користувачів, оновлення інформації та генерації звітів. Якість добору значною мірою залежить від повноти технічних характеристик та коректності введених користувачем даних. Постійні зміни стандартів мастильних матеріалів вимагають регулярного оновлення баз даних і підтримки інтеграції з зовнішніми джерелами. Система повинна бути безпечною, масштабованою і здатною до роботи як у локальній, так і в хмарній інфраструктурі. Для розробки рекомендовано використовувати сучасні технології веброзробки та засоби тестування і контейнеризації. Такий підхід забезпечить стабільну роботу системи, простоту оновлення і зручність користування для різних категорій клієнтів.

Список використаних джерел:

1. Pavlenko, I., Pitel', J., Ivanov, V., Berladir, K., Mižáková, J., Kolos, V., & Trojanowska, J. Using regression analysis for automated material selection in smart manufacturing. *Mathematics*, 2022. Vol. 10 (11). P. 1888.
2. Aziza, O. R., Uzougbo, N. S., & Ugwu, M. C. AI and the future of contract management in the oil and gas sector. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 2023. Vol. 19 (3). P. 1571-1581.
3. Вебсистема підбору оливи Motul. URL: <https://www.motul.com/uk-UA/lubricants> (дата звернення: 26.04.2025).
4. Вебсистема підбору оливи Castrol. URL: https://www.castrol.com/uk_ua/ukraine/home/product-finder.html (дата звернення: 25.04.2025).
5. Вебсистема підбору оливи. URL: Liqui Moly <https://liquimoly.ua/ua-pidbir-oliv> (дата звернення: 26.04.2025).
6. Вебсистема підбору оливи Motorex. URL: <https://motorex.com/en-ch/Service-Consulting/Oil-Finder?step=brand&categoryId=1> (дата звернення: 28.04.2025).
7. Вебсервіс підбору оливи. URL: <https://oilguide.ravenol.de/?lang=en> (дата звернення: 28.04.2025).
8. Вебсервіс підбору оливи. URL: <https://ua.championlubes.com/uk-ua/oil-finder> (дата звернення: 28.04.2025).
9. Aljboury, M. I. A. Designing an ERP System by Adopting the Decision Tree Algorithm: A Case Study in the General Company of Oil Products Distribution. *TANMIYAT AL-RAFIDAIN*, 2021. Vol. 40 (130). P. 102-134.
10. Тягунова М.Ю., Бобирь Д.С. Проектування структури автоматизованої системи підбору оливи. *XII Міжнародна науково-практична конференція "Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій"*, 10-12 груд. 2024 : тези доп. – Запоріжжя. – С. 47-49.

References:

1. Pavlenko, I., Pitel', J., Ivanov, V., Berladir, K., Mižáková, J., Kolos, V., & Trojanowska, J. (2022). Using regression analysis for automated material selection in smart manufacturing. *Mathematics*, 10 (11), 1888.
2. Aziza, O. R., Uzougbo, N. S., & Ugwu, M. C. (2023). AI and the future of contract management in the oil and gas sector. *World Journal of Advanced Research and Reviews*, 19(3), 1571-1581.
3. Web system for oil selection. Motul. URL: <https://www.motul.com/uk-UA/lubricants>
4. Web system for oil selection. Castrol. URL: https://www.castrol.com/uk_ua/ukraine/home/product-finder.html

-
5. Web system for oil selection. URL: Liqui Moly <https://liquimoly.ua/ua-pidbir-oliv>
 6. Web system for oil selection. Motorex. URL: <https://motorex.com/en-ch/Service-Consulting/Oil-Finder?step=brand&categoryId=1>
 7. Web service for oil selection. URL: <https://oilguide.ravenol.de/?lang=en>
 8. Web service for oil selection. URL: <https://ua.championlubes.com/uk-ua/oil-finder>
 9. Aljuboury, M. I. A. (2021). Designing an ERP System by Adopting the Decision Tree Algorithm: A Case Study in the General Company of Oil Products Distribution. *TANMIYAT AL-RAFIDAIN*, 40 (130), 102-134.
 10. Tiahunova M.Yu., Bobyr D.S. Proiektuvannia struktury avtomatyzovanoi systemy pidboru olyvy. *XII Mizhnarodna naukovo-praktychna konferentsiia "Suchasni problemy i dosiahnennia v haluzi radiotekhniky, telekomunikatsii ta informatsiinykh tekhnolohii"*, 10-12 hrud. 2024 : tezy dop. – Zaporizhzhia, 47-49

Воловик А. Ю., доктор технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID: 0000-0002-8772-9843

Кичак В. М., доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій
Вінницького національного технічного університету
ORCID: 0000-0001-7013-3261

Савицький А. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційних радіоелектронних технологій і систем
Вінницького національного технічного університету
ORCID: 0009-0000-3490-6300

Макогон В. І., кандидат технічних наук, старший викладач кафедри інфокомунікаційних систем і технологій
Вінницького національного технічного університету
ORCID: 0000-0001-7176-2676

ОЦІНЮВАННЯ ДАНИХ В ТЕЛЕМЕТРИЧНОМУ КАНАЛІ, ВРАЖЕНОМУ ХАОТИЧНО-ІМПУЛЬСНИМИ ПЕРЕШКОДАМИ

Проблемою багатьох телеметричних систем є невідповідність між високою швидкістю передачі даних і достовірністю їх прийому в умовах впливу імпульсних перешкод, характерних для різноманітних середовищ передачі інформації. Оскільки, завдяки стрімкому розвитку технологій, телеметрія додатково стала відігравати ключову роль в забезпеченні належного рівня надійності та гарантуванні заданого ступеня безпеки складних технологічних об'єктів та систем, така невідповідність стає все більш критичною.

Стаття присвячена проблемі синтезу пристроїв оцінювання стану лінійних стаціонарних динамічних систем, що працюють в умовах шуму та збурень у каналі спостережень. В роботі розглядається комбінований вплив гаусівського шуму та хаотичних імпульсних перешкод на точність фільтрації повідомлень у цифровому телеметричному каналі. Метою дослідження є підвищення точності оцінювання повідомлень в телеметричному каналі, враженому хаотично-імпульсними перешкодами з помірним зростанням обчислювальних витрат.

В загальному випадку, ефективність використання методів синтезу пристроїв оптимального оцінювання залежить від повноти апріорної інформації відносно математичної моделі процесів, що мають місце у об'єкті контролю, статистичної інформації щодо властивостей діючих завад та механізму утворення вихідних даних. Для задач такого класу стандартним рішенням є оптимальний фільтр Калмана, який демонструє найвищу якість збіжності оцінок до істинних значень. Якщо дані поточного стану системи спостережень відсутні, молодостовірні або не відповідають прийнятим моделям то задача синтезу стає не некоректно сформованою. Для вирішення цього протиріччя, в представленій роботі запропонована адаптація моделі каналу спостережень до умов появи різноточних вихідних даних включно з аномальними. На основі скоректованої моделі синтезовано псевдобайєсівський мультигіпотезний алгоритм оцінювання в якому закладений механізм розрахунку апостеріорної ймовірності появи ХП, а на його основі запроваджено пропорційне зважування вихідних оцінок. На основі результатів цифрового статистичного моделювання проведено порівняльний аналіз точності розглянутих алгоритмів оцінювання. Інформаційним джерелом для оцінки відносної точності вибраний сигнальний залишок, що утворюється, як різниця між еталонним телеметричним сигналом та оцінкою враженою ХП, отриманою за допомогою відповідних фільтрів. Результати чисельного моделювання підтверджують ефективність запропонованого підходу.

Ключові слова: лінійна динамічна система, хаотична імпульсна перешкода псевдобайєсівський фільтр, субоптимальна процедура оцінювання.

Volovyk A. Yu., Kychak V. M., Savytskyi A. Yu., Makohon V. I. Telemetry channel data estimation exposed to chaotic impulse-pulse disturbances

The paper is devoted to the problem of devices synthesis for estimating the linear stationary dynamic systems state operating under conditions of noise and perturbations in the observation channel. The paper considers the joint influence of Gaussian noise and chaotic pulse disturbance on the accuracy of message filtering in a digital telemetry channel.

The problem of many telemetry systems is the disparity between high data rate and reliability of their reception under the influence of impulse noise, which is typical for various medium information transmission. Since, due to the rapid development of technology, telemetry has become crucial to ensure the proper level of reliability and guarantee a given degree of safety of complex technological facilities and systems, such discrepancy is becoming more and more critical.

The aim of the study is to improve the accuracy of message estimation in a telemetry channel exposed to chaotic-pulse disturbances against the background of a moderate increase in computational cost.

In general, the efficiency of using methods for synthesizing optimal estimation devices depends on the completeness of a priori information about the processes mathematical model occurring in the control object, statistical information about the existing disturbances properties and the initial data formation mechanism. For problems of this class, the standard solution is the optimal Kalman filter demonstrating the highest quality of convergence of estimates to true values. If data on the current state of the observation system is missing, unreliable, or does not correspond to the accepted models, then the synthesis problem becomes incorrectly formulated. To resolve this contradiction, the presented work proposes a correction of the telemetry observation channel mathematical model, taking into account the appearance of differently accurate initial data, including anomalous ones. Based on the adjusted model, a pseudo-Bayesian algorithm for multi-hypothesis estimation is synthesized. It includes a mechanism for calculating the posterior probability of chaotic impulse noise and proportional weighting of the initial estimates based on it. Based on the results of digital statistical modeling, a comparative analysis of the accuracy of the considered evaluation algorithms was carried out. The residual of the signal generated as a difference between the telemetry reference signal and the estimate of the affected chaotic pulse interference obtained with the help of appropriate filters was chosen as a source of information for the relative accuracy estimation. The source of information for assessing the relative accuracy was the signal residual. It was generated as the difference between the reference telemetry signal and the estimate of the affected chaotic impulse disturbances obtained using the appropriate filters. Numerical simulation results confirm the effectiveness of the proposed approach.

Key words: linear dynamic system, chaotic impulse noise, pseudo-Bayesian filter, suboptimal estimation procedure.

Постановка проблеми. Телеметричні системи знайшли поширення в різноманітних галузях народного господарства, науки і техніки. Аналіз наявних на сьогодні публікацій свідчить про широкий попит та велику зацікавленість до питань побудови каналів управління та інформаційного обміну в напрямках геофізики, океанології, метеорології, медицини, авіаційної та космічної техніки, систем керування промисловими підприємствами і технологічними процесами [1-3]. Стрімко зростає кількість публікацій стосовно систем керування та моніторингу безпілотних автономних систем, роботизованих пристроїв, малогабаритних безпілотних літальних апаратів цивільного та військового призначення [4,5].

Телеметрична інформація використовується для вивчення властивостей процесів в об'єкті телеметрії, управління станом його систем та контролю в реальному часі. Характерною рисою цих систем є велика кількість і різноманітність вимірюваних фізичних величин, що потребують передачі на великі відстані з високою точністю та швидкістю. В низці випадків похибка передачі не повинна перевищувати 0,5% повної шкали динамічного діапазону вимірюваної фізичної величини при швидкості передачі інформаційного потоку порядку $10^6 - 10^7$ біт/сек і більше, з допустимою імовірністю помилки $10^{-4} - 10^{-6}$ [6, 7].

Проблемою багатьох телеметричних систем є невідповідність між високою швидкістю передачі даних і достовірністю їх прийому в умовах впливу імпульсних перешкод, характерних для різноманітних середовищ передачі інформації. Такі перешкоди чинять суттєвий вплив на передачу даних систем керування та прийняття рішень. При цьому слід зазначити, що до недавнього часу питанням вдосконалення підсистеми завадостійкості, відносно імпульсних перешкод, особливої уваги не приділялося. Це явище пов'язане з тим, що тенденція технологічного ускладнення об'єктів контролю, в першу чергу, спрямовує існуючі підходи на збільшення ефективної швидкості передачі інформації та збереження її конфіденційності при цьому, питаннями забезпечення заданого рівня надійності трансмісії даних в конкретних умовах використання нехтували. Сучасний розвиток технологій змінив світ. Складні технологічні об'єкти та високо-інтегровані системи набули масовості, а в наслідок їх діяльності почали утворюватися інтенсивні електромагнітні перешкоди. Одночасно, телеметрія додатково стала відігравати ключову роль в забезпеченні належного рівня надійності та гарантуванні заданого ступеню безпеки. Ситуація, що склалася спонукає до необхідності модернізації існуючих та розробки нових спеціалізованих методів та алгоритмів захисту телеметричної інформації від хаотичних імпульсних перешкод (ХІП). Враховуючи вище сказане, розробка таких пристроїв та алгоритмів наразі є актуальною.

Аналіз останніх досліджень та публікацій. Без сумніву залишається той факт, що стрімкий технологічний прогрес проникаючи у різні сфери життя покращує його якість, водночас збільшуючи вразливість до широкого спектру завад, які можуть становити загрозу для інфраструктури суспільства. З метою спроби розуміння впливу таких середовищ на електричні системи, в роботі [8] розглянуті методи класифікації ХІП у вигляді електромагнітних завад різноманітного походження. В роботах [9-10], на основі відомої топології електромагнітних завад обґрунтовані їх фізичні параметри, на системному рівні розглянуті можливі наслідки їх впливу. В [11] моделюються комплексні сценарії складних електромагнітних завад в умовах яких телеметричні пристрої працюють на практиці. David Yang у співавторстві, в своїй роботі [12] надав ретельний аналіз впливу потужних радіочастотних завад на функціонування цифрових схем та пристроїв.

Питання оптимального прийому даних по радіотелеметричним каналам зв'язку в умовах діяннн хаотичних імпульсних перешкод (ХІП) розглядалися в низці робіт і головним чином, зводилися до синтезу оціночно-компенсаційних процедур фільтрації [13, 14] та методів адаптивної фільтрації [15, 16].

Проблема синтезу алгоритмів оцінювання вектора стану динамічних системи знаходиться в центрі уваги багатьох авторів протягом тривалого часу. Досить ретельно теоретичні аспекти з цього напрямку розглянуті у [17]. Незважаючи на те, що проблема синтезу відновників стану добре досліджена, вона залишається актуальною, як для лінійних, так і для нелінійних об'єктів [18, 21]. На сьогодні розроблено достатня кількість конструктивних методів синтезу приладів оцінювання повної та зменшеної розмірності для лінійних стаціонарних динамічних систем де збурення відокремлюються від корисного сигналу. Це дозволяє відновити нормальну працездатність фільтра Калмана оцінки якого втрачають коректність при наявності збурень [19, 20].

На жаль, реалізація сучасних алгоритмів багато ступінчатих оптимальних процедур лінійної фільтрації та модельно-орієнтованих пристроїв з нелінійною залежністю, в практичних доданках досить часто наштовхується на значні труднощі, що обумовлені обмеженнями на об'єм пам'яті, швидкодію промислових мікропроцесорних засобів та часовою затримкою. В даній роботі зроблено спробу обійти ці обмеження за рахунок відмови від строгої теоретичної оптимальності, тобто по суті, пропонуються субоптимальні процедури оцінювання телеметричних даних. Запропоновано новий підхід до синтезу відновника даних телеметричного каналу на основі лінійної стаціонарної системи в умовах впливу ХІП. Отриманий результат ґрунтується на засадах теорії псевдобайєсівських оцінок, у припущенні щодо наявності певної апріорної інформації відносно ХІП.

Отже, **мета дослідження** полягає у підвищенні точності оцінювання даних в телеметричному каналі, враженому хаотично-імпульсними перешкодами з помірним обчислювальним ускладненням отриманого алгоритму.

Виклад основного матеріалу. Розглянемо лінійну дискретну динамічну систему, яка описує інформаційне повідомлення, що транслюється по радіотелеметричному каналу передачі, на фоні загальних шумів природнього походження

$$\mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A}_k \mathbf{x}_k + \mathbf{B}_k \mathbf{w}_k, \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \xi_k \quad (2)$$

де, $\mathbf{x}_k$ – n -мірний вектор стану динамічної системи; $\mathbf{y}_k$ – m -мірний вектор спостереження; $\mathbf{A}_k, \mathbf{B}_k, \mathbf{C}_k$ – системні матриці відповідних розмірів; $\mathbf{w}_k, \xi_k$ – білі гаусівські шуми з нульовими середніми значеннями та коваріаційними матрицями $\mathbf{Q}_k, \mathbf{R}_k$ відповідно.

В загальному випадку, ефективність використання методів синтезу пристроїв оптимального прийому телеметричних даних за результатами спостережень залежить від повноти апріорної інформації щодо математичної моделі процесів, що мають місце у об'єкті контролю, статистичної інформації щодо властивостей діючих завад та механізму утворення вихідних даних. За даних обставин, оптимальним рішенням для оцінювання невідомих параметрів є стандартний фільтр Калмана. Якщо дані поточного стану системи спостережень відсутні, малодостовірні або не відповідають прийнятим моделям (поява ХІП), то задача синтезу стає некоректно сформованою. У такому випадку доцільно перейти до пошуку більш розширених методів оцінювання, як параметрів системи так і стану каналу спостережень [20].

В представлений роботі запропонована корекція математичної моделі каналу телеметричних спостережень з урахуванням появи різноточних вихідних даних включно з аномальними. Для цього рівняння (2) подамо у іншому вигляді

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \gamma_k \theta_k + \xi_k \quad (3)$$

де нові невідомі мають наступне значення: γ_k – випадкова послідовність, яка характеризує процес появи імпульсних перешкод; θ_k – стрибкоподібний процес з ліченим числом станів $\sigma_i, i = 1, \dots, N$, який описує можливі значення величини імпульсних перешкод. У подальшому, для спрощення, складову $\gamma_k \theta_k + \xi_k$ будемо враховувати як шумову складову $\gamma_k \mathbf{v}_k$ інтенсивність якої залежить від амплітуди імпульсної перешкоди, вираз (3) подамо у вигляді

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{C}_k \mathbf{x}_k + \gamma_k \mathbf{v}_k, \quad (4)$$

Як відомо, оптимальна оцінка $\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}$ яка мінімізує багатокроковий байєсівський ризик, за умови, що вектор спостережень $\mathbf{Y}_k^m = \{\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_k\}$ залежить від m -конкретної реалізації послідовності $\Gamma_k^m = \{\gamma_1, \dots, \gamma_k\}$ являє собою апостеріорне середнє

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)} = \mathbb{E} \left\{ \mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m \right\} = \int \mathbf{x}_{(k+1)} f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m \right] d\mathbf{x}_k$$

Скористаємось методом математичної індукції та властивостями згладжування умовного середнього. Неважко показати, що апостеріорна густина розподілу ймовірностей $f \left[\mathbf{x}_k \middle| \mathbf{Y}_k^m \right]$ може бути апроксимована зваженою сумою 2^n гаусівських густин розподілу для усіх $k=0, 1, \dots$ [22].

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)} = \sum_{r=1}^{\sigma}, \dots, \sum_{r=1}^{\sigma} \int_{-\infty}^{+\infty} \left\{ \mathbf{x}_{(k+1)} f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m, \Gamma_k^m \right] d\mathbf{x}_{(k+1)} \right\} p \left(\mathbf{Y}_k^m, \Gamma_k^m \right),$$

де $p \left(\mathbf{Y}_k^m, \Gamma_k^m \right)$ – апостеріорна імовірність реалізації конкретної параметричної ланки Γ_k^m . Зауважимо, що для практичних обчислень оцінка $\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}$ малопридатна, так як зі збільшенням k потреба в об’ємі оперативної пам’яті процесора зростає у відповідності до закону 2^k . З метою одержання оцінок $\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}$ у формі, прийнятній для реалізації на мікро-ЕОМ будемо обмежувати на кожному тактові число параметричних гілок. Для цього припустимо, що осереднення по $\Gamma_{(k-1)}^m$ на $(k-1)$ тактові вже виконано, а густина розподілу імовірностей $f \left[\mathbf{x}_k \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right]$ апроксимована гаусівською з еквівалентними параметрами $\hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}, \mathbf{P}_{(k|k-1)}$. Тоді субоптимальна оцінка, яку в подальшому будемо називати псевдобайєсівською, може бути обчислена рекурентно на основі співвідношення

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)} = \sum_{r=1}^{\sigma} \mathbf{x}_{(k+1)} f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m, \gamma_k = i \right] p \left(\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_k^m \right), \quad (5)$$

$$\text{де } f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m, \gamma_k = i \right] = \frac{f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \gamma_k = i \right] f \left[\mathbf{y}_k \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \mathbf{x}_{(k+1)}, \gamma_k = i \right]}{f \left[\mathbf{y}_k \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \gamma_k = i \right]}, \quad (6)$$

$$f \left[\mathbf{x}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_k^m, \gamma_k = i \right] = N \left[\mathbf{A}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k+1)}, \mathbf{A}_k \mathbf{P}_{(k|k-1)} \mathbf{A}_k^T + \mathbf{B}_k \mathbf{Q}_k \mathbf{B}_k^T \right],$$

$$f \left[\mathbf{y}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \mathbf{x}_{(k+1)}, \gamma_k = i \right] = N \left[\mathbf{C}_k \mathbf{x}_k, i^2 \mathbf{R}_k \right],$$

$$f \left[\mathbf{y}_{(k+1)} \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \gamma_k = i \right] = N \left[\mathbf{C}_k \hat{\mathbf{x}}_{(k|k-1)}, \mathbf{C}_k \mathbf{P}_{(k|k-1)} \mathbf{C}_k^T + i^2 \mathbf{R}_k \right],$$

$N[\cdot]$ – нормальна густина розподілу імовірностей, $i = 1, \sigma$.

Застосування правила Байєса до $p \left[\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_k^m \right]$ дає

$$p \left[\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_k^m \right] = \frac{p \left[\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right] f \left[\mathbf{y}_k \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \gamma_k = i \right]}{\sum_{r=1}^{\sigma} p \left[\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right] f \left[\mathbf{y}_k \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m, \gamma_k = i \right]},$$

$$\text{де } p \left[\gamma_k = i \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right] = \sum_{r=1}^{\sigma} p \left[\gamma_{(k-1)} = i \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right] p \left[\gamma_k = i \middle| \gamma_{(k-1)} = i \right],$$

$p \left[\gamma_{(k-1)} = i \middle| \mathbf{Y}_{(k-1)}^m \right]$ – величина відома з попередніх обчислень на $(k-1)$ тактові, $p \left[\gamma_k = i \middle| \gamma_{(k-1)} = i \right]$ – елемент матриці перехідних імовірностей заданої апріорно.

Відносно властивостей оцінок, які повністю визначаються співвідношеннями (5) – (6), корисно зробити наступні зауваження:

– оцінка (5) є нелінійною відносно спостережень, тому що ваговий коефіцієнт (6) безпосередньо залежить від поточного значення $\mathbf{y}_k$;

– стійкість оцінок (5) до діяння імпульсних перешкод забезпечується природнім шляхом – поєднання функцій “виявлення – оцінювання”;

– до складу оцінки (5) входить банк оцінок, одержаних модельно-умовними фільтрами Калмана, число яких в кожний момент часу k незмінно і дорівнює числу висунутих гіпотез N відносно можливих значень амплітуди хаотичної імпульсної перешкоди. В роботі [22] показано, що для задач суто практичного характеру достатнім є 3 – 5 робочих гіпотез.

Для простоти подальшого аналізу обмежимося випадком, коли γ_k приймає значення 1, σ з відповідними ймовірностями p_k^1, p_k^σ . Як вже зазначалося, узагальнення на випадок $\gamma_k = \sigma_i, i = 1, \dots, N$ – принципових труднощів не викликає за винятком збільшення розмірності задачі. При $\gamma_k = 1$, що відповідає умовам роботи без впливу хаотичних імпульсних перешкод, коваріаційна матриця шумів спостережень $\mathbf{v}_k$ дорівнює $\mathbf{R}_k$ і визначається якісними показниками каналу передачі інформації. Випадкові появи імпульсних перешкод в каналі спостережень призводять до втрати точності спостережень, що будемо враховувати, раптовим у першому наближенні, зростанням коваріаційної матриці шумів спостережень до величини $\sigma^2 \mathbf{R}_k$. Обмеження, накладені на послідовність $\square_k$ не порушують справедливості співвідношень (5) – (6). Це означає, що як

і раніше умовну густину розподілу ймовірностей $f[\mathbf{x}_k | \mathbf{Y}_{(k-1)}^m]$ можна представляти у вигляді зваженої суми, а статистична незалежність значень випадкової послідовності γ_k спрощує обчислення вагових множників $p[\gamma_k = i | \mathbf{Y}_{(k-1)}^m]$. Умовні густини розподілу ймовірностей, які входять до складу (5) в якості співмножників, є гаусовими з відповідними параметрами:

$$f[\mathbf{x}_{(k+1)} | \mathbf{Y}_k^m] = C_1 \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\mathbf{x}_{(k+1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}]^T \mathbf{P}_{(k+1|k)}^{-1} [\mathbf{x}_{(k+1)} - \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}] \right\}$$

$$f[\mathbf{y}_{(k+1)} | \mathbf{Y}_k^m, \mathbf{x}_{(k+1)}, \gamma_{(k+1)} = i] = C_2 \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\mathbf{y}_{(k+1)} - \mathbf{C}_{(k+1)} \mathbf{x}_{(k+1)}]^T \times \right.$$

$$\times [\gamma_{(k+1)}^2 \mathbf{R}_{(k+1)}]^{-1} [\mathbf{y}_{(k+1)} - \mathbf{C}_{(k+1)} \mathbf{x}_{(k+1)}] \left. \right\},$$

$$f[\mathbf{y}_{(k+1)} | \mathbf{Y}_k^m, \gamma_{(k+1)} = i] = C_3 \exp \left\{ -\frac{1}{2} [\mathbf{y}_{(k+1)} - \mathbf{C}_{(k+1)} \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}]^T \times \right.$$

$$\times [\mathbf{C}_{(k+1)} \mathbf{P}_{(k+1|k)} \mathbf{C}_{(k+1)}^T + \gamma_{(k+1)}^2 \mathbf{R}_{(k+1)}]^{-1} [\mathbf{y}_{(k+1)} - \mathbf{C}_{(k+1)} \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k)}] \left. \right\},$$

де C_1, C_2, C_3 – нормуючі множники.

Властивості нормального закону розподілу $f[\mathbf{x}_{(k+1)} | \mathbf{Y}_k^m, \gamma_{(k+1)} = i]$, дозволяють обчислювати його параметри: середнє значення $\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}$ та кореляційну матрицю $\mathbf{P}_{(k+1|k+1)}$ за допомогою модельно-умовного фільтра Калмана, внаслідок чого вираз для результуючої оцінки суттєво спрощується

$$\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}^\Sigma = \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}^1 P[\gamma_{(k+1)} = 1 | \mathbf{Y}_{(k+1)}^m] + \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}^\sigma P[\gamma_{(k+1)} = \sigma | \mathbf{Y}_{(k+1)}^m] \quad (7)$$

$$\mathbf{P}_{(k+1|k+1)}^\Sigma = \sum_{l=1}^{\sigma} \left\{ \mathbf{P}_{(k+1|k+1)}^l + [\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}^l - \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}] [\hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}^l - \hat{\mathbf{x}}_{(k+1|k+1)}]^T \right\} \times$$

$$\times P[\gamma_{(k+1)} = l | \mathbf{Y}_{(k+1)}^m]$$

Структурна синтезованого пристрою обробки телеметричних даних визначається виразом (7) і показана на рис. 1.

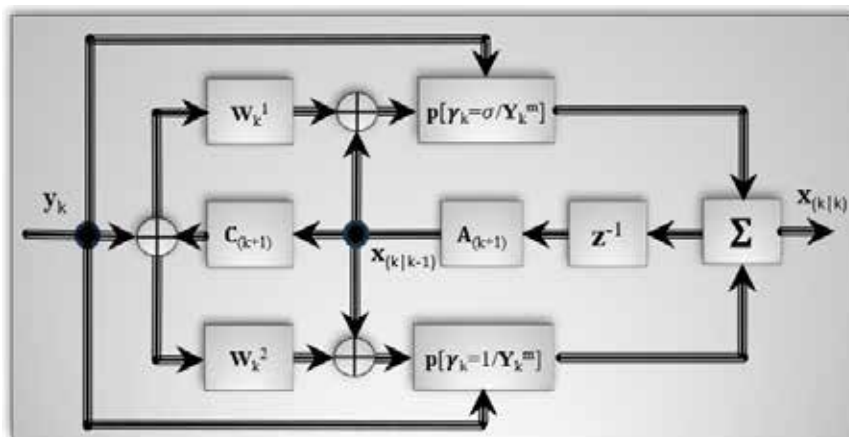


Рис. 1. Структурна схема пристрою обробки даних, стійкого до впливу ХПІ

Результати моделювання. На завершення, проведемо порівняльний аналіз ефективності розглянутих алгоритмів оцінювання, взявши за основу інформаційно – телеметричний канал висотної моделі аеродинамічного об'єкту на основі динамічної системи четвертого порядку. Враховуючи, що синтезовані пристрої мають якісні показники які залежать від результатів поточних спостережень, а інформаційне середовище, за фізичною природою, є стохастичним то у основу оцінювання ефективності доцільно покласти метод цифрового статистичного моделювання.

Модель динаміки вище згаданого об'єкту та рівняння спостережень в безперервному часі:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} h \\ v_h \\ \dot{v}_h \\ v_h'' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & T1 & T2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ v_h \\ \dot{v}_h \\ v_h'' \end{bmatrix} (t) + \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \xi(t); \quad y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} h \\ v_h \\ \dot{v}_h \\ v_h'' \end{bmatrix} (t) + \gamma_n \xi(t)$$

Константи T1 та T2 характеризують аеродинамічні властивості об'єкту спостереження і мають відповідні значення -1.1772, -1.0850. Інформаційна складова, що підлягає трансляції по телеметричному каналу являє собою дані сенсора висоти барометричного типу.

Еквівалентний запис для дискретного часу:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_{k+1} &= \mathbf{A}\mathbf{x}_k + \mathbf{Q}_k \\ \mathbf{y}_k &= \mathbf{C}\mathbf{x}_k + \gamma_k \mathbf{R}_k \end{aligned}$$

$$\text{де } \mathbf{A} = \begin{bmatrix} 1 & 3 \cdot 10^{-2} & 4 \cdot 10^{-4} & 0 \\ 0 & 1 & 3 \cdot 10^{-2} & 4 \cdot 10^{-4} \\ 0 & 0 & 9.9 \cdot 10^{-1} & 2.9 \cdot 10^{-2} \\ 0 & 0 & -3.47 \cdot 10^{-2} & 9.7 \cdot 10^{-1} \end{bmatrix}; \quad \mathbf{Q}_k = \text{diag} \begin{bmatrix} 10^{-5} & 1 \cdot 10^{-8} & 5 \cdot 10^{-8} & 3 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad \mathbf{R}_k = 1.4 \cdot 10^{-3}$$

Випадкова змінна γ_k яка моделює вплив ХІП на дані, що транслуються телеметричним каналом, являє собою нормально розподілену послідовність з параметрами $N(0; 8\mathbf{R}_k)$ і імовірністю появи завади $q = 0.05$. Інтервал дискретизації $\Delta T = 0.024 \text{ c}$, $k = 1 \dots N$, $N = 800$ – дискретна послідовність. Вектор початкового стану моделі динаміки:

$$\mathbf{x}_{00} = \begin{bmatrix} 1.0 & -0.375 & -0.375 & -0.001 \end{bmatrix}^T,$$

Початкові оцінки досліджуваних фільтрів:

$$\hat{\mathbf{x}}_{00} = \begin{bmatrix} 0.8 & -0.5 & 0.5 & -0.015 \end{bmatrix}^T$$

Кореляційними матрицями початкового стану:

$$\mathbf{P}_{00} = \text{diag} \begin{bmatrix} 0.1 & 0.01 & 0.001 & 1 \cdot 10^{-4} \end{bmatrix}.$$

Моделювання проводилося для двох випадків: в умовах нормального функціонування каналу повідомлень та для ситуації коли телеметричний канал знаходився під впливом діяння ХІП. Порівнянню підлягали стандартний фільтр Калмана (ФК), як пристрій де-факто для роботи в стандартних умовах та синтезований алгоритм псевдобайєсівського типу (PBF) з підвищеним захистом від впливу ХІП. Результати дослідження для випадку нормальних умов роботи наведені нижче.

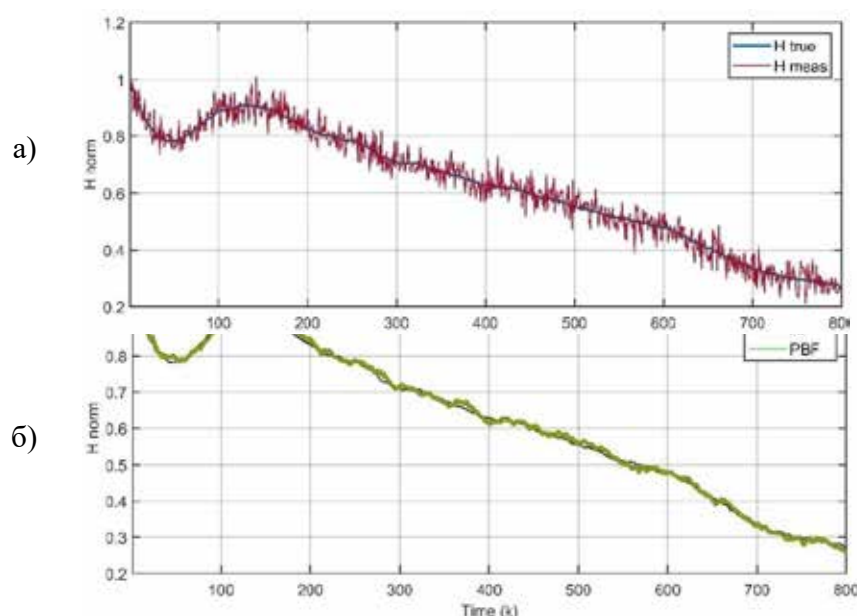


Рис. 2. Динаміка телеметрії (а); результат обробки даних фільтрами спостереження (б)

Для випадку відсутності додаткових завад обидва фільтри адекватно відстежують параметри інформаційного сигналу, мінімізуючи при цьому середньоквадратичну похибку оцінювання невідомого параметра. Оскільки більшість часу телеметричний канал працює в штатному режимі, а наявність ХІП в нормальних умовах є подією з досить малою ймовірністю цілком природньо, що за умови її відсутності синтезований PBF не повинен погіршувати параметри оцінювання порівняно з оптимальним FK. Ситуація кардинально змінюється коли на сигнал трансляції починає здійснювати вплив ХІП.

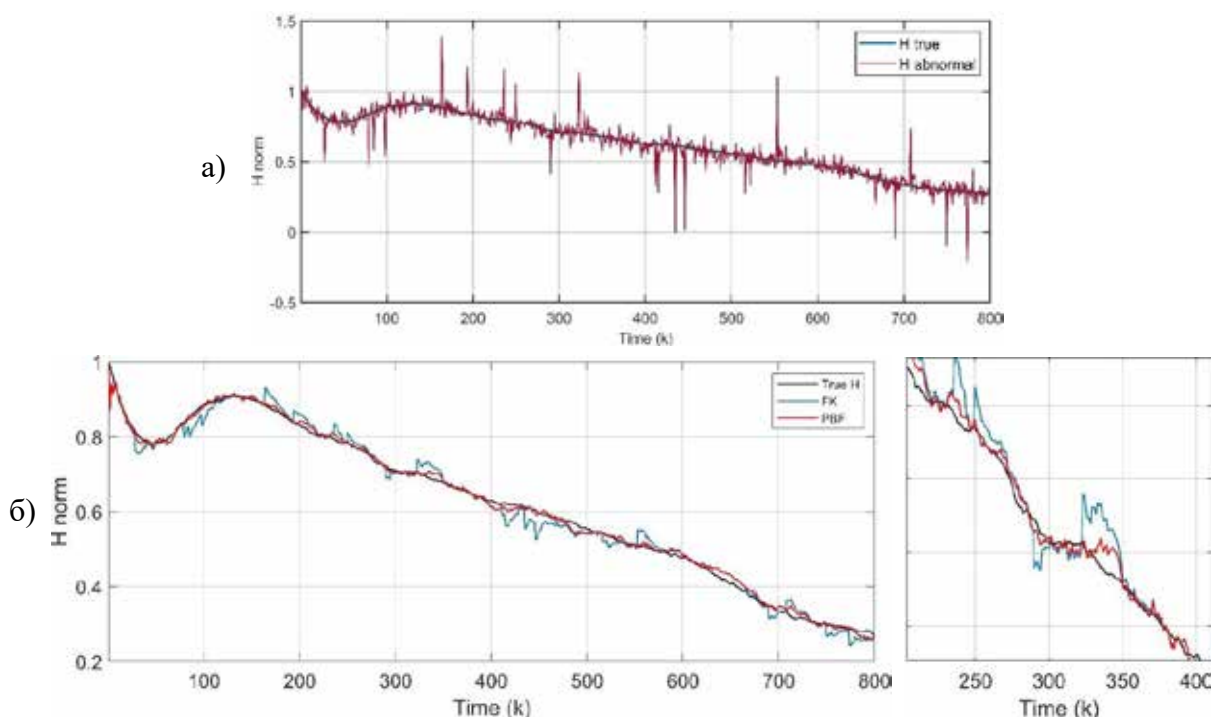


Рис. 3. Динаміка телеметрії при впливі ХІП (а); фільтрація спостереження (б)

По точності стандартний FK починає суттєво програвати псевдобайєсівському алгоритму в якому передбачений механізм оцінювання, що закладений в розрахунку апостеріорної ймовірності появи ХІП (Рис. 4) та пропорційно-ймовірнісному зважуванні вихідних оцінок (7).

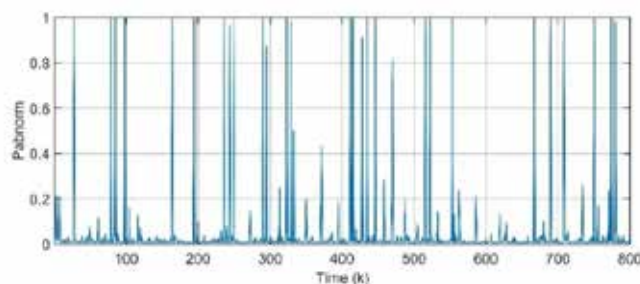


Рис. 4. Розрахункова апостеріорна ймовірність появи ХІП

Порівняння показників точності оцінювання синтезованого фільтру та його еталонного стандарту (фільтра Калмана) проведено на основі статистичного аналізу залишку, який утворюється, як різниця між еталонним телеметричним сигналом та оцінкою враженою ХІП отриманою за допомогою відповідних фільтрів. В ідеальному випадку отримана таким чином нев'язка повинна дорівнювати нулю. В реальності, його відмінність можна використати для оцінок відносної точності розглянутих алгоритмів. Правовою підставою для застосування запропонованого методу аналізу є припущення, що передбачене використання обома фільтрами випадкових компонент розподілених за нормальним законом, згідно граничної теореми, у кінцевому випадку, теж повинно привести до нормального розподілу утвореного різницевого сигналу. Візуалізація

різницеви́х залишків та їх статистичних характеристик у вигляді функцій щільності розподілу ймовірностей представлені на рис. 5.

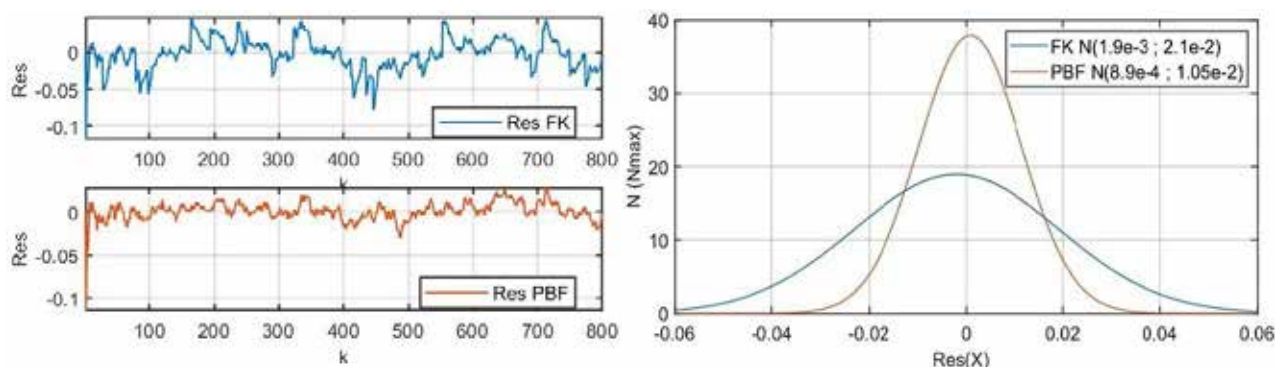


Рис. 5. Різнице́вий сигнал та його статистичні характеристики

Навіть візуально можливо побачити що різнице́вий сигнал FK є загубленим відповідно до сигнальної нев'язки PBF, що ще раз підкреслює неефективність застосування алгоритму фільтрації Калмана. Цього слід було і очікувати, тому що він не призначений для роботи в умовах апіорної невизначеності відносно стану каналу спостереження. Чисельні характеристики точності алгоритмів наведені в таблиці 1.

Таблиця 1

Результати статистичного аналізу залишків різницевого сигналу

Алгоритм фільтрації	Нормальний режим				Наявність ХІП			
	$M(x)$	$Var(x)$	$Var(x)_{min}$	$Var(x)_{max}$	$M(x)$	$Var(x)$	$Var(x)_{min}$	$Var(x)_{max}$
FK	$1.66 \cdot 10^{-3}$	$8.22 \cdot 10^{-3}$	$7.84 \cdot 10^{-3}$	$8.64 \cdot 10^{-3}$	$-1.94 \cdot 10^{-3}$	$21.1 \cdot 10^{-3}$	$20.05 \cdot 10^{-3}$	$22.1 \cdot 10^{-3}$
PBF	$1.58 \cdot 10^{-3}$	$8.22 \cdot 10^{-3}$	$7.83 \cdot 10^{-3}$	$8.64 \cdot 10^{-3}$	$0.78 \cdot 10^{-3}$	$10.4 \cdot 10^{-3}$	$9.96 \cdot 10^{-3}$	$10.98 \cdot 10^{-3}$

Дані, наведені в табл. 1, підтверджують той факт, що в нормальних умовах роботи якість оцінювання синтезованого PBF не поступається еталонному FK, а у випадку наявності ХІП, точність псевдобайєсівських оцінок, як мінімум в два рази перевищує відповідні оцінки стандартного FK. Наявність систематичної складової у вихідних оцінках як FK так і PBF є наслідком розбіжності в значеннях початкового стану моделі динаміки та початкових оцінок досліджуваних фільтрів, що беззаперечно відбивається на різнице́вому сигналі. Оскільки приклад моделювання носить суто демонстраційний характер, а метою проведеного статистичного аналізу є відносне порівняння точності розглянутих алгоритмів питання репрезентабільності вибірок залишилося по заувагою.

Висновки. За результатами представленої роботи можна стверджувати, що в умовах наявності ХІП, синтезований алгоритм PBF суттєво покращує точність отриманих оцінок водночас не погіршуючи роботу телеметричного каналу при стандартних зовнішніх факторах.

Результати порівняльного аналізу дали змогу підтвердити ефективність запропонованих процедур оцінювання з точки зору підвищеної стійкості до діяння хаотично – імпульсних перешкод з відносно помірним ускладненням структури синтезованого алгоритму, а відповідно і додатковим обчислювальним навантаженням.

У разі повної відсутності апіорних даних щодо ймовірності появи аномалій доцільним буде перехід до адаптивних схем оцінювання.

Список використаних джерел:

1. Wang W., Zhang Y., Wang X., Xu H., Tian H. Design of Reconfigurable Real-Time Telemetry Monitoring and Quantitative Management System for Remote Sensing Satellite in Orbit. *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*. 2018. P. 1293–1297. doi:10.1109/IAEAC.2018.8577765
2. Konyha J. Off-grid telemetry system for hydrate inhibition on gas wells. *Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Hungary: Szilvasvarad. 2015. P. 220–223.
3. Rice M., A. Davis A., Bettweiser C. Wideband channel model for aeronautical telemetry. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. 2004. Vol. 40(1). P. 57–69. doi: 10.1109/TAES.2004.1292142.
4. Ban H., Peng T., Lin D. A Novel Channel Estimation Method for UAV in High-Capacity CDMA Network. *IEEE 6th International Conference on Computer and Communications*. 2020. P. 1-7. doi:10.1109/ICCC51575.2020.9345055.

-
5. Elbashir A., Sayar A. A Redundant Telemetry Link System for Uncrewed Aerial Vehicles. *Engineering, Environmental Science*. Published in Scalable Computing, 2024. Vol. 25(6). P. 5714–5721. doi:10.12694/scpe.v25i6.2602.
 6. Carden F., Henry R., Jedlicka R. *Telemetry Systems Engineering*. Boston: Artech House, 2002. 628 p.
 7. Webster J.G. *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press, 1999. 2487 p.
 8. Giri D. V., Tesche F. M. Classification of intentional electromagnetic environments (IEME). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 2004. Vol. 46(3). P. 322–328. doi: 10.1109/TEMPC.2004.831819.
 9. Tcheumeleu R.T., Pouhed D. Analysis of methods for classification of intentional electromagnetic environments. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2015. P. 1385–1388.
 10. Sabath F. System oriented view on High-Power Electromagnetic (HPEM) Effects and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *Conference: General Assembly of the URSI*, 2008. Vol. 29. P. 381–385.
 11. Sabath F. Classification of Electromagnetic Effects at System Level. *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9*. Springer: 2010. P. 325–333.
 12. Yang D., Y. H., Kollman R. Analysis of High-Power RF Interference on Digital Circuits. *Electromagnetics*, 2006. Vol. 26(1). P. 87–102.
 13. Lawrence R., Kaufman H. The Kalman Filter for the Equalization of a Digital Communications Channel. *IEEE Transactions on Communication Technolog.* 1971. Vol. 19(6). P. 1137–1141. doi:10.1109/TCOM.1971.1090786.
 14. Rice M., Satorius E. Equalization Techniques for Multipath Mitigation in Aeronautical Telemetry. *Proc. of IEEE Military Communications Conference*, 2004. P. 65-70. doi: 10.1109/MILCOM.2004.1493248.
 15. Williams I., Saquib M. Analysis of Performance Limitations with Linear Adaptive Equalizers for Aeronautical Telemetry Applications. *Proc. of The European Telemetry Conferenc.* 2010. P. 120-126.
 16. Dalle Mese E., Corsini G. Adaptive Kalman filter equalizer. *Publication: Electronics Letters*, 1980. 16(14). <https://doi.org/10.1049/el:19800381>
 17. Shmaliy Y. S., Zhao S. Optimal and Robust State Estimation Finite Impulse Response (FIR) and Kalman Approaches. *Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.* 2022. 460p
 18. McGuire M., Simaю M. Low-order Kalman filters for channel estimation. *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processin.* 2005. P. 352–355. doi:10.1109/PACRIM.2005.1517298.
 19. Volovyk A., Kychak V. Detection Filter Method in Diagnostic Problems for Linear Dynamic Systems. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparobuduvannia*, 2021. Vol. 84. P. 30–39. doi:10.20535/RADAP.2021.84.30-39.
 20. Volovyk A. Yu., Kychak V. M., Havrilov D.V. Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. *Acta Polytechnica Hungarica*, 2021. Vol. 18(10). P. 21–41. doi:10.12700/APH.18.10.2021.10.2.
 21. Wang X, Zhu F. Robust recursive estimation for the errors-in-variables nonlinear systems with impulsive noise. *Sci Rep.* 2025. Vol. 15(1). 6031. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89969-z>.
 22. Кичак В. М. Методи та пристрої обробки радіосигналів бортових авіаційних систем посадки / В. М. Кичак, Ю. М. Воловик, А. Ю. Воловик.– Вінниця: ВНТУ, 2011. – 208. с.

References:

1. Wang W., Zhang Y., Wang X., Xu H., Tian H. (2018). Design of Reconfigurable Real-Time Telemetry Monitoring and Quantitative Management System for Remote Sensing Satellite in Orbit. *IEEE 3rd Advanced Information Technology, Electronic and Automation Control Conference (IAEAC)*, 1293-1297. doi:10.1109/IAEAC.2018.8577765
2. Konyha J. (2015). Off-grid telemetry system for hydrate inhibition on gas wells. *Proceedings of the 2015 16th International Carpathian Control Conference (ICCC)*, Szilvasvarad, Hungary, 220-223.
3. Rice M., Davis A., Bettweiser C. (2004). Wideband channel model for aeronautical telemetry. *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, 40(1), 57-69. doi: 10.1109/TAES.2004.1292142.
4. Ban H., Peng T., Lin D. (2020). A Novel Channel Estimation Method for UAV in High-Capacity CDMA Network. *IEEE 6th International Conference on Computer and Communications*, 1-7. doi:10.1109/ICCC51575.2020.9345055.
5. Elbashir A., Sayar A., Redundant A. (2024). Telemetry Link System for Uncrewed Aerial Vehicles. *Engineering, Environmental Science*. Published in Scalable Computing, 25(6), 5714-5721. doi:10.12694/scpe.v25i6.2602
6. Carden, F., Henry, R. & Jedlicka, R. (2002). *Telemetry Systems Engineering*. Boston: Artech House, 628 p.
7. Webster, J.G. (1999). *Measurement, Instrumentation, and Sensors Handbook*. CRC Press: 2487 p.
8. Giri D. V., Tesche F. M. (2004). Classification of intentional electromagnetic environments (IEME). *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, 46(3), 322-328. doi: 10.1109/TEMPC.2004.831819.
9. Tcheumeleu R. T., Pouhed D. (2015). Analysis of methods for classification of intentional electromagnetic environments. *International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, 2015, pp. 1385-1388.

-
10. Sabath F. (2008). System oriented view on High-Power Electromagnetic (HPEM) Effects and Intentional Electromagnetic Interference (IEMI). *Conference: General Assembly of the URSI*, 29, 381-385.
 11. Sabath F. (2010). Classification of Electromagnetic Effects at System Level. *Ultra-Wideband, Short Pulse Electromagnetics 9*. Springer: 325–333.
 12. Yang D., Y. H., Kollman R. (2006). Analysis of High-Power RF Interference on Digital Circuits. *Electromagnetics*, 26(1), 87–102.
 13. Lawrence R., Kaufman H. (1971). The Kalman Filter for the Equalization of a Digital Communications Channel. *IEEE Transactions on Communication Technology*, 19(6), 1137-1141. doi:10.1109/TCOM.1971.1090786.
 14. Rice M., Satorius E. (2004). Equalization Techniques for Multipath Mitigation in Aeronautical Telemetry. *Proc. of IEEE Military Communications Conference*, 65-70. doi: 10.1109/MILCOM.2004.1493248.
 15. Williams I., Saquib M. (2010). Analysis of Performance Limitations with Linear Adaptive Equalizers for Aeronautical Telemetry Applications. *Proc. of The European Telemetry Conference*, 120-126.
 16. Dalle Mese E., G. Corsini G. (1980). Adaptive Kalman filter equaliser. *Publication: Electronics Letters*, 16(14). <https://doi.org/10.1049/el:19800381>.
 17. Shmaliy, Y. S., Zhao, S. (2022). *Optimal and Robust State Estimation Finite Impulse Response (FIR) and Kalman Approaches*. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 460.p
 18. McGuire M., Simão M. (2005). Low-order Kalman filters for channel estimation. *IEEE Pacific Rim Conference on Communications, Computers and signal Processing*, 352-355. doi: 10.1109/PACRIM.2005.1517298.
 19. Volovyk A., Kychak V. (2021). Detection Filter Method in Diagnostic Problems for Linear Dynamic Systems. *Visnyk NTUU KPI Seriia – Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. 84. 30–39. doi: 10.20535/RADAP.2021.84.30-39.
 20. Volovyk A.Yu., Kychak V.M., Havrilov D.V. (2021) Discrete Kalman Filter Invariant to Perturbations. *Acta Polytechnica Hungarica*, 18(10), 21-41. doi:10.12700/APH.18.10.2021.10.2.
 21. Wang X, Zhu F. (2025). Robust recursive estimation for the errors-in-variables nonlinear systems with impulsive noise. *Sci Rep*. 15(1), 6031. <https://doi.org/10.1038/s41598-025-89969-z>.
 22. Kychak V. M., Volovyk Yu. M. & Volovyk A. Iu. (2011). Metody ta prystroi obrobky radiosyhnaliv bortovykh aviatsiinykh system posadky. Vinnytsia: VNTU. 208. s.[In Ukrainian]

Semenov A. O., Doctor of Technical Sciences, Professor Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0000-0001-9580-6602

Khloba A. A., Postgraduate student Department of Information Radioelectronic Technologies and Systems
Vinnytsia National Technical University
ORCID: 0009-0007-6743-2456

CONTROL DEVICES FOR PROJECTION REFLECTIONS IN THE PHASE SPACE OF STRANGE ATTRACTORS OF DYNAMIC CHAOS GENERATORS

One of the ways to experimentally test the proposed mathematical models that exhibit the properties of deterministic chaos is to implement them using «analog computers». Depending on the dimensionality of the system, three or more signals are obtained, the spectrum of which can be analyzed. However, the most obvious evidence of chaotic behavior is strange attractors. A two-dimensional version of attractors is obtained by applying two signals to an oscilloscope that is switched to the X-Y mode. In this way, three projections are obtained, although the minimum dimensionality of the system implies that the object is three-dimensional. There are digital ways of displaying strange attractors in 3D using special consoles; they are connected to the system under study and to a personal computer. The greater the accuracy of such a set-top box, the higher its cost. However, it is possible to implement the display of a strange attractor on the oscilloscope screen in pseudo-3D using simple mathematical operations. With this approach, no information is lost during signal processing, and the cost of the device is lower. The structure of the object of study can be compared to a mathematical simulation by rotating it in phase space immediately after connecting three signals to the console, without additional programs. The basic mathematical operations are realized with the help of operational amplifiers, inverters, analog multipliers, and sin/cos potentiometer analogs. The article is devoted to a number of devices-attachments to the oscilloscope that make it possible to rotate strange attractors in pseudo 3D along two or three axes. The presented works contain device schematics and the necessary information for independent implementation. These studies demonstrate the sequence of development of the idea, the gradual departure from the analog sin/cos potentiometer to its digital counterparts, and the expansion of the rotation range from 90 to 360 degrees. The possibility of drawing a sectional plane along one of the axes and obtaining a Poincaré section is controlled. The main structural elements of the devices are defined, and the operation of some of them is briefly described. For a better understanding of the operation of such devices, images illustrating rotations in phase space are shown. A certain number of images were converted from black and white to color and further processed. The prospective development of such devices has been determined.

Key words: dynamic chaos, attractor, generator, Poincaré section, phase plane, device, signal, mathematical model.

Семенов А. О., Хлюба А. А. Пристрої керування відображеннями проєкцій у фазовому просторі дивних атракторів генераторів динамічного хаосу

Одним з способів експериментальної перевірки запропонованих математичних моделей, які проявляють властивості динамічного хаосу, є реалізація їх за допомогою «аналогових комп'ютерів». В залежності від розмірності системи отримують три та більше сигналів, спектр яких можна проаналізувати. Але найбільш наглядним доказом хаотичної поведінки є дивні аттрактори. Двовимірну версію аттракторів отримують шляхом подачі двох сигналів на осцилограф, який переведений в режим X-Y. Таким чином отримують три проєкції, хоча мінімальна розмірність системи передбачає, що об'єкт тривимірний. Існують цифрові способи відображення дивних аттракторів в 3D за допомогою спеціальних приставок, вони підключаються до досліджуваної системи і до персонального комп'ютера. Чим більша точність такої приставки тим більша її вартість. Однак наявна можливість за допомогою простих математичних операцій реалізувати відображення дивного аттрактору на екрані осцилографа у псевдо 3D. При такому підході не втрачається інформація при обробці сигналу, вартість приладу менша. Структуру об'єкта дослідження можна порівняти з математичною симуляцією обертаючи його в фазовому просторі відразу після підключення трьох сигналів до приставки, без додаткових програм. Основні математичні операції реалізуються за допомогою операційних підсилювачів, інверторів, аналогових помножувачів і аналогів sin/cos потенціометра. Стаття присвячена ряду пристроїв-приставок до осцилографу які дають можливість обертати дивні аттрактори в псевдо 3D по двох, або трьом осям. У наведених роботах наявні схеми приладів і необхідна інформація для самостійної реалізації. Приведені дослідження

демонструють послідовність розвитку ідеї, поступовий відхід від аналогового $\sin/\cos$ потенціометра до його цифрових аналогів, розширення діапазону обертання від 90 до 360 градусів. Керована можливість проведення площині перерізу по одній з осей і отримання перетину Пуанкаре. Визначено основні структурні елементи приладів, коротко описано роботу деяких з них. Для кращого розуміння роботи таких пристроїв наведені зображення які ілюструють повороти у фазовому просторі. Певна кількість зображень була перетворена з чорно білих на кольорові і додатково опрацьовано. З'ясовано перспективний розвиток таких приладів.

Ключові слова: динамічний хаос, атрактор, генератор, перетин Пуанкаре, фазова площина, пристрій, сигнал, математична модель.

Formulation of the problem. The study and search for new mathematical models exhibiting the properties of dynamic chaos are often carried out not only with the help of specialized software but also by creating real prototypes of the proposed models. They can be carried out by a set of discrete elements, analog computer (operational amplifiers, analog multipliers, logic elements – carrying out mathematical operations) or with the help of programmable gate arrays (FPGA). Often the papers compare the results of: numerical modeling; simulation (PSpice, MultiSIM, OrCAD); and the characteristics of a real prototype. In case of exclusively software implementation and simplification of the mathematical model, strong discrepancies with the more real case are possible [1], a large number of differences in the software and real implementation can be found in [2] when considering strange attractors. The structure of such objects is given in 3D exclusively in the software realization, and when modulating in the simulator or on the oscilloscope screen exclusively in the X-Y mode, less often in the X-Y-Z mode. The researcher is limited to three options for displaying the strange attractor (X-Y, Y-Z, X-Z), choosing two signals from the electronic realization of the system of equations under study. This, in the case of a simple attractor shape, is sufficient for perception and comparison with the software version. However, this approach does not give an idea of depth and causes difficulties in studying the structure in the case of attractors of complex shapes [3-5].

Analysis of recent research and publications. The development of semiconductors has made operational amplifiers, various logic elements, as well as microcontrollers, FPGAs, and the development of programmable analog arrays (FPAA) [6] very accessible. The realization of dynamic chaos generators solely on discrete elements is becoming less common. Often the developed systems are tested in practice using an analog computer [2, 6]. The approach to the synthesis of such systems is reviewed in [7], the synthesis of individual elements to create nonlinear circuits is described in detail. A modular construction system as a tool for teaching problems is tested in [8], the combination of modules allows generating more than 30 strange attractors. Another paper proposes a simple and flexible analog computer for the study of linear and nonlinear systems [9]. The design of electrical circuits based on differential equations, synchronization and the use of FPAA is devoted to [10]. A hybrid analog computer capable of modeling systems up to fourth order is proposed in [11], all necessary information for its replication is available. A detailed guide to the application and use of such systems is described in [12], historically the development is given in [13]. Modern commercial versions of analog computers are proposed in [14, 15]. The implementation of the circuit using FPGA is discussed in [16]. The paper describes a way to rotate the attractor in 2D as part of an implementation on an FPGA, it is assumed that the parameter φ can be used as an additional parameter for information encoding. A development of the work is [17], now the rotation is possible in 3D using the developed algorithm CORDIC (Coordinate Rotation Digital Computer), which performs calculations of sine and cosine functions, for systems with fractional order. Realization of both works is carried out on FPGA and part of information is lost due to transformations on DAC and ADC. Also used expensive FPGA – Artix-7 XC7A100T, so this method is not universal for the study of the structure of attractors of complex shapes [18, 19].

The above-mentioned robots allow to realize the system of equations in the form of an electric circuit and display a strange attractor on the oscilloscope screen in X-Y mode. However, in none of the reviewed works, as well as numerous works devoted to the study of dynamic chaos generators, no application or description was found, as separate and universal, of devices that allow to consider strange attractors in pseudo 3D and with the ability to rotate them in phase space.

The purpose of the article. Consideration of existing methods of visualization of 3-dimensional signals using oscilloscope in X-Y mode, i.e. conversion of signals of 3D objects into pseudo 3D by displaying them on 2D oscilloscope screen. Providing some found works devoted to such devices, variants of their practical realization and use. Identification of key structural elements of such devices and prospects for further development.

Presenting main material. Rotation matrices are used to rotate a three-dimensional image by an angle φ in the Cartesian coordinate system. By multiplying the original point coordinates with one of the orthogonal matrices, new point coordinates are obtained. Rotation matrices and coordinates of points in rotation along one of the axes can be written as specified in (1). In the case of sequential rotation along two axes, the coordinates obtained at the first step are multiplied with another rotation matrix.

$$\begin{aligned}
M_x(\varphi) &= \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \varphi & -\sin \varphi \\ 0 & \sin \varphi & \cos \varphi \end{pmatrix}; M_x(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' = x \\ y' = y \cdot \cos(\varphi) + z \cdot \sin(\varphi) \\ z' = -y \cdot \sin(\varphi) + z \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} \\
M_y(\varphi) &= \begin{pmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{pmatrix}; M_y(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' = x \cdot \cos(\varphi) + z \cdot \sin(\varphi) \\ y' = y \\ z' = -x \cdot \sin(\varphi) + z \cdot \cos(\varphi) \end{bmatrix} \\
M_z(\varphi) &= \begin{pmatrix} \cos \varphi & -\sin \varphi & 0 \\ \sin \varphi & \cos \varphi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}; M_z(\varphi) \cdot \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x' = x \cdot \cos(\varphi) - y \cdot \sin(\varphi) \\ y' = -x \cdot \sin(\varphi) + y \cdot \cos(\varphi) \\ z' = z \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{1}$$

where $M_n(\varphi)$ – rotation matrix along one of the axes; x, y, z – coordinates of the initial point; x', y', z' – coordinates of the point rotated by some angle φ .

An example of such an approach is described in [20, p. 127]. There are several ways to perform the above transformations, in the considered work are used already practically unavailable sin/cos potentiometer (another possible option is a resolver), a simplified scheme is shown in Figure 1. To perform the operations and obtain the required sign, an inverter (to obtain $-z \sin(\varphi)$) and two adders are used. Points A, B, C, D are the sin/cos leads of the potentiometer from which are taken: $z \cos(\varphi)$, $x \cos(\varphi)$, $x \sin(\varphi)$, $z \sin(\varphi)$. The case mentioned in the paper illustrates two consecutive rotations, along the Y-axis, then X'. The third obtained signal Z'' can be fed to the Z input of an oscilloscope (if available), thereby adjusting the luminance of the outlying areas. The rotation angle of the above circuit is limited to 90 degrees due to a design feature of the potentiometer.

A later work [21] also uses a sin/cos potentiometer, but to rotate the 2D image, but the input signal is not fed directly to the potentiometer, but to 4 analog multipliers, the sin/cos signal is taken from the potentiometer (or it is possible to feed signals from an external oscillator bypassing the element). Improvements to this circuit are presented in [22], it consists in reducing the noise affecting the stability of the output signal. For this purpose, the authors replace the sin/cos potentiometer with a “resistive ladder” and 4 computer-controlled multiplexers, inverters and 4 buffers.

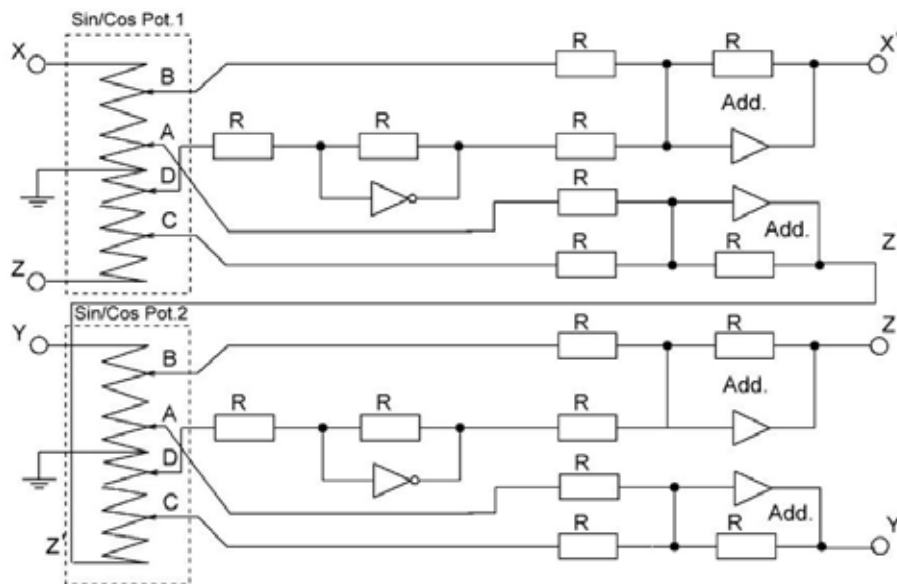


Fig. 1 Schematic diagram of the image rotation attachment based on sin/cos potentiometer in series on two axes

Thus, the circuit allows to rotate the 2D image with a step of 15 degrees (7 gradations within the first quadrant). After buffering, the summation of signals takes place at the differential inputs of the display, or, in the absence of such inputs, in the case of an oscilloscope, adders are added before the buffers. Rotation by 360 degrees is possible by supplying the opposite end of the “resistive ladder” with an anti-phase signal ($-X$, $-Y$). A different scheme is proposed in [23], the sin/cos potentiometer is replaced by a pair of EPROMs and a set of multiplying DACs to which the X, Y lines are also connected. The adjustment is done with a conventional potentiometer and ADC (controls the

EPROM pair), the rotation step is about 0.35 degrees (256 bits provide 90 degrees rotation). Two polarities of the signal ($-\sin(x)$, $-\cos(x)$) are provided by inverters, then through multiplexers the received signal is mixed and fed to the buffer from which X' , Y' are taken. The considered works cannot be directly used for rotation of strange attractors in 2D since the proposed schemes are designed for specific specific purposes (study of visual stimuli; rotation of an image obtained from an electron microscope). However, they demonstrate a tendency to replace sin/cos potentiometer with its digital analogs and basic blocks for performing mathematical operations using an analog computer.

Mention of further development can be found in [24], a number of methods for the study of nonlinear dynamics are given, including the work of [25]. It describes a multifunctional analog device that allows: to rotate strange attractors in pseudo-3D by 360 degrees relative to any axis continuously or manually; to perform a plane section in phase space along one of the axes; to display the upper or lower part of the split attractor; to display a Poincaré section along one of the axes by controlling the position of the section surface, and it is possible to display the “first return” in the forward and backward directions. The grid of dots indicates the reference plane (X - Y plane is accepted) for better understanding of the relative position of the projection plane. The limitation of the device is the frequency range from 0 to 20 kHz, but by replacing the microcircuits with higher-frequency ones it is possible to extend the specified range. For a more visual explanation are given the figures from this work (Figure 2, 3), they were converted from black and white to color with the help of visual-paradigm service.

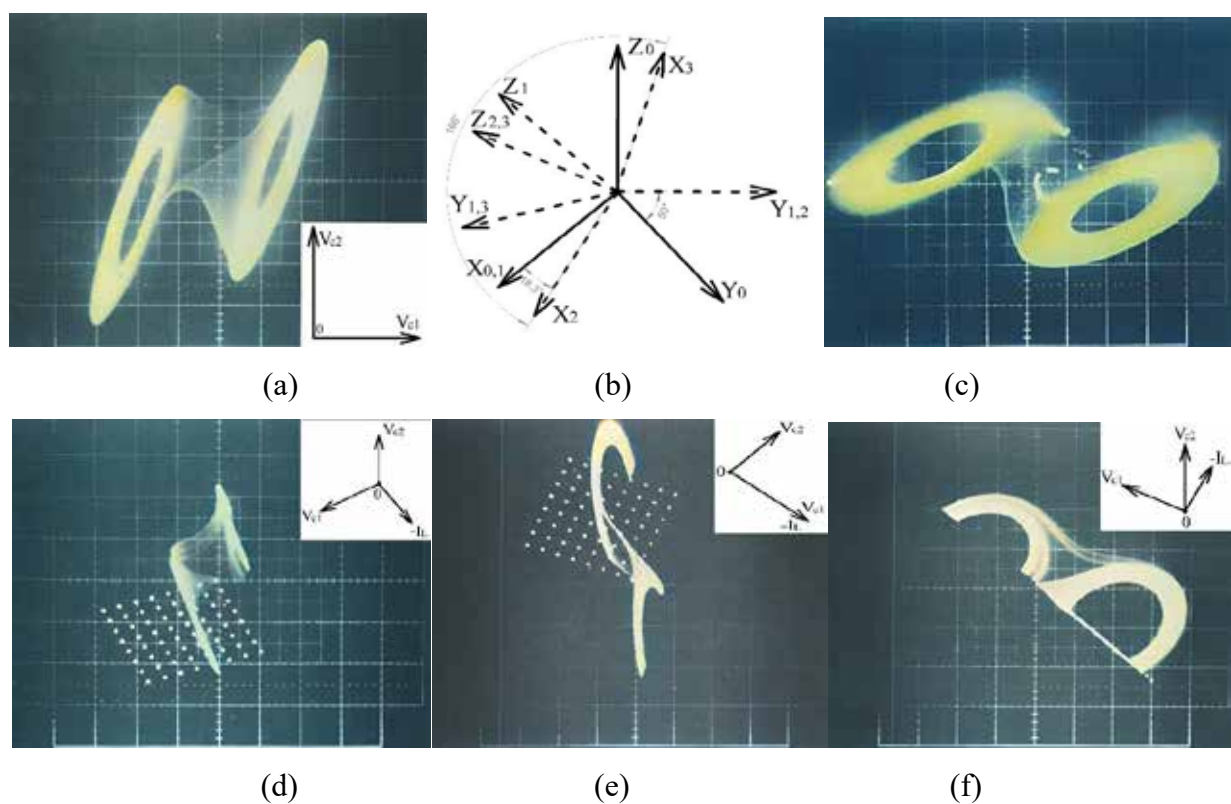


Fig. 2. Projections on the plane V_{c1} - V_{c2} (a), three-axis rotation (b), rotation by some degree, projection to X_0 - Y_0 (c), top part of the attractor (a) when rotated by angles (b) at different projections (d-f) [25]

The planes on which the attractor projections fall have been added to each figure. In the case of (d-f) the position of the reference plane is indicated. The figures show a strange attractor, the signals for which are obtained from the Chua scheme [26]. The Figure 2 show the following: (a) – projection of the strange attractor on the plane V_{c1} - V_{c2} without rotation; (b) – explanation of rotation in two-dimensional space, where numbers in axis indices indicate the order of rotation with respect to axes by angles $-\varphi_x(50.6)$, $-\varphi_y(18.3)$, $\varphi_z(166)$; (c) – rotated attractor, projection on the plane X_0 - Y_0 , rotation angles are not specified in the work; (d-f) – upper part of the rotated attractor by angles (b) and its projections on the planes X_0 - Y_0 , X_0 - Z_0 и Z_0 - Y_0 .

Figure 3 show the following: (a) – Projection of the attractor on the plane $(-I_L)$ - V_{c1} , three planes of cross sections S1-S3 in phase space are shown in red color; (b-d) Poincaré cross section in forward and backward directions, trajectory directions are indicated by the red arrow (the instrument can display either or both); (e-f) – The attractor is rotated to $\varphi_z(56.3)$, is the map of the first return in the forward direction, projected on the plane X_0 - Y_0 . The extended structural diagram of the device is shown in Figure 4.

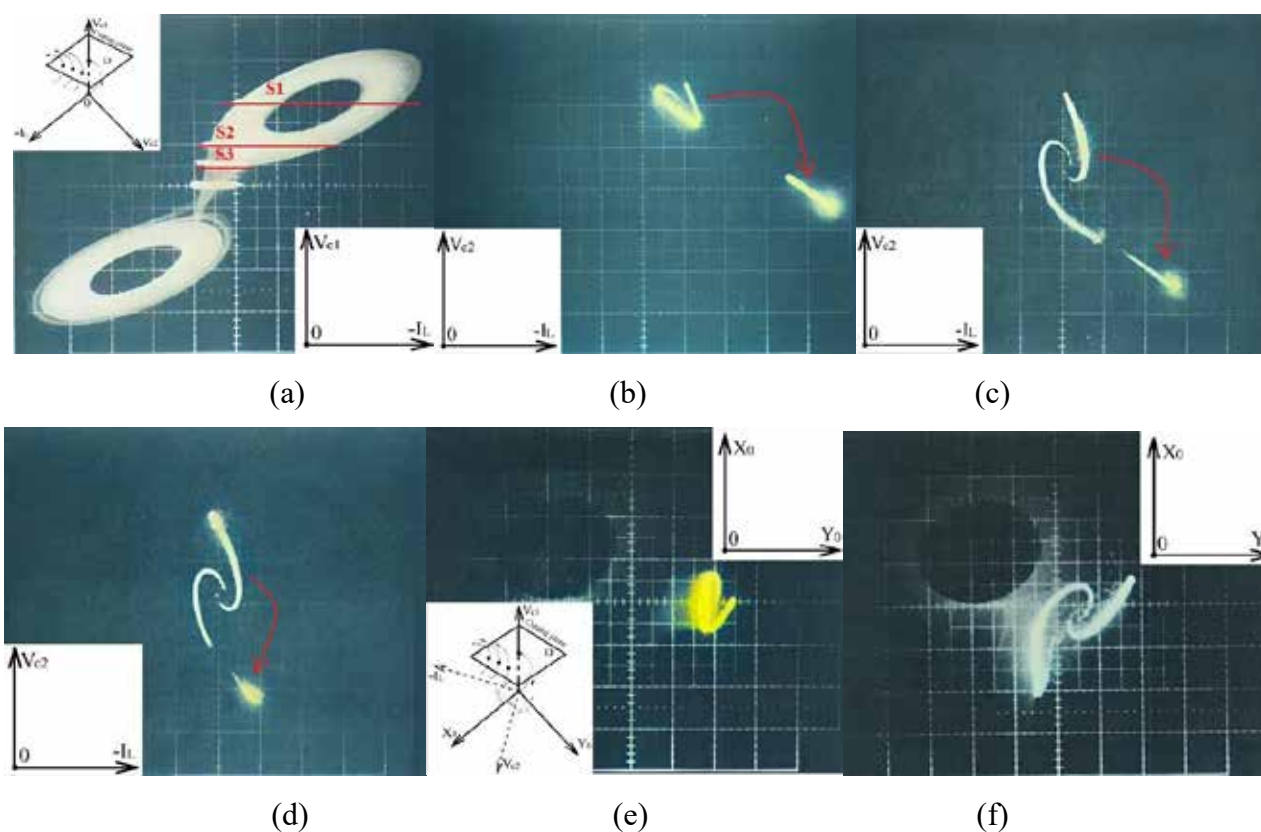


Fig. 3. Projection of an unrotated attractor in the plane $(-I_L)-V_{cl}$ (a), cross sections in the phase plane S1-S3 (b-d), rotated attractor (a) and cross-sections in the phase plane S1-S2 (e-f) [25]

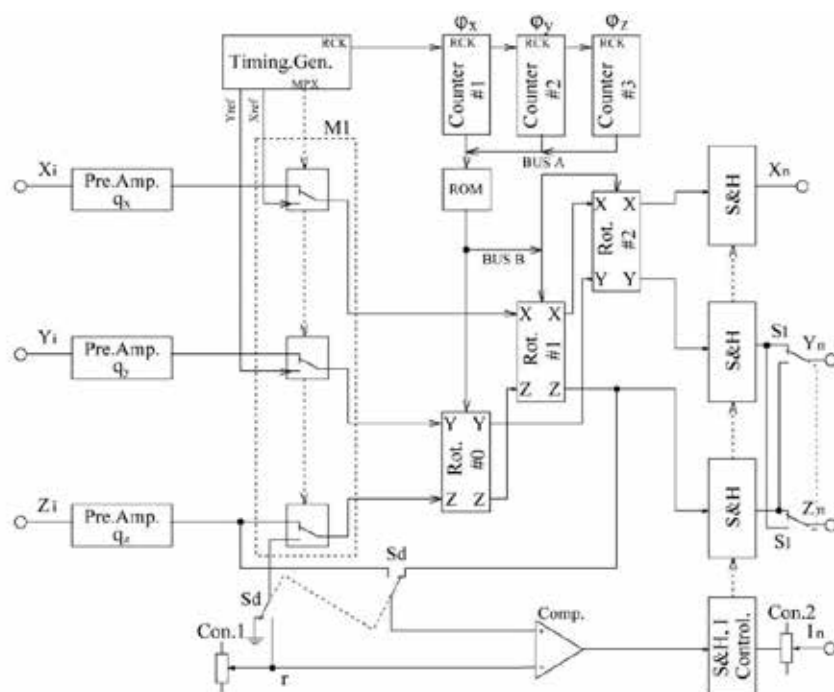


Fig. 4. Structural diagram of the device for rotation and section creation [25]

The (Pre.Amp.) blocks provide pre-scaling of the input signal. Block (Timing.Gen.) and multiplexer (M1) provide continuous rotation or manual input of the rotation angle, in the proposed design the input is provided by

dialing a binary number from 0 to 512 using latching buttons, step 0.7 degrees (in [23] the input was performed with a smaller step, but with less control). Three blocks (Counter) are required to perform continuous rotation and angle control, if it is not required can be replaced by a switch. Through the data buses (Bus A, B) information about the selected angle is entered into the ROM, coefficients from it into the unit of rotation operation. Three two-dimensional rotation devices (Rot. 0-1) and a permanent memory device (ROM) are used, the principle is similar to [23]. At the output there are 4 sampling and storage units (S&H), comparator (Comp.), which allows to realize the display of Poincaré section, upper or lower part of the attractor relative to the section plane (control is conventionally designated as potentiometer Con.2). The set reference signal (r) controls the distance from the selected plane (conventionally labeled as potentiometer Con.1) to the section surface. This mode is enabled by the switch (Sd), change of the projection plane by the switch (S1). A more detailed explanation with many examples and a complete schematic diagram with element ratings and additional information for making the device can be found in [25]. A simpler device, but based on a modern element base, is given in [27]. The appearance of the device is shown in Figure 5 (a), the demonstration of the rotation of the attractor obtained by realizing the Lorentz system by different angles is shown in Figure 5 (b-i) [28].

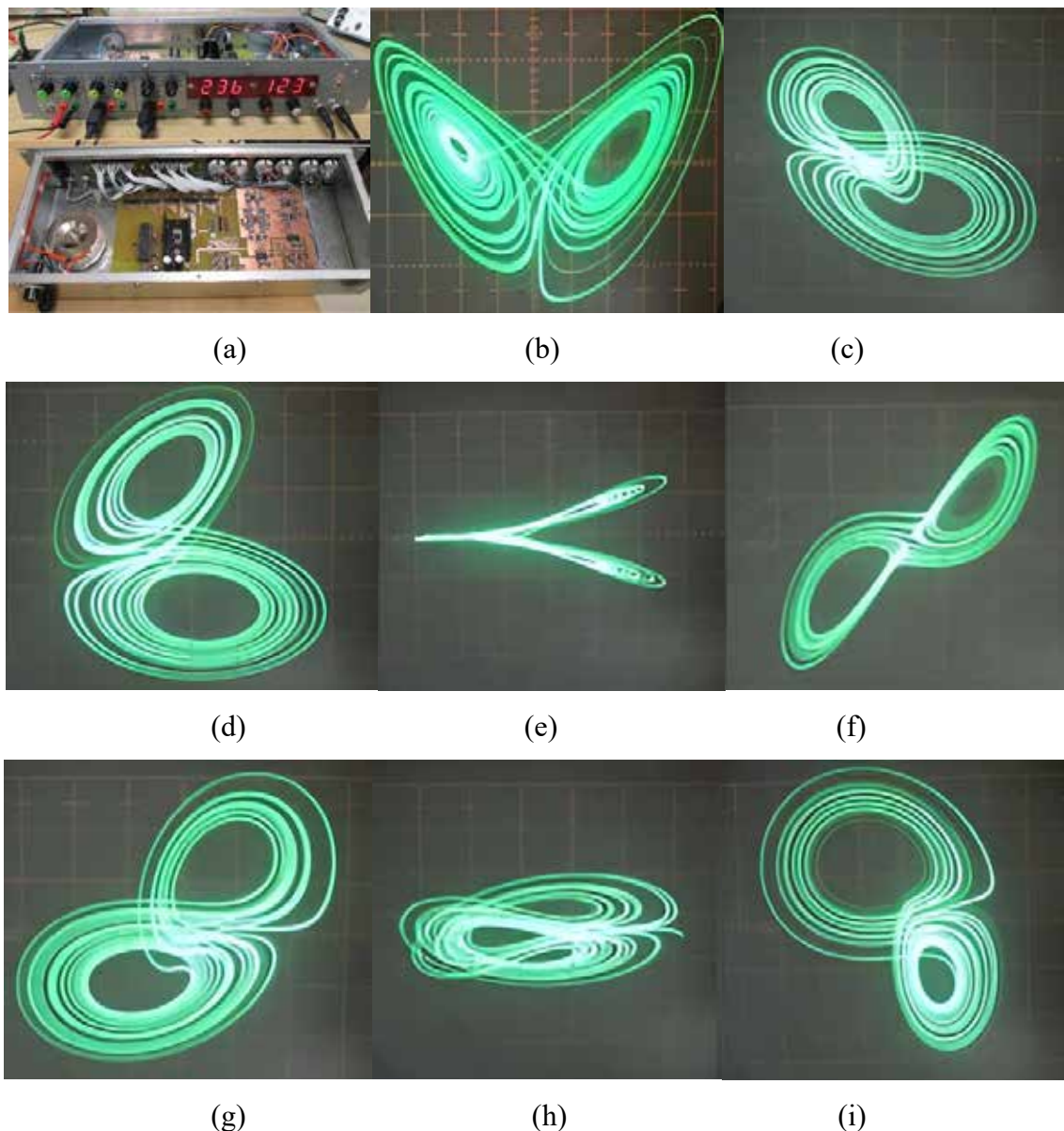


Fig. 5. Prototype device pseudo 3D rotation (a), strange atractor at different angles (b-i) [28]

The device is only used to rotate the attractor, in two axes. The rotation is available for 360 degrees. The principle of operation is similar to the works [23, 25]. The device can be divided into the following blocks: signal pre-scaling; rotation angle adjustment; rotation angle expander up to 360 degrees; analog computer to perform

mathematical operations; rotation angle indication and generation of control signals. Replacing the ROM with a PIC16F874 microcontroller made it possible to add the indication of the rotation angle for two axes on LED indicators. It also, together with the two digital potentiometers, performs the function of sin/cos potentiometer. Similarly, together with the inverting stages, it provides an extension of the swing angle range up to 2π . The rotation step is 1 degree, and the control is realized on two potentiometers, coarse and fine, for each of the two axes. The frequency range is limited to 20 kHz, but can be extended by replacing the element base. Even greater demonstration can be achieved using stereoscopy methods, which can be used to a greater extent in laboratory work, such methods are described in detail in [29].

Conclusions. The variants of realization of devices for rotating attractors in phase space and displaying the projection on one of the planes were considered. The main element of such devices is a sin/cos potentiometer or its analog. It is used to realize an orthogonal transformation that allows to rotate 3D objects into pseudo-3D. This element can be realized with the help of a bundle: ADC, ROM with coefficient table, digital-to-analog multiplier. Changing the ROM to a microcontroller allows additional functions to be introduced, e.g. indication and rotation angle extension. Thereby reducing the overall size of the device. Combining and modifying the developments of [25, 27] is promising. Transfer of the device to modern element base, increase of frequency range, control of rotation of dynamic chaos generators of greater dimensionality, more control over the rotation angle (input of binary number/controller) and separate functions of the device. For example, Poincaré section, displays of the top and bottom of the attractor (separated by the section plane), distance to the section plane, switching between projections, automatic/manual rotation.

Bibliography:

1. Berkovich, Y., The Van Der Pol Oscillator with a Tunnel Diode, WJERT, 2024, Vol.10, no. 3: P. 40-56.
2. Thio W. J.-C., Sprott J. C. *Elegant Circuits: Simple Chaotic Oscillators*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd, 2022.
3. Мікроелектронний генератор детермінованого хаосу на основі біполярної транзисторної структури з від'ємним диференційним опором / А. Семенов та ін. *Measuring and computing devices in technological processes*. 2023. № 3. С. 206–217. URL: <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-24>
4. Mathematical modeling of the dynamic chaos mode of electrical oscillations in the colpitts oscillator based on the mosfet / A. O. Semenov et al. *Scientific notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*. 2022. No. 2. P. 40–47. URL: <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/07>
5. Simulation of the Chaotic Dynamics of the Deterministic Chaos Transistor Oscillator based on the Hartley Circuit / A. Semenov et al. *2020 IEEE 15th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235384>
6. Petrzela J. Chaos in Analog Electronic Circuits: Comprehensive Review, Solved Problems, Open Topics and Small Example. *Mathematics*. 2022. Vol. 10, no. 21. P. 4108. URL: <https://doi.org/10.3390/math10214108>
7. Itoh M. Synthesis of electronic circuits for simulating nonlinear dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2001. Vol. 11, no. 03. P. 605–653. URL: <https://doi.org/10.1142/s0218127401002341>
8. Klomkarn K., Sooraksa P. Simple self-instructional modules based on chaotic oscillators: few blocks generating many patterns. *International Journal of Bifurcation and Chaos*. 2011. Vol. 21, no. 05. P. 1469–1491. URL: <https://doi.org/10.1142/s021812741102915x>
9. Carla M. The analog computer: Beyond the museum artwork, a tool for studying linear and nonlinear systems. *American Journal of Physics*. 2022. Vol. 90, no. 4. P. 263–272. URL: <https://doi.org/10.1119/10.0009634>
10. Concise Guide to Chaotic Electronic Circuits / L. Fortuna et al. Springer London, Limited, 2014.
11. Rujzl M., Polak L., Petrzela J. Hybrid Analog Computer for Modeling Nonlinear Dynamical Systems: The Complete Cookbook. *Sensors*. 2023. Vol. 23, no. 7. P. 3599. URL: <https://doi.org/10.3390/s23073599>
12. Ulmann B. *Analog Computing*. De Gruyter. 2022. 440 p. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110787740>
13. Ulmann B. *Analog and Hybrid Computer Programming*. De Gruyter. 2020. 316 p. URL: <https://doi.org/10.1515/9783110787740>
14. The analog thing – first steps. URL: https://the-analog-thing.org/THAT_First_Steps.pdf (дата звернення: 23.04.2025)
15. The Analog Paradigm “Model-1.1” User manual. URL: <https://analogparadigm.com/downloads/handbook.pdf> (дата звернення: 23.04.2025)
16. Two-Dimensional Rotation of Chaotic Attractors: Demonstrative Examples and FPGA Realization / W. S. Sayed et al. *Circuits, Systems, and Signal Processing*. 2019. Vol. 38, no. 10. P. 4890–4903. URL: <https://doi.org/10.1007/s00034-019-01096-z>
17. CORDIC-Based FPGA Realization of a Spatially Rotating Translational Fractional-Order Multi-Scroll Grid Chaotic System / W. S. Sayed et al. *Fractal and Fractional*. 2022. Vol. 6, no. 8. P. 432. URL: <https://doi.org/10.3390/fractalfract6080432>

18. A Deterministic Chaos Ring Oscillator Based on a MOS Transistor Structure with Negative Differential Resistance / A. Semenov et al. 2019 *IEEE International Scientific-Practical Conference Problems of Infocommunications, Science and Technology (PIC S&T)*, Kyiv, Ukraine, 8–11 October 2019. 2019. URL: <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061330>
19. Numerical study of the deterministic chaos oscillator with a differential integral element on the colpitts circuit / A. Semenov et al. 2018 *14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET)*, Lviv-Slavske, Ukraine, 20–24 February 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336329>
20. MacKay D. M. Analogue computing at ultra-high speed: An experimental and theoretical study. New York : Wiley, 1962. 395 p.
21. Shapley R., Rossetto M. An electronic visual stimulator. *Behavior Research Methods & Instrumentation*. 1976. Vol. 8, no. 1. P. 15–20. URL: <https://doi.org/10.3758/bf03201656>
22. Heeley D. W. A rotator for X/Y oscilloscope displays. *Behavior Research Methods & Instrumentation*. 1983. Vol. 15, no. 5. P. 503–507. URL: <https://doi.org/10.3758/bf03203696>
23. Higgs A. A digital image rotating system. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1982. Vol. 15, no. 3. P. 266–267. URL: <https://doi.org/10.1088/0022-3735/15/3/001>
24. Kennedy M. P. Hardware toolkit for studying chaos: a live demonstration of nonlinear dynamics instrumentation with audience participation. *34th Midwest Symposium on Circuits and Systems*, Monterey, CA, USA. URL: <https://doi.org/10.1109/mwscas.1991.252002>
25. Chua L. O., Sugawara T. Panoramic views of strange attractors. *Proceedings of the IEEE*. 1987. Vol. 75, no. 8. P. 1107–1120. URL: <https://doi.org/10.1109/proc.1987.13853>
26. Matsumoto T. A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*. 1984. Vol. 31, no. 12. P. 1055–1058. URL: <https://doi.org/10.1109/tcs.1984.1085459>
27. A 3-Dimensional Projective Unit URL: <https://glensstuff.com/3dpu/3dpu.htm> (дата звернення: 24.04.2025)
28. A Lorenz Attractor Circuit URL: <https://glensstuff.com/lorenzattractor/lorenz.htm> (дата звернення: 24.04.2025)
29. Tilton H. B. The 3-D oscilloscope: A practical manual and guide. Englewood Cliffs, N.J : Prentice-Hall, 1987. 231 p.

References:

1. Berkovich, Y. (2024). The Van Der Pol Oscillator with a Tunnel Diode. *World Journal of Engineering Research and Technology*, 10(3), 40–56.
2. Thio, W. J.-C., & Sprott, J. C. (2022). *Elegant Circuits: Simple Chaotic Oscillators*. World Scientific Publishing Co Pte Ltd.
3. Semenov, A., Pinaiev, B., Khloba, A., Shurkhal, M., & Olkhovych, V. (2023). Mikroelektronnyi henerator determinovanoho khaosu na osnovi bipoliarnoi tranzystornoj struktury z vidiemnym dyferentsiinym oporom. *Measuring and Computing Devices in Technological Processes*, (3), 206–217. <https://doi.org/10.31891/2219-9365-2023-75-24>
4. Semenov, A. O., Semenova, O. O., Pinaiev, B. O., Kulias, R. O., & Shpylovyi, O. O. (2022). Mathematical modeling of the dynamic chaos mode of electrical oscillations in the colpitts oscillator based on the mosfet. *Scientific Notes of Taurida National V.I. Vernadsky University. Series: Technical Sciences*, (2), 40–47. <https://doi.org/10.32838/2663-5941/2022.2/07>
5. Semenov, A., Havrilov, D., Volovik, A., Baraban, S., Savytskyi, A., & Zviahin, O. (2020). Simulation of the chaotic dynamics of the deterministic chaos transistor oscillator based on the hartley circuit. *Y 2020 IEEE 15th international conference on advanced trends in radioelectronics, telecommunications and computer engineering (TCSET)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/tcset49122.2020.235384>
6. Petrzela, J. (2022). Chaos in analog electronic circuits: Comprehensive review, solved problems, open topics and small example. *Mathematics*, 10(21), 4108. <https://doi.org/10.3390/math10214108>
7. Itoh, M. (2001). Synthesis of electronic circuits for simulating nonlinear dynamics. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 11(03), 605–653. <https://doi.org/10.1142/s0218127401002341>
8. Klomkarn, K., & Sooraksa, P. (2011). Simple self-instructional modules based on chaotic oscillators: Few blocks generating many patterns. *International Journal of Bifurcation and Chaos*, 21(05), 1469–1491. <https://doi.org/10.1142/s021812741102915x>
9. Carlà, M. (2022). The analog computer: Beyond the museum artwork, a tool for studying linear and nonlinear systems. *American Journal of Physics*, 90(4), 263–272. <https://doi.org/10.1119/10.0009634>
10. Fortuna, L., Frasca, M., Buscarino, A., & Sciuto, G. (2014). *Concise guide to chaotic electronic circuits*. Springer London, Limited.
11. Rujzl, M., Polak, L., & Petrzela, J. (2023). Hybrid analog computer for modeling nonlinear dynamical systems: The complete cookbook. *Sensors*, 23(7), 3599. <https://doi.org/10.3390/s23073599>

-
12. Ulmann B. (2022). *Y Analog computing*. De Gruyter. <https://doi.org/10.1515/9783110787740>
 13. Ulmann B. (2020). *Y Analog and hybrid computer programming*. De Gruyter Oldenbourg. <https://doi.org/10.1515/9783110787740>
 14. The analog thing – first steps. (2023). Available at: https://the-analog-thing.org/THAT_First_Steps.pdf (date of access: 23.04.2025)
 15. The Analog Paradigm “Model-1.1” User manual. (2019). Available at: <https://analogparadigm.com/downloads/handbook.pdf> (date of access: 23.04.2025)
 16. Sayed, W. S., Radwan, A. G., Elnawawy, M., Orabi, H., Sagahyroon, A., Aloul, F., Elwakil, A. S., Fahmy, H. A., & El-Sedeek, A. (2019). Two-Dimensional rotation of chaotic attractors: Demonstrative examples and FPGA realization. *Circuits, Systems, and Signal Processing*, 38(10), 4890–4903. <https://doi.org/10.1007/s00034-019-01096-z>
 17. Sayed, W. S., Roshdy, M., Said, L., Herencsar, N., & Radwan, A. (2022). CORDIC-Based FPGA realization of a spatially rotating translational fractional-order multi-scroll grid chaotic system. *Fractal and Fractional*, 6(8), 432. <https://doi.org/10.3390/fractalfract6080432>
 18. Semenov, A., Osadchuk, O., Semenova, O., Koval, K., Baraban, S., & Savytskyi, A. (2019). A deterministic chaos ring oscillator based on a MOS transistor structure with negative differential resistance. *Y 2019 IEEE international scientific-practical conference problems of infocommunications, science and technology (PIC S&T)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/picst47496.2019.9061330>
 19. Semenov, A., Koval, K., Savytskyi, A., Zviahin, O., & Baraban, S. (2018). Numerical study of the deterministic chaos oscillator with a differential integral element on the colpitts circuit. *Y 2018 14th international conference on advanced trends in radioelectronics, telecommunications and computer engineering (TCSET)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/tcset.2018.8336329>
 20. MacKay, D. M. (1962). *Analogue computing at ultra-high speed: An experimental and theoretical study*. Wiley.
 21. Shapley, R., & Rossetto, M. (1976). An electronic visual stimulator. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 8(1), 15–20. <https://doi.org/10.3758/bf03201656>
 22. Heeley, D. W. (1983). A rotator for X/Y oscilloscope displays. *Behavior Research Methods & Instrumentation*, 15(5), 503–507. <https://doi.org/10.3758/bf03203696>
 23. Higgs, A. (1982). A digital image rotating system. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*, 15(3), 266–267. <https://doi.org/10.1088/0022-3735/15/3/001>
 24. Kennedy, M. P. (б. д.). Hardware toolkit for studying chaos: A live demonstration of nonlinear dynamics instrumentation with audience participation. *Y 34th midwest symposium on circuits and systems*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/mwscas.1991.252002>
 25. Chua, L. O., & Sugawara, T. (1987). Panoramic views of strange attractors. *Proceedings of the IEEE*, 75(8), 1107–1120. <https://doi.org/10.1109/proc.1987.13853>
 26. Matsumoto, T. (1984). A chaotic attractor from Chua's circuit. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 31(12), 1055–1058. <https://doi.org/10.1109/tcs.1984.1085459>
 27. A 3-Dimensional Projective Unit. (2013). Available at: <https://glensstuff.com/3dpu/3dpu.htm> (date of access: 24.04.2025)
 28. A Lorenz Attractor Circuit. (2013). Available at: <https://glensstuff.com/lorenzattractor/lorenz.htm> (date of access: 24.04.2025)
 29. Tilton, H. B. (1987). *The 3-D oscilloscope: A practical manual and guide*. Prentice-Hall.

ГОТЕЛЬНО-РЕСТОРАННА СПРАВА ТА КЕЙТЕРИНГ

УДК 338.48:379.8:37.02:659.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.33>

Горб К. М., кандидат географічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-3779-484X

Корнєєв М. В., доктор економічних наук, професор
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Горожанкіна Н. А., кандидат географічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-2773-8630

Кучер М. М., кандидат економічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

ТЕХНОЛОГІЇ ЕКСКУРСІЙНОГО ТА СУПРОВІДНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ У СФЕРІ ТУРИЗМУ ТА ГОСТИННОСТІ

Статтю присвячено аналізу та систематизації технологій екскурсійного та супровідного обслуговування у сфері туризму та гостинності, за різних трактувань екскурсії та супроводу: по-перше, як туристичної послуги, коли застосовуються головним чином сервісні технологічні прийоми, по-друге, як методу навчання з використанням насамперед педагогічних прийомів, по-третє, як інструменту реклами та популяризації з пріоритетним базуванням на маркетингових інструментах та PR-технологіях. Обґрунтовано спільні та відмінні риси між екскурсією та супроводом, запропоновано поняття екскурсійно-супровідного заходу (ЕСЗ). Наведено авторську технологічну схему супроводу типового одноденного пізнавального автобусного туру як прикладу та підґрунтя для формування стандартів туристичного супроводу в умовах «економіки вражень».

Окремі послуги та загалом діяльність, пов'язана з підготовкою та проведенням екскурсій та супроводу, а також з екскурсійним та супровідним обслуговуванням туристичних подорожей, освітніх, ділових та рекламних заходів, є змістовно та технологічно складними операціями, що вимагають досить широкого спектру професійних знань, навичок та особистісних характеристик її постачальників, включаючи високу відповідальність (у т. ч. фінансову), обізнаність з Google-картами та правилами створення контенту для соціальних мереж, стресостійкість та ефективність у прийнятті рішень з урахуванням величезного спектру можливих непередбачених ситуацій під час подорожі. Розмежування екскурсії та супроводу залежить від співвідношення екскурсійних та супровідних послуг. Будь-яка екскурсія або в цілому програма туристичної подорожі являє собою результат творчого процесу, де цінується креатив, незвичність та індивідуальний підхід. Тому процеси екскурсійного та супровідного обслуговування не можуть бути піддані абсолютній формалізації. При стандартизації технологічних процесів туристичного супроводу та проведення екскурсій в умовах «економіки вражень» варто знайти «золоту середину» між забезпеченням високої якості послуг та проявами творчої уяви та креативності.

Ключові слова: екскурсійно-супровідний захід, технологія проведення екскурсії, технологія туристичного супроводу, екскурсійні методи та прийоми, «економіка вражень».

Horb K. M., Korneyev M. V., Horozhankina N. A., Kucher M. M. Technologies of excursion and accompanying service in the sphere of tourism and hospitality

The article is devoted to the analysis and systematization of technologies of excursion and accompanying services in the field of tourism and hospitality, under different interpretations of excursion and accompanying: firstly, as a tourist service, when mainly service technological techniques are used, secondly, as a method of training using primarily pedagogical techniques, thirdly, as a tool of advertising and popularization with a priority based on marketing tools and PR technologies. The common and distinctive features between an excursion and accompanying are substantiated, the concept of an excursion and accompany-

ing event (EAE) is proposed. The author's technological scheme of accompanying a typical one-day cognitive bus tour is given as an example and basis for the formation of standards of tourist accompanying in the conditions of the «economy of impressions». Individual services and in general the activities related to the preparation and conduct of excursions and accompaniment, as well as excursion and accompaniment support for tourist trips, educational, business and advertising events, are substantively and technologically complex operations that require a fairly wide range of professional knowledge, skills and personal characteristics of its providers, including high responsibility (including financial), awareness of operating Google maps and creating content for social networks, stress resistance and efficiency in making decisions, taking into account the huge range of possible unforeseen situations during the trip. The distinction between excursion and accompaniment depends on the ratio of excursion and accompaniment services. In modern conditions, it can be considered relevant to improve, create and implement national standards and educational, methodological and instructional and regulatory materials on tourist support, taking into account international standards. But both the excursion and the tourist travel program as a whole are the result of a creative process, where creativity, unusualness and an individual approach are valued. Therefore, the processes of excursion and support services cannot be subjected to absolute formalization. In standardizing of the technological processes of tourist accompaniment and conducting excursions in the conditions of the «experience economy», it is worth finding a «golden mean» between ensuring high quality services and manifestations of creative imagination and creativity.

Key words: excursion and accompanying event, excursion technology, tourist accompaniment technology, excursion methods and techniques, «economy of impressions».

Постановка проблеми. Організація екскурсій та супроводу в туристичному процесі та в гостинності є важливою складовою як сфери обслуговування, так і навчання, виховання, налагодження та укріплення ділових зв'язків, забезпечення стабільного потоку споживачів. Як загальним питанням та проблемам організації, так і окремим технологіям, методичним та технічним прийомам підготовки та здійснення екскурсій і супроводів присвячено значну кількість наукових та навчально-методичних праць, що активно використовуються у практичній діяльності, насамперед в туризмі та гостинності. Але при цьому слабо простежуються розмежування у згаданих техніках та прийомах підготовки та проведення екскурсій і супроводів різного змісту, цільового призначення та контингенту.

Екскурсійна та супровідна діяльність в сучасних умовах в Україні активно розвивається та вдосконалюється, незважаючи на всі перешкоди та виклики, і поступово наближається до світових та європейських вимог і стандартів. Проте слабо враховується комплексний підхід до застосування екскурсійних та супровідних технологій в контексті розмежування підходів при урахуванні ключових цілей діяльності вказаного напрямку, насамперед як платної послуги, як інструменту виховання та навчання і як елементу популяризації. У цьому зв'язку можна вважати актуальним розгляд та систематизацію екскурсійних та супровідних технологій насамперед за різних цільових установок.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Технології, методики, окремі технічні прийоми (як традиційні, так і інноваційні) підготовки та проведення екскурсій і супроводів є предметом вивчення багатьох науковців та практиків, що представлені як у численних джерелах навчального призначення, так і в наукових розробках. Серед фахівців, у роботах яких детально обґрунтовані вказані методики та техніки, варто зазначити насамперед таких: О. Старинець [1], О. Шестель [1], Л. Матвійчук [1], О. Король [17], В. Кіптенко [14], О. Малиновська [14], Т. Лисюк [19], О. Терещук [19], О. Дмитрук [19], К. Верес [5], О. В. Коваленко ([15], [16]), С. С. Галасюк [7], М. М. Білянська [2], Л. І. Бондаренко [2], О. М. Лазебна [2], Г. В. Машіка [20], О. В. Касинець [13], Т. Сокол ([26], [27]), О. В. Гаврилюк, Л. В. Півнюва [6], Н. С. Нещеретний [23], М. М. Покоłodна [23], Є. Є. Кривенко [18], М. М. Покоłodна [18] тощо.

Окремі з наведених та інших праць повністю присвячені екскурсійній та частково супровідній діяльності, в інших вона розглядається як елемент більш загального змісту, головним чином у якості одного з ключових напрямів організації туристичної діяльності. При цьому власне екскурсії у більшості робіт розглядаються максимально ґрунтовно, з детальним описом усіх організаційно-технологічних елементів (екскурсійна методика, екскурсійний метод пізнання, прийоми та техніки екскурсійного показу і розповіді тощо), супровідна ж діяльність описується в основному фрагментарно та епізодично, головним чином як своєрідне доповнення до екскурсійної. Також слабо простежується і чіткість розмежування між екскурсією та супроводом, що ускладнює формування та застосування конкретних технологій. Вказані обставини зумовлюють необхідність удосконалення методичних та організаційно-технологічних засад підготовки та проведення екскурсій і супроводів, насамперед у сфері туризму та гостинності.

Метою статті є аналіз підходів та систематизація технологій екскурсійного та супровідного обслуговування, включно з інноваційними, з позицій його цільового призначення та контингенту споживачів, обґрунтування відмінностей між екскурсійною та супровідною сервісною діяльністю та відповідного поняття екскурсійно-супровідного заходу, розробка технологічної схеми супроводу типового одноденного туру екскурсійно-пізнавального спрямування в умовах «економіки вражень».

Виклад основного матеріалу. В сучасній літературі представлено велику кількість визначень та трактувань екскурсії, значно меншою мірою обґрунтовано поняття туристичного супроводу, без якого в класичному розумінні не може обійтись як будь-яка екскурсія, так і туристичний маршрут. З об'єктивних позицій

екскурсії та супроводи мають як спільні риси («області перетинання»), так і відмінні. Будь-який екскурсовод завжди є супроводжувачем, але далеко не всякий супровід є екскурсійним. Супровід зазвичай передбачає насамперед організаційно-технічне забезпечення пересування людей у просторі з певною метою, найпримітивніший варіант супроводу – елементарне проведення людей місцевістю до заданої точки найоптимальнішим шляхом. По мірі того, як таке «проведення» включає окремі елементи показу об'єктів на шляху та розповіді про них, що викликає певний інтерес у супроводжуваних, супровід поступово перетворюється на екскурсію, супроводжувані особи – на екскурсантів, до повністю підготовленого та відпрацьованого маршруту із застосуванням найбільш придатного для нього спектру екскурсійних прийомів для досягнення відвідувачами туристичного «wow-ефекту». При цьому та змістовна межа, де закінчується супровід та починається екскурсія, залежить від глибини опрацювання змісту та ступеня підготовленості гідів у застосуванні прийомів показу та розповіді.

Для тих туристичних маршрутів, що включають більше одного прогулянкового заходу та відвідування, зазвичай функції супровідного та екскурсійного обслуговування розмежовуються: головним завданням супроводжувача є забезпечення безперебійності реалізації програми подорожі у часі та просторі, екскурсовода – надання якісних екскурсійних послуг, коли кожна екскурсія в турі розцінюється як своєрідна «вистава» зі своїми сценарієм та фабулою [17], безвідносно ступеня її театралізації. Якщо супроводжувач за програмою подорожі, поряд з організаційними, надає хоча б епізодичні екскурсійні послуги (наприклад, озвучує цікаву дорожню інформацію під час тривалого автобусного переїзду у якості одного з прийомів забезпечення того, щоб туристи не скучали в дорозі, поряд з показом фільму або прослуховуванням аудіозаписів відповідно до тематики туру), то таку роботу, на наш погляд, вже можна назвати екскурсійним супроводом, а супроводжувача – гідом-екскурсоводом.

У зв'язку з вищевикладеним, у подальшому в цій статті ми будемо оперувати здебільшого поняттям «екскурсійно-супровідний захід» (ЕСЗ), з урахуванням великого спектру можливих варіантів співвідношення екскурсійних та супровідних послуг та видів сервісної діяльності в одному такому заході.

Представлені у багатьох наукових розробках та навчально-методичних працях численні класифікації екскурсій (екскурсійно-супровідних заходів) за різними ознаками (насамперед за змістом та призначенням, складом учасників, місцем та формою проведення і способом пересування ([14], [17] та ін.)) зумовлюють застосування різних підходів до їх організації та здійснення, а відповідно й до технологічних засад та методико-технічних прийомів як їх підготовки (проектування), так і реалізації. З нашої точки зору, в сучасних умовах важливим є розмежування таких підходів насамперед для ЕСЗ, які можна трактувати з наступних трьох ключових позицій:

- 1) як платну послугу в системі насамперед туристичного обслуговування;
- 2) як навчально-виховний захід в системі освіти;
- 3) як рекламно-популяризаційний захід в системі ділових комунікацій та маркетингового комплексу.

Залежно від представлених трьох тлумачень ЕСЗ очевидним є факт використання диференційованого підходу до обрання методів та технічних прийомів і підготовки, і реалізації таких заходів. У табл. 1 ми здійснили спробу загальної систематизації основних характеристик кожного із даних виділених типів заходів, включно з технологічною специфікою, з урахуванням цільового призначення та особливостей оплати і ціноутворення.

Варто проаналізувати наведену таблицю.

Класичні туристичні екскурсії та супроводи формуються з урахуванням наявного ринку екскурсійних послуг, на них встановлюється комерційна ринкова ціна з урахуванням попиту і конкуренції та обираються прийоми показу і розповіді, що максимально можуть приємно здивувати туристів. Зазвичай такі ЕСЗ проводяться ліцензованими та сертифікованими гідами, як у складі турів, так і у якості «самостійних» видів платних послуг. При цьому для туристів – гостей з інших міст, регіонів та країн, такі екскурсії спрямовані в основному на формування позитивного образу відвідуваного місця, для місцевих мешканців – на посилення почуття патріотизму, любові до «малої батьківщини». Але в обох випадках акцент робиться на цікавості інформації для широкого загалу, естетичності краєвидів та окремих об'єктів показу. Гіди-екскурсоводи та туристичні й суто екскурсійні установи в цьому випадку, крім ліцензування та сертифікації у сфері туристичних послуг, в умовах конкуренції прагнуть до забезпечення максимальної якості екскурсійних та супровідних послуг, з урахуванням міжнародних, національних та «внутрішньофірмових» стандартів [22].

Екскурсія як важливий інструмент навчального та виховного процесу передбачає, у першу чергу, таку побудову маршруту та відбір інформації і об'єктів показу, що максимально розширюють кругозір, забезпечують нові знання, формують навички дружнього поводження в колективі під час подорожі, патріотичні почуття та повагу до інших культур, екологічну свідомість тощо, в окремих випадках є елементами реалізації конкретних навчальних програм. В таких ЕСЗ широко застосовуються різноманітні педагогічні прийоми та методи, головним чином заохочувальні, спрямовані на невимушене засвоєння навчального матеріалу, наприклад, ігрові, спостереження та порівняння і т. ін. Зазначені ЕСЗ зазвичай не переслідують комерційної мети, але їх організатори, як правило, вимушені брати плату з учасників, головним чином з метою покриття поточних витрат на їх здійснення (транспортні витрати, вхідна плата в музей або парк тощо). Контингентом

таких екскурсій в основному є здобувачі освіти та слухачі навчальних курсів і тренінгів, що претендують у кінцевому підсумку на отримання документу про освіту (атестату, диплому, сертифікату тощо). Стандартизація екскурсійних послуг та сертифікація і ліцензування екскурсоводів у цьому випадку орієнтується першочергово на відповідні стандарти у сфері освіти.

Таблиця 1

**Сутність та ключові організаційно-технічні прийоми підготовки і проведення
різноспрямованих екскурсійно-супровідних заходів**

Екскурсійно-супровідний захід	Основна мета	Особливості оплати та ціноутворення	Головні види прийомів та технік для підготовки і проведення (показу та розповіді)	Типовий приклад
Як туристична послуга	Надання якісного екскурсійного сервісу	Комерційна ринкова ціна	Сервісні прийоми: формування маршруту та тексту, відбір об'єктів, засобів показу і розповіді для забезпечення максимального туристичного wow-ефекту	Екскурсія «Неповторна Барселона» у складі туру «Чарівна Іспанія»
Як метод навчання та виховання	Закріплення навчального матеріалу в цікавій формі	Відшкодування поточних витрат	Педагогічні прийоми: методи та техніки навчання із застосуванням наочностей, з обов'язковим контролем засвоєння матеріалу	Екскурсія музеєм історії України для закріплення навчального матеріалу з історії України
Як інструмент реклами та PR	Забезпечення популярності серед споживачів та партнерів	Безкоштовне проведення	Маркетингові прийоми: показ ключових об'єктів та ділянок, що підкреслюють вигідність обрання закладу для споживання послуг, ділового партнерства, інвестицій або місця роботи	Рекламна екскурсія готельно-ресторанним комплексом «Бартоломео»

Джерело: складено авторами

Рекламні екскурсії та супроводи мають за основну мету в найбільш вигідному світлі презентувати певну групу об'єктів на місцевості або у приміщеннях та будівлях (як правило тих, що розташовані у межах одного закладу, підприємства, компанії), для досягнення головним чином комерційно-ділових цілей. Організація та проведення таких ЕСЗ безпосередньо не пов'язане з можливістю отримання прибутків і навіть відшкодування поточних витрат, навпаки, вони передбачають певні витрати підприємства, що спрямовані головним чином на оплату праці фахівців з реклами та PR, у складі загальних витрат на маркетингові заходи. Але кінцевою метою у даному випадку є формування позитивного іміджу та образу місця, що в остаточному підсумку забезпечує стабільність роботи підприємства, включно з прибутковістю. «Клієнтами» таких екскурсій зазвичай є нові найняті працівники або претенденти на вакантні посади, представники компаній-інвесторів та ділових партнерів, журналісти та потенційні споживачі. Для проведення даного типу ЕСЗ застосовується широкий спектр рекламних та PR-інструментів, головними серед яких слід назвати презентаційні прийоми. У цьому випадку мова не йде про якість послуг та будь-які стандарти щодо їх надання, крім тих кваліфікаційних вимог, що висуваються до фахівців з реклами та PR.

Окремо слід відзначити екскурсії та ЕСЗ, що проводяться як програмні заходи в рамках наукових конференцій, ділових нарад, виставок нових досягнень тощо. У цьому випадку ознаки кожного із зазначених трьох ділових різновидів ЕСЗ знаходяться у своєрідному «переплетенні» та «взаємопроникненні». Учасники таких екскурсій зазвичай одночасно є і діловими туристами, і діловими партнерами організаторів заходу, і претендентами на отримання сертифікату учасника як документу про навчання або підвищення кваліфікації.

В цілому всі розглянуті та частково систематизовані цільові різновиди екскурсійно-супровідних заходів характеризуються як відмінними, так і спільними рисами. Кожна технологія підготовки та проведення ЕСЗ у будь-якому разі має базуватися на принципах гостинності як ключової особистої риси реалізаторів таких заходів [8], передбачати їх досконалі комунікативні компетентності [9], відповідний освітній рівень і фах, та достовірність інформації, що надається під час екскурсії.

Загалом технології як підготовки, так і проведення екскурсій на даний час є достатньо розробленими, детально обґрунтованими та широко застосовуються на практиці. Технології ж класичного туристичного супроводу в нашій країні на даний час розроблені поки що досить слабо, у навчальній та науковій літературі зустрічаються, як вже зазначалося, зазвичай в епізодичному та фрагментарному вигляді, в основному як доповнення до екскурсійних та «туристично-організаційних» технік, методів та прийомів. Туроператорські та турагентські компанії у цьому зв'язку, як правило, з урахуванням досвіду розробляють свої технології та

встановлюють власні «внутрішньофірмові» стандарти й правила туристичного супроводу, на підставі яких навчають та контролюють відповідний персонал.

Нижче представлено авторську технологічну схему супроводу типового одноденного автобусного екскурсійно-відпочинкового туру для групи туристів з 20 чоловік, що включає послідовно: переїзд до іншого міста, оглядову екскурсію цим містом, обід в кафе, відвідування музею, вільний час та зворотній переїзд. Дана схема може служити пілотним матеріалом для обговорень та дискусій з метою подальшого вдосконалення існуючих, формування нових та затвердження загальних стандартів туристичного супроводу. Отже, послідовні дії супроводжувача такого туру під час його підготовки, проведення та підведення підсумків полягають у наступному.

1. За один або два дні до початку туру відвідати офіс туристичної компанії – розробника туру та отримати детальні консультації та усно з'ясувати всі нюанси послідовних програмних заходів туру.

2. Отримати пакет документів і матеріалів для реалізації туру – «папку («валізку») супроводжувача», що містить: фірмову табличку туристичної фірми для демонстрації при збиранні групи та для розміщення на лобовому склі автобуса під час туру (за умови узгодження з перевізником); груповий страховий поліс; прапор туристичної компанії для групового фотографування на знакових місцях; роздруковану програму туру з таймінгом та контактами усіх надавачів окремих послуг; список групи з номерами телефонів кожного туриста та вказанням місця в автобусі; схему розсадки туристів по місцях в автобусі; папірці з номерами місць в автобусі; друковані рекламні матеріали та сувеніри на згадку про подорож.

3. У разі необхідності отримати готівкові кошти для оплати окремих послуг (в нашому випадку – транспортних, екскурсійних, входні квитки в музей, харчування), перерахувати у присутності представника-консультанта від туристичної фірми.

4. У разі необхідності уточнення певних нюансів подорожі зв'язатися з надавачами послуг (насамперед з перевізником та екскурсоводом по місту).

5. У разі необхідності написати у чат групи туристів по цій подорожі в одній із соціальних мереж (чат створюється розробником туру) окремі настанови туристам щодо речей, документів та ліків, які варто взяти з собою в тур, та форми одягу з урахуванням прогнозованих погодних умов та інших обставин.

6. Звільнити пам'ять власного смартфона для накопичення фотографій та відеозаписів майбутнього туру.

7. У день реалізації туру взяти з собою «валізку супроводжувача», отримані готівкові кошти, смартфон та зарядні пристрої. З'явитися на місце зустрічі групи за 15 хвилин до початку туру. У разі відсутності автобуса на місці оперативно зв'язатися з водієм.

8. При прибутті автобуса познайомитися з водієм та розрахуватися за транспортні послуги, перевірити салон автобуса та сидіння, перевірити роботу автобусного мікрофона, розкласти папірці з номерами по місцях. З'ясувати знання дороги водієм, у разі необхідності користуватися власними знаннями дороги, довідковими картографічними Google-сервісами та телефонними консультаціями представників приймаючого міста.

9. Зустріти групу біля автобуса з демонстрацією фірмової таблички туристичної компанії. Люб'язно запрошувати туристів до автобуса почергово, оголошуючи кожному номер його місця. У разі запізнення когось із туристів терміново з ним зв'язатися та з'ясувати обставини, нагадавши, що час очікування не може перевищувати 15 хвилин.

10. Після виїзду автобуса в тур з використанням мікрофону ще раз привітати групу, побажати позитивного настрою, представитись та представити водія, оголосити номер автобуса та програму туру, проанонсувавши в заохочувальній формі всі заходи під час туру. Ввічливо попросити дотримуватись таймінгу під час туру та підтримувати чистоту в автобусі.

11. З'ясувати місце найближчої комфортної автозаправної станції для першої санітарно-технічної зупинки та визначити орієнтовний час її відвідування, про що оголосити в мікрофон.

12. Зв'язатися з екскурсоводом по місту відвідування, визначити (уточнити) місце та час зустрічі.

13. В дорозі періодично надавати цікаву дорожню інформацію та контролювати настрій у туристичній групі. Оперативно реагувати на скарги та побажання туристів, постійно підтримуючи комфортний психологічний клімат в групі.

14. По прибутті до місця першої санітарної зупинки чітко оголосити час відправлення та контролювати вчасність збору туристів та від'їзду. Під час зупинки зібрати папірці з номерами місць.

15. З'ясувати місце та час другої санітарної зупинки ближче до міста відвідування, аналогічно контролюючи час перебування групи на АЗС.

16. Перед в'їздом до міста призначення вдруге зв'язатися з приймаючим гідом, остаточно з'ясувавши місце та час зустрічі.

17. Після зустрічі з місцевим екскурсоводом розрахуватися з ним, представити його групі та передати йому повноваження супроводжувача на час екскурсії, надавши зручне місце в автобусі з мікрофоном.

18. Під час екскурсії стежити за групою та настроєм у групі, контролювати час. У найбільш знакових місцях організувати та зробити спільні групові фото з прапором туристичної компанії.

19. За годину до обіду зв'язатися з адміністратором кафе та узгодити час обіду, нюанси щодо проїзду та паркування автобусу, уточнити кількість учасників групи, що будуть обідати.

20. Після завершення екскурсії попросити екскурсовода надати загальні поради групі, де і як з користю та задоволенням провести в даному місті вільний час, подякувати за екскурсію від себе та від усієї групи.

21. По прибутті в кафе розрахуватися з адміністратором з урахуванням фактичної кількості учасників групи, що обідають. З'ясувати посадочні місця для групи та місце санітарного вузла. Запросити групу до кафе, направивши до санвузла та посадкових місць. Слідкувати за таймінгом під час обіду. За необхідності зарядити смартфон від стаціонарного джерела живлення.

22. Під час обіду зателефонувати до музею, остаточно з'ясувавши час прибуття групи, тривалість екскурсії та огляду експонатів, особливості проїзду та паркування автобусу.

23. Після обіду подякувати закладу харчування від себе та від групи. Зібравши групу в автобусі, підбадьорити усіх та проанонсувати відвідування музею.

24. По прибутті до музею розрахуватися за музейну екскурсію та з урахуванням фактичної кількості учасників – за вхідні квитки. Познайтись із музейним гідом. Запросити групу до музею, представити екскурсовода, призначити час збору в автобусі після музейної екскурсії.

25. Під час перебування в музеї контролювати групу, включно із загальним настроєм та психологічним кліматом. Зробити декілька групових фото з прапором. Наприкінці подякувати музейному гіді від себе та від групи.

26. Після завершення перебування в музеї зібрати групу в автобусі, переїхати у визначене місце для початку та закінчення проведення вільного часу за бажанням, запропонувати варіанти. Визначити та оголосити час збору групи в автобусі та час від'їзду. Контролювати психологічний клімат в групі та зарядженість власного смартфона.

27. Після збору групи в автобусі по завершенні вільного часу роздати туристам рекламні листівки та сувеніри на згадку від компанії – організатора туру. Після від'їзду у напрямі домівки підвести підсумки подорожі, з'ясувати найцікавіші її моменти та місця.

28. Під час зворотного переїзду надати усно із застосуванням мікрофону рекламну інформацію щодо наступних турів компанії, за бажанням туристів забезпечувати прослуховування аудіозаписів або перегляд фільмів, підтримуючи дружні стосунки з групою та водієм. Попросити усіх туристів не виходити з групового чату до розміщення у ньому анкети щодо оцінки складових туру та її заповнення, заохотити до викладення в чат окремих особистих фото та відеозаписів з туру.

29. На зворотному шляху робити санітарні зупинки з урахуванням побажань туристів, використовуючи лише комфортні АЗС.

30. При наближенні до рідного міста оголосити про прибуття незабаром, про правила зупинок та виходу на шляху до кінцевого пункту. Попросити не забувати особисті речі. Подякувати за користування послугами компанії.

31. За потреби зупиняти автобус для висадки туристів лише на узгоджених з водієм зупинках, люб'язно прощаючись з кожним туристом та висловлюючи позитивні побажання.

32. При прибутті до кінцевого пункту попрощатись із рештою групи, ще раз подякувати та побажати усього найкращого.

33. Протягом першої доби після завершення туру викласти в чат групові та інші цікаві власні фото та відеозаписи з туру, побажати остаточно усім учасникам усього найкращого та ненав'язливо закликати купувати та здійснювати нові тури компанії.

34. Протягом тижня відвідати офіс туристичної компанії, повернути «папку супроводжувача» та відзвітувати про супроводжений тур, обговоривши з його організаторами сильні та слабкі сторони подорожі і варіанти удосконалення програми та технології її реалізації.

Таким чином, лише із загальних позицій наданої технологічної схеми супроводу типового одноденного автобусного туру з трьома програмними заходами та вільним часом стає зрозумілим, що туристичний супровід являє собою досить складний сервісний процес, який вимагає неабияких знань, вмінь та особистих рис його реалізаторів, включаючи надзвичайну відповідальність (у т. ч. фінансову), обізнаність в оперуванні Google-картами та створенні контенту для соцмереж, стресостійкість та оперативність у прийнятті рішень, з урахуванням величезного спектру можливих непередбачуваних ситуацій.

У світлі вищевикладеного актуальним в сучасних умовах можна вважати вдосконалення, створення та впровадження національних стандартів і навчально-методичних та інструктивно-нормативних матеріалів щодо туристичного супроводу з урахуванням міжнародних норм. З іншого боку, не варто забувати про те, що як екскурсія, так і програма туристичної подорожі в цілому являє собою результат творчого процесу, де цінується креатив, незвичність та індивідуальний підхід. Тому, на відміну від окремих інших виробничих та сервісних технологій, процеси екскурсійного та супровідного обслуговування не можуть бути піддані абсолютній формалізації.

У цьому зв'язку варто наголосити на важливості емоційної складової у наданні зазначеного виду послуг. В сучасних умовах у світі і туризм, і готельно-ресторанна справа є чи не найяскравішим проявом та

віддзеркаленням «економіки вражень», концепцію якої в 1998 р. започаткували американські науковці Джо-зеф Б. Пайн і Джеймс Х. Гілмор [6]. Згідно з даною концепцією, економіка вражень є сучасним етапом розвитку світового господарства, після відповідних етапів пріоритетності в економіці аграрного, індустріального та сервісного секторів, та передбачає важливість не стільки формальних проявів якості і відповідності стандартам товарів та послуг, скільки «ступеня позитивності» тих емоцій та вражень, які вони викликають у споживачів ([4], [12] та ін.). Тому в нашому випадку, щодо стандартизації технологічних процесів туристичного супроводу та проведення екскурсій, варто знайти «золоту середину» між забезпеченням високої якості послуг та проявами творчої фантазії і креативу.

Висновки. Окремі послуги та в цілому діяльність щодо підготовки й проведення екскурсій та супроводу, а також екскурсійне і супровідне забезпечення туристичних подорожей, навчальних, ділових та рекламних заходів являють собою змістовно та технологічно складні операції, що потребують доволі широкого спектру професійних знань, вмінь та особистих характеристик його надавачів. Розмежування між екскурсією та супроводом залежить від співвідношення екскурсійних та супровідних послуг в одному туристично-прогулянковому заході. Вибір технології здійснення екскурсійної та супровідної діяльності залежить значною мірою від провідної мети заходу та контингенту відвідувачів, що диференціюється за трьома ключовими цільовими трактуваннями екскурсійно-супровідного заходу: як туристичної послуги, як методу навчання і як рекламного та PR-інструменту. Окремі технології екскурсійного та, особливо, супровідного обслуговування потребують вдосконалення та стандартизації, з урахуванням міжнародних норм та тенденцій «економіки вражень».

Список використаних джерел:

1. Starynets O., Shestel O., Matviichuk L. New trends in the formation of excursions in Ukraine. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2023. № 3 (9). С. 66–70.
2. Білянська М. М., Бондаренко Л. І., Лазебна О. М. Застосування методу інтерпретації в процесі проведення екскурсій екологічного спрямування. *Педагогіка формування творчої особистості у вищій і загальноосвітній школах*. 2020. № 70. Т. 1. С. 36–41.
3. Богатирьова Г. А., Ніколайчук О. А., Романуха О. М., Снігур К. В. Організація туристичної діяльності: методика та практика : навч. посіб. Кривий Ріг: ДонНУЕТ, 2020. 159 с.
4. Боярська М. О. Сутність та визначення економіки вражень на сучасному етапі розвитку економіки України. *Молодий вчений*. 2016. № 4. С. 25–27.
5. Верес К. О. Інноваційні технології в екскурсійному супроводі. *SWorld*. 2014. Т. 34. Вип. 2. С. 29–34.
6. Гаврилюк О. В., Півнюва Л. В. Економіка вражень – новий креативний тренд туристичного бізнесу. *Тези доповідей IV Міжнар. наук.-практ. конф.-фестивалю «Нематеріальна культурна спадщина як сучасний туристичний ресурс: досвід, практики, інновації»* (м. Київ, 20-21 травня 2021 р.). Київ: Вид. центр КНУКіМ, 2021. С. 335–339.
7. Галасюк С. С. Проблемні питання організації діяльності фахівців туристичного супроводу в Україні. *Глобальні та національні проблеми економіки*. 2015. Вип. 7. С. 566–569.
8. Горб К. М., Корнєєв М. В., Кучер М. М. Гостинність в готельно-ресторанному та туристичному бізнесі: загальні засади досліджень та особливості підготовки фахівців. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2024. № 1 (85). С. 111–119.
9. Горб К. М., Корнєєв М. В., Кучер М. М. Комунікативні компетентності персоналу в туристичному, готельному, ресторанному менеджменті та маркетингу. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2025. № 1 (89). С. 74–79.
10. Гудкова Н. Інтерпретація спадщини: як проводити екскурсії цікаво. URL: <https://www.britishcouncil.org.ua/heritage-interpretation-how-make-excursions-captivating>
11. Джинджоян В. В., Тесленко Т. В., Горб К. М. Інноваційні технології в туризмі та гостинності: навчальний посібник. Київ: Видавництво «Каравела», 2022. 340 с.
12. Дишкантюк О. В. Економіка вражень – сучасний етап розвитку суспільного виробництва. *Економіка харчової промисловості*. 2016. Том 8. Вип. 4. С. 3–9.
13. Касинець О. В. Ефективна підготовка фахівців туристичного супроводу (екскурсоводів) – потреба сучасності. *Сучасні тенденції розвитку науки і освіти в умовах поглиблення євроінтеграційних процесів* : збірник тез доповідей II Всеукраїнської науково-практичної конференції, 17-18 травня 2018 р., Мукачєво / Ред. кол. : Т. Д. Щербан (гол. ред.) та ін. Мукачєво : Вид-во МДУ, 2018. С. 432–434.
14. Кіптенко В. К., Малиновська О. К. Організація екскурсійних послуг: Підручник. Херсон : ОЛДІ-ПЛЮС, 2018. 518 с.
15. Коваленко О. В. Визначення професійних компетентностей, якими повинен володіти фахівець туристичного супроводу (гід-екскурсовод). *Проблеми та шляхи реалізації компетентнісного підходу в сучасній освіті*: матеріали Міжнародної науково-методичної Інтернет-конференції, 14-15 травня 2020 року / за заг. ред. О. А. Жукової. Харків: ХНУ імені В.Н. Каразіна, 2020. С. 57–62.

16. Коваленко О. В. Особливості підготовки фахівців туристичного супроводу (гідів-екскурсоводів) у країнах Європейського Союзу. *Актуальні питання гуманітарних наук* : міжвузівський збірник наукових праць молодих вчених Дрогобицького державного педагогічного університету імені Івана Франка. Дрогобич : Видавничий дім «Гельветика», 2020. Вип. 27, том 3. С. 102–106.
17. Король О. Д. Організація екскурсійних послуг у туризмі : навч.-метод. посібник. Чернівці : Чернівецький нац. ун-т, 2016. 144 с.
18. Кривенко Є. Є., Покоłodна М. М. Сучасні інноваційні форми проведення екскурсій. *Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку індустрії туризму та гостинності: глобальні виклики»* (м. Харків, 15 квітня 2024 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. С. 252–254.
19. Лисюк Т. В., Терещук О. С., Дмитрук О. О. Екскурсійне обслуговування у структурі туристичного продукту. *Причорноморські економічні студії*. 2018. Вип. 28 (1). С. 175–178.
20. Машіка Г. Особливості використання мобільних додатків в організації та проведенні екскурсій. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2024. № 1 (11). С. 32–39.
21. Мистецтво інтерпретації природи: найцікавіше з тренінгу WWF Україна для Київського зоопарку. 2019. URL: <https://wwf.ua/?344371/interpretation-zoo>
22. Мілінчук О. В., Кириєнко Ю. О. Стандартизація вітчизняних туристичних послуг в контексті європейської інтеграції. *Вісник Житомирського державного технологічного університету. Серія : Економічні науки*. 2015. № 2. С. 169–174.
23. Нещеретний Б. С., Покоłodна М. М. Використання інноваційних технологій на екскурсіях. *Матеріали III Міжнар. наук.-практ. конф. «Сучасні тенденції розвитку індустрії туризму та гостинності: глобальні виклики»* (м. Харків, 15 квітня 2024 р.). Харків: ХНУМГ імені О. М. Бекетова, 2024. С. 254–255.
24. Організація туризму: підручник / За заг. ред. д.е.н., проф. В. Я. Брича. Тернопіль : ТНЕУ, 2017. 448 с.
25. Паньків М. М. Економіка вражень як інструмент застосування готельного продукту. *Гостинність, сервіс, туризм: досвід, проблеми, інновації*. Матеріали X Міжнар. наук.-практ. конф. (м. Київ, 6-7 квітня 2023 р.). Київ: КНУКІМ, 2023. С. 370–371.
26. Сокол Т. Г. Визначення фахових компетентностей професійної підготовки фахівців туристичного супроводу з урахуванням вимог сучасного інформаційного суспільства. *Інтернет-освіта-наука-2016* : Матеріали Десятої міжнародної науково-практичної конференції ІОН-2016 (11-14 жовтня 2016 р.). Вінниця: ВНТУ, 2016. С. 117–118.
27. Сокол Т. Професійна підготовка туристичних гідів в Україні у світлі європейських вимог. *Вісник Київського національного університету культури і мистецтв. Серія : Туризм*. 2019. Т. 2. № 2. С. 157–163.
28. Технологія туристичної діяльності : лабораторний практикум / укл. Т. Д. Скутар. Чернівці : Чернівець. нац. ун-т ім. Ю. Федьковича, 2020. 64 с.
29. Чубукова О. Ю., Яренко А. В. Економіка вражень: передумови зародження, головні ідеї, економічна сутність. *Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. Серія : Економічні науки*. 2016. № 6. С. 92–98.

References:

1. Starynets O., Shestel O., Matviichuk L. (2023). New trends in the formation of excursions in Ukraine. *Innovatsii ta tekhnologii v sferi posluh i kharchuvannia*, 3 (9), pp. 66–70.
2. Bilianska M. M., Bondarenko L. I., Lazebna O. M. (2020). Zastosuvannia metodu interpretatsii v protsesi provedennia ekskursii ekolohichnoho spriamuvannia [Application of the interpretation method in the process of conducting ecological excursions]. *Pedahohika formuvannia tvorchoi osobystosti u vyshchii i zahalnoosvitnii shkolakh*, 70(1), pp. 36-41.
3. Bohatyrova H. A., Nikolaichuk O. A., Romanukha O. M., Snihur K. V. (2020). Orhanizatsiia turystychnoi diialnosti: metodyka ta praktyka : navch. posib [Organization of tourist activities: methodology and practice: teaching manual]. Kryvyi Rih: DonUET. 159 p.
4. Boiarska M. O. (2016). Sutnist ta vyznachennia ekonomiky vrazhen na suchasnomu etapi rozvytku ekonomiky Ukrainy [The essence and definition of the impression economy at the current stage of development of the Ukrainian economy]. *Molodyi vchenyi*, 4, pp. 25-27.
5. Veres K. O. (2014). Innovatsiini tekhnologii v ekskursiinomu suprovodi [Innovative technologies in excursion support]. *SWorld*. T. 34. Vyp. 2, pp. 29-34.
6. Havryliuk O. V., Pivnova L. V. (2021). Ekonomika vrazhen – novyi kreatyvnyi trend turystychnoho biznesu [The Experience Economy is a new creative trend in the tourism business]. *Tezy dopovidei IV Mizhnar. nauk.-prakt. konf.-festyvaliu «Nematerialna kulturna spadshchyna yak suchasnyi turystychnyi resurs: dosvid, praktyky, innovatsii»* (m. Kyiv, 20-21 travnia 2021 r.). Kyiv: Vyd. tsentr KNUKIM, pp.335-339.
7. Halasiuk S. S. (2015). Problemni pytannia orhanizatsii diialnosti fakhivtsiv turystychnoho suprovodu v Ukraini [Problematic issues of organizing the activities of tourist support specialists in Ukraine]. *Hlobalni ta*

natsionalni problemy ekonomiky: elektronne naukovе fakhove vydannia. Mykolaiv: MNU im. V. O. Sukhomlyns'koho. Vyp. 7. pp. 566-569.

8. Horb K. M., Kornieiev M. V., Kucher M. M. (2024). Hostynnist v hotelno-restorannomu ta turystychnomu biznesi : zahalni zasady doslidzhen ta osoblyvosti pidhotovky fakhivtsiv [Hospitality in the hotel, restaurant and tourism business: general principles of research and features of specialist training]. *Naukovyi pohliad: ekonomika ta upravlinnia*, 1 (85), pp. 111-119.

9. Horb K. M., Kornieiev M. V., Kucher M. M. (2025). Komunikatyvni kompetentnosti personalu v turystychnomu, hotelnomu, restorannomu menedzhmenti ta marketynhu [Communicative competences of personnel in tourism, hotel, restaurant management and marketing]. *Naukovyi pohliad: ekonomika ta upravlinnia*, 1 (89), pp. 74-79.

10. Hudkova N. Interpretatsiia spadshchyny: yak provodyty ekskursii tsikavo [Heritage interpretation: how to make excursions interesting]. URL: <https://www.britishcouncil.org.ua/heritage-interpretation-how-make-excursions-camptivating>

11. Dzhyndzhoian V. V., Teslenko T. V., Horb K. M. (2022). Innovatsiini tekhnolohii v turyzmi ta hostynnosti: navchalnyi posibnyk [Innovative technologies in tourism and hospitality: a training manual]. Kyiv: Vydavnytstvo «Karavela». 340 p.

12. Dyshkantiuk O. V. (2016). Ekonomika vrazhen – suchasnyi etap rozvytku suspilnoho vyrobnytstva [The impression economy is a modern stage in the development of social production]. *Ekonomika kharchovoi promyslovosti*. Tom 8. Vypusk 4, pp. 3-9.

13. Kasynets O. V. (2018). Efektyvna pidhotovka fakhivtsiv turystychnoho suprovodu (ekskursovodiv) – potreba suchasnosti [Effective training of tourist support specialists (tour guides) is a modern need]. *Suchasni tendentsii rozvytku nauky i osvity v umovakh pohlyblennia yevrointehratsiinykh protsesiv : zbirnyk tez dopovidei II Vseukrainskoi naukovo-praktychnoi konferentsii, 17-18 travnia 2018 r., Mukachevo / Red. kol. : T. D. Shcherban (hol. red.) ta in. Mukachevo : Vyd-vo MDU*, pp. 432-434.

14. Kiptenko V. K., Malynovska O. K. (2018). Orhanizatsiia ekskursiinykh posluh: Pidruchnyk [Organization of excursion services: Textbook]. Kherson : OLDI-PLiuS, 2018. 518 p.

15. Kovalenko O. V. (2020). Vyznachennia profesiinykh kompetentnosti, yakymy povynen volodyty fakhivets turystychnoho suprovodu (hid-ekskursovod) [Definition of professional competencies that a tourist support specialist (tour guide) must possess]. *Problemy ta shliakhy realizatsii kompetentnisnoho pidkhodu v suchasni osviti: materialy Mizhnarodnoi naukovo-metodychnoi Internet-konferentsii, 14-15 travnia 2020 roku / za zah. red. O.A. Zhukovoi*. Kharkiv: KhNU imeni V.N. Karazina, pp. 57-62.

16. Kovalenko O. V. (2020). Osoblyvosti pidhotovky fakhivtsiv turystychnoho suprovodu (hidiv-ekskursovodiv) u krainakh Yevropeiskoho Soiuzu [Features of training tourist support specialists (tour guides) in the countries of the European Union]. *Aktualni pytannia humanitarnykh nauk : mizhvuzivskiy zbirnyk naukovykh prats molodykh vchenykh Drohobyskoho derzhavnoho pedahohichnoho universytetu imeni Ivana Franka*. Drohobych : Vydavnychiy dim «Helvetyka», Vyp. 27, tom 3, pp. 102-106.

17. Korol O. D. (2016). Orhanizatsiia ekskursiinykh posluh u turyzmi : navch.-metod. Posibnyk [Organization of excursion services in tourism: teaching and methodological manual]. Chernivtsi : Chernivetskyi nats. un-t. 144 p.

18. Krivenko Ye. Ye., Pokolodna M. M. (2024). Suchasni innovatsiini formy provedennia ekskursii [Modern innovative forms of excursions conducting]. *Materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Suchasni tendentsii rozvytku industrii turyzmu ta hostynnosti: hlobalni vyklyky» (m. Kharkiv, 15 kvitnia 2024 r.)*. Kharkiv: KhNUMH imeni O.M. Beketova, pp. 252-254.

19. Lysiuk T. V., Tereshchuk O. S., Dmytruk O. O. (2018). Ekskursiine obsluhovuvannia u strukturi turystychnoho produktu [Excursion services in the structure of the tourist product]. *Prychornomorski ekonomichni studii*, 28 (1), pp. 175-178.

20. Mashika H. (2024). Osoblyvosti vykorystannia mobilnykh dodatkov v orhanizatsii ta provedenni ekskursii [Features of using mobile applications in organizing and conducting excursions]. *Innovatsii ta tekhnolohii v sferi posluh i kharchuvannia*, 1 (11), pp. 32-39.

21. Mystetstvo interpretatsii pryrody: naitsikavishe z treninhu WWF Ukraina dlia Kyivskoho zooparku [The art of nature interpretation: the most interesting from the WWF Ukraine training for the Kyiv Zoo] (2019). URL: <https://wwf.ua/?344371/interpretation-zoo>

22. Milinchuk O. V., Kyryienko Yu. O. (2015). Standartyzatsiia vitchyznianykh turystychnykh posluh v konteksti yevropeiskoi intehratsii [Standardization of domestic tourist services in the context of European integration]. *Visnyk Zhytomyrskoho derzhavnoho tekhnolohichnoho universytetu. Seriya : Ekonomichni nauky*, 2, pp. 169-174.

23. Neshcheretnyi B. S., Pokolodna M. M. (2024). Vykorystannia innovatsiinykh tekhnolohii na ekskursiiaakh [Using innovative technologies on excursions]. *Materialy III Mizhnar. nauk.-prakt. konf. «Suchasni tendentsii rozvytku industrii turyzmu ta hostynnosti: hlobalni vyklyky» (m. Kharkiv, 15 kvitnia 2024 r.)*. Kharkiv: KhNUMH imeni O. M. Beketova, pp. 254-255.

-
24. Orhanizatsiia turyzmu: pidruchnyk / Za zah. red. d.e.n., prof. V. Ya. Brycha (2017) [Tourism Organization: Textbook / Edited by Doctor of Economics, Prof. V. Ya. Brych]. Ternopil : TNEU, 448 p.
25. Pankiv M. M. (2023). Ekonomika vrazhen yak instrument zastosuvannia hotelnoho produktu [The experience economy as a tool for applying the hotel product]. *Hostynnist, servis, turizm: dosvid, problemy, innovatsii. Materialy Kh Mizhnar. nauk.-prakt. konf. (m. Kyiv, 6-7 kvitnia 2023 r.)*. Kyiv: KNUKIM, pp.370-371.
26. Sokol T. H. (2016). Vyznachennia fakhovykh kompetentnostei profesiinoi pidhotovky fakhivtsiv turystychnoho suprovodu z urakhuvanniam vymoh suchasnoho informatsiinoho suspilstva [Definition of professional competencies for professional training of tourism support specialists taking into account the requirements of the modern information society]. *Internet-osvita-nauka-2016 : Materialy Desiatoi mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii ION-2016 (11-14 zhovtnia 2016 r.)*. Vinnytsia: VNTU, pp 117-118.
27. Sokol T. (2019). Profesiina pidhotovka turystychnykh hidiv v Ukraini u svitli yevropeiskykh vymoh [Professional training of tourist guides in Ukraine in light of European requirements]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu kultury i mystetstv. Serii : Turizm*. T. 2. № 2, pp. 157-163.
28. Tekhnolohiia turystychnoi diialnosti : laboratornyi praktykum (2020) [Tourism technology: laboratory workshop] / ukl. T. D. Ckutar. Chernivtsi : Chernivets. nats. un-t im. Yu. Fedkovycha, 64 p.
29. Chubukova O. Yu., Yarenko A. V. (2016). Ekonomika vrazhen: peredumovy zarodzhennia, holovni idei, ekonomichna sutnist [The economy of impressions: prerequisites for its emergence, main ideas, economic essence]. *Visnyk Kyivskoho natsionalnoho universytetu tekhnolohii ta dyzainu. Serii : Ekonomichni nauky*, 6, pp. 92-98.

UDC 338.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.34>

Horozhankina N. A., Ph.D. in Geography, Associate Professor
Department of International Tourism and Hotel and Restaurant
Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-2773-8630

Korneyev M. V., Doctor of Economics, Professor,
Dean of the Faculty of Innovative Technologies
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-4005-5335

Shcholkova H. V., Ph.D. in Political Sciences, Associate Professor
Department of International Tourism and Hotel
and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0001-9396-9184

Dovhopolyi D. Ye., University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0003-9789-1013

CONSUMER LOYALTY PROGRAMS IN THE WORLD'S LARGEST HOTEL CHAINS

Types of consumer loyalty programs are considered depending on the number of participants, benefits, presence (absence) of entry barriers for participants. By increasing customer loyalty, hotels partially abandon the idea of maximizing revenue at the expense of customers, setting prices acceptable to them.

Consumer loyalty programs among well-known international hotel chains were analyzed, their pros and cons were highlighted. It was found that one of the attractive aspects of the Marriott Bonvoy loyalty program is the opportunity to stay for the fifth night for free, customers can transfer points to 40 partner airlines and have the opportunity to upgrade their room category and take advantage of the benefits of the executive lounge, consumer incentives include converting points into retail gift certificates, cruises, car rentals, tickets to concerts and sporting events. As of the beginning of 2023, the Marriott Rewards loyalty program covered more than 192 million regular customers. In addition, there is an incentive program, within the framework of which points are accrued for special events and banquets held in hotels according to a special scheme.

Hilton is offering a fifth night free. To use this opportunity, guests must have Hilton Silver elite status, which entitles them to room upgrades, free breakfast, and additional points. The hotel chain has become a leader in terms of development, with its membership growing by 110% between 2018 and 2023, reaching a total of 173 million members.

Hyatt offers numerous benefits within its loyalty program, including free breakfasts, waivers of resort fees and parking fees on award nights, and guaranteed room upgrades. Hyatt has more than 48 million loyal members.

Wyndham Rewards partners with Caesars Rewards from Caesars Entertainment. This allows all members to combine their accounts and earn and redeem points at Caesars properties; while elite members can earn corresponding status. As of September 2023, Wyndham had 105 million members (up 78% from 2018).

In terms of earning points, Choice has two credit cards developed in cooperation with other companies. As of September 2023, Choice Hotels had 60 million members (up 54% from 2018).

The Accor hotel chain contains many elite and luxurious offers. Points in the ALL program are divided into four levels of privileges. Using all the benefits of the loyalty program, it is possible to exchange the collected points for taxi rides, car rentals and rail travel. As of June 2023, Accor had 89 million members, which is 40% more than in 2019.

Among the types of consumer loyalty programs that are actively used by international hotel chains, the following are highlighted: rewards, special prices, free services, partner programs.

Key words: customer loyalty, consumer loyalty programs, hotel, hotel chain, hotel service, hotel room, international hotel chains.

Горожанкіна Н. А., Корнєєв М. В., Щолокова Г. В., Довгополій Д. Є. Програми споживчої лояльності у найбільших готельних мережах світу

Розглянуто типологію програм споживчої лояльності у найбільших готельних мережах світу в залежності від кількості учасників, переваг, наявності (відсутності) вступних бар'єрів для учасників. Підвищуючи лояльність клієн-

тів, готельні мережі частково відмовляються від ідеї максимізації доходів за рахунок клієнтів, встановлюючи прийнятні для них ціни. Проаналізовано програми споживчої лояльності серед відомих міжнародних готельних ланцюгів, виділено їх переваги та недоліки.

Встановлено, що однією з привабливих сторін програми лояльності Marriott Bonvoy є можливість безкоштовного проживання на п'яту ніч, при цьому клієнти можуть переводити бали до авіакомпаній-партнерів та мають змогу покращувати категорію номеру.

Програма лояльності Hilton дарує п'яту ніч проживання безкоштовно. Щоб скористатися цією можливістю, клієнти повинні мати елітний статус Hilton Silver, який дає право на покращення категорії номеру, безкоштовний сніданок та додаткові бали.

Міжнародна готельна мережа Hyatt Hotels Corporation пропонує численні переваги в межах своєї програми лояльності, включаючи безкоштовні сніданки, скасування курортних зборів та плати за паркування під час винагородних ночей, а також гарантоване підвищення категорії номерів.

Wyndham Rewards має партнерські відносини з Caesars Rewards від Caesars Entertainment. Це дає змогу всім учасникам об'єднати свої облікові записи й отримувати та використовувати бали у закладах Caesars; водночас учасники елітного рівня можуть отримати відповідний статус.

Щодо можливості заробітку балів, Choice має дві кредитні картки, розроблені у співпраці з іншими компаніями.

Готельна мережа Accor містить безліч елітних та розкішних пропозицій. Бали в програмі ALL розподілені на чотири рівні привілеїв. Використовуючи всі переваги програми лояльності, можливо обмінювати зібрані бали на поїздки у таксі, оренду автомобілів та подорожі залізницею.

Серед типів програм споживчої лояльності, які активно використовуються міжнародними готельними мережами, виділено наступні: винагороди, спеціальні ціни, безкоштовні послуги, партнерські програми.

Ключові слова: лояльність клієнтів, програми споживчої лояльності, готель, готельний ланцюг, готельна послуга, готельний номер, міжнародні готельні мережі.

Problem statement. Customer loyalty programs are designed to keep customers interested and intrigued for the longest possible period. Therefore, it is not easy to distinguish one from the others. Most hotel programs are rewards programs – they are multifaceted schemes that depend on a variety of factors, such as the number of properties, bonuses for intermediate stages, points validity, transition nights, free stays, etc.

The growing interest of many hotel companies in increasing customer loyalty is not only due to the fierce competition for customers among hotels, but also to this feature of the modern hotel market.

Loyalty programs ensure that consumers receive benefits when making repeat purchases from a company. This does not include one-off promotions, as such programs are aimed at encouraging consumers to stay in regular contact with a business over a long period of time.

In addition to stimulating demand for a company's products or services, loyalty programs also create value for customers. The customer can evaluate the program's usefulness at two stages (when points are accrued and when they are used).

Analysis of recent research and publications. The works of T.M. Baidak, V.O. Bolotova, M.H. Boiko, O.B. Hirna, L.I. Haieva, O.Ya. Kobylukh, K.V. Hurdzhyian, O.V. Zhehus, O.V. Illiashenko, O.V. Zozulov, M.M. Ivannikova, L.O. Ivanova, O.M. Muzyka, N.V. Kuzmynchuk, T.M. Kutsenko, O.Yu. Terovanesova, M.P. Mal'ska, I.H. Pandiak, Yu.S. Zanko and others were the theoretical and methodological basis of the study.

The goal of the article is to study consumer loyalty programs in the world's largest hotel chains.

Presentation of the main material. The hospitality sector tends to use various loyalty programs to obtain rewards, accumulate points, create exclusive clubs and establish partnerships with businesses working in other hospitality-related industries. Consumer loyalty is a conscious choice of a particular company among alternatives. Loyal customers are ready to bear additional costs (e.g., paying a higher room rate, spending extra time traveling, waiting for inconvenient check-in or check-out times, etc.) if they know that a particular hotel offers the hotel product or service they need most [1-9].

Currently, many loyalty programs can be divided into the following types depending on the number of participants and the benefits they receive: by number of participants (partnership; own), by benefits received by the buyer (programs related to the following material benefits; programs related to obtaining various kinds of privileges), by the presence (absence) of entry barriers or conditions for loyalty program participants (open; closed) [10].

However, it should be noted that by increasing consumer loyalty, hotels partially abandon the idea of maximizing revenue at the expense of customers by setting prices that are acceptable to them [10].

Customers participating in loyalty programs are entitled to additional discounts and more favorable accommodation conditions. Meanwhile, if a hotel customer is forced to buy a room at another competitor hotel for some reason, this does not have any negative consequences for them. The only possible consequence is that in the case of an accumulative program, the transition to the next level of the loyalty program is somewhat slower (i.e. there are no direct losses, only a loss of profit).

In other words, loyalty is not a one-way relationship (customer and hotel), but a two-way relationship (it means that the client is loyal to the hotel, and the hotel, in turn, is loyal to the client). Thus, loyalty programs are a

system of long-term relationships between customers and companies, in which both parties agree that immediate benefits can be reduced for the sake of future long-term cooperation [10].

There is no one hotel consumer loyalty program which is ideal for every traveler. Some programs offer more flexibility and prioritize earning points for free nights, while others emphasize special member-only privileges such as free Wi-Fi access or upgrading the room category.

So let's take a look at consumer loyalty programs among well-known international hotel chains.

According to the latest international estimates, Marriott, Hilton, Hyatt, Wyndham, Choice, Accor are considered to be the most well-known and attractive loyalty programs.

The Marriott hotel chain includes more than 30 brands and almost 8,700 properties in 139 countries and regions. One of the attractive aspects of the Marriott Bonvoy loyalty program is the possibility of a free fifth night stay. It's about the guest getting the night at the lowest price, spending zero points, if he or she books five bonus nights in a row [1].

Another advantage is that Marriott Bonvoy members can transfer points to 40 partner airlines (including Alaska Airlines Mileage Plan and Asiana Club). In addition, guests can upgrade their room category and enjoy the benefits of the executive lounge.

In addition, consumer rewards programs provide for the conversion of points into retail gift certificates, cruise trips, car rentals, tickets to concerts and sporting events [2].

The Marriott Bonvoy rewards programs provide for the use of points for stays at partner hotels, including payment for SPA treatments and restaurant visits [9]. Members have the opportunity to earn points for excursions, tour packages and transport services by booking them through Marriott or their travel partners, such as Uber. Additionally, members can increase their points by making everyday purchases with any Marriott Bonvoy credit card.

The pros and cons of the Marriott hotel chain's consumer loyalty programs are presented in Table 1.

Table 1

The pros and cons of the Marriott hotel chain's consumer loyalty programs

Pros	Cons
More than 7,000 participating hotels.	Suite Night Awards cannot be used for partial payment of accommodation.
Properties in more than 130 countries and located in cities, beaches, small towns, etc.	Rooms in high-end hotels are worth a lot of points.
Rewards can be used for hotel stays, flights, car rentals, cruises, and vacation vouchers.	The highest level of Marriott Bonvoy membership is more difficult to achieve than the highest level in the Hilton Honors and World of Hyatt programs.

Source: created by the authors based on [3]

By the beginning of 2023, the Marriott Rewards loyalty program had more than 192 million regular members. The incentive system, which awards points for organizing certain events and banquets at hotels under special arrangements, is popular with customers. The program is not limited in time. The points earned can be used to pay for cruises, resort stays, car rentals and other services. Most clients actively use the benefits of the program, accumulating points for using various services, but some avoid joining the club, fearing frequent newsletters and messages from the hotel [8].

Hilton is a hotel chain which has more than 1.1 million rooms in approximately 7,400 hotels located in 124 countries and territories. Also, it should be noted that Hilton has partnered with Amex Membership Rewards to allow the transfer of accumulated points. For every Amex point transferred, the customer receives 2 Hilton points.

The hotel giant also has four co-branded credit cards, all issued by American Express. Holders of these American Express cards automatically earn Hilton Honors Gold status as long as their card account remains active.

Hilton also gives the fifth night of stay for free. To take advantage of this opportunity, customers must have Hilton Silver elite status, which entitles them to upgrade the room category, free breakfast and additional points.

The pros and cons of the Hilton hotel chain's consumer loyalty programs are presented in Table 2.

Table 2

The pros and cons of the Hilton hotel chain's consumer loyalty programs

Pros	Cons
There are no blackout dates when using points to book a room.	Bonus points do not count toward gaining elite status.
More than 7,000 hotels and resorts around the world participate in consumer loyalty programs.	Members cannot earn hotel points and air travel for the same stay.
Resort fees are waived for all premium seats booked with points.	Free nights at top-tier hotels require a lot of points.

Source: created by the authors based on [1]

This hotel chain has become a leader in terms of development: in 2018-2023, the number of its members increased by 110%, reaching a total of 173 million people.

More than 1,200 hotels have joined the consumer loyalty program of World of Hyatt in more than 70 countries. Hyatt owns hotels exclusively in attractive resort areas and major cities.

Hyatt offers numerous benefits within its loyalty program, including free breakfasts, waived resort fees and parking fees during reward nights, and guaranteed upgrade of the room category [4].

Hyatt recommends using both personal and business credit cards to earn points, which is a highly effective solution.

Hyatt has more than 48 million loyal members.

The pros and cons of the Hyatt hotel chain's consumer loyalty programs are presented in Table 3.

Table 3

The pros and cons of the Hyatt hotel chain's consumer loyalty programs

Pros	Cons
Free nights in standard rooms start at 3,500 points per night.	Some elite membership benefits are not available at some hotels.
It is possible to earn and use points at hotels with different prices and styles.	Free nights bonuses are only available for standard rooms if the hotel has available rooms at the standard rate.
Elite members of the World of Hyatt and American Airlines Advantage programs can earn points and miles for stays and flights at the same time.	Rooms in the highest category of facilities are worth a lot of points.

Source: created by the authors based on [5]

Wyndham unites more than 9,000 hotels under 24 brands in 95 countries of the world, including some upscale hotels, but most of them are budget hotels.

Wyndham's economy brands, such as Super 8, Days Inn and Microtel, operate in regions where Hyatt or Marriott are not present.

Wyndham Rewards has a partnership with Caesars Rewards from Caesars Entertainment. This allows all members to combine their accounts and earn and use points at Caesars properties; at the same time, participants of the elite level can receive the appropriate status.

Additionally, customers can earn extra points on hotel services and daily purchases if they hold one of the three Visa Wyndham Rewards Earner credit cards.

The points earned can be used to pay for hotel stays, renting a home for a vacation, airline tickets, excursions and events, and to purchase gift cards and retail goods.

The pros and cons of the Wyndham hotel chain's consumer loyalty programs are presented in Table 4.

Table 4

The pros and cons of the Wyndham hotel chain's consumer loyalty programs

Pros	Cons
More than 8,000 facilities around the world.	It can take six to eight weeks to process partner rewards.
Qualifying nights can be postponed to the next year, which will make it easier to obtain a higher status.	The brand has a limited number of high-quality properties.
The free all-inclusive stay at the hotel includes meals, drinks, and amenities for two guests.	Membership bonuses are minimal until you achieve diamond status.

Source: created by the authors based on [4]

As of September 2023, Wyndham had 105 million members (an increase of 78% compared to 2018) [8].

Choice takes an honorable third place by amount of real estate after such international hotel chains as Wyndham and Marriott.

From time to time, the brand organizes promotions that allow you to accumulate points for a free night by fulfilling not very difficult conditions.

On the possibility of earning points, Choice has two credit cards developed in cooperation with other companies. Unfortunately, having Choice Privileges elite status doesn't come with any noticeable benefits. There is limited availability of superior rooms, and only a few brands offer free breakfast for top-tier elite program members.

The pros and cons of the Choice hotel chain's consumer loyalty programs are presented in Table 5.

As of September 2023, Choice Hotels had 60 million members (an increase of 54% compared to 2018) [8].

Accor has a wide portfolio of hotel brands (there are more than 40), which includes many upscale and luxury offers. Points in the ALL – Accor Live Limitless program are recognized as one of the most profitable rewards. Members can use them after accumulating 2,000 points or more to reduce the cost of their hotel bill by €40 (or the equivalent in another currency).

Table 5

The pros and cons of the Choice hotel chain's consumer loyalty programs

Pros	Cons
More than 7,400 participating hotels.	Free nights at Preferred Hotels & Resorts properties can be booked only by calling the Choice service center.
When staying in budget hotels, you can get free nights in top-tier hotels.	The points required for reward nights vary greatly depending on the property.
Members can earn points for hotel stays, car rentals, cruise vacations, eating in restaurants, and more.	Points can only be used at a limited number of hotels in the collection.

Source: created by the authors based on [1]

Most of Accor's hotels are concentrated in such regions of the world as Europe and Asia. The hotel chain does not offer its customers a compatible credit card to quickly accumulate points in the loyalty program.

The ALL program has four levels of privileges. The highest, Diamond, provides free breakfast on weekends (or daily in the Asia Pacific region), upgrading the room category and access to the executive lounge. Additional bonuses include, for example, free use of bicycles at Fairmont hotels.

Taking full advantage of the loyalty program, collected points can be exchanged for taxi rides, car hire and rail travel, due to Accor's cooperation with Europcar, Hertz and Eurostar.

The pros and cons of the Accor hotel chain's consumer loyalty program are presented in Table 6.

Table 6

The pros and cons of the Accor hotel chain's consumer loyalty program

Pros	Cons
Members can earn and exchange points at more than 4,200 participating hotels worldwide.	Points expire after 12 months of account inactivity.
Program members can use a combination of points and cash to pay for hotel stays.	A limited number of hotels in the USA.
Other travel and hotel services, including flights, car rentals, restaurants, and SPA treatments, will earn points.	It can be confusing to calculate the points-to-euros ratio to get a free night.

Source: created by the authors based on [1].

As of June 2023, Accor had 89 million members, which is 40% more than in 2019.

The relatively low growth rate can be attributed to three factors: delayed investments, slower development of joint credit card programs and a lower density of presence in many markets.

Some studies demonstrate that loyalty program commissions as a percentage of total spend are still generally lower than commissions of online travel agencies, which can range from 11% to 30%. But if you run an economy class hotel in a non-entertainment location, you may have more to contribute to the loyalty program than you get from the guests who earn rewards.

It can be noted that each customer's loyalty to the company and its services or products goes through different stages, but the main task of a hotel business is to create truly loyal customers. Truly loyal customers are regular buyers who purchase a wide assortment of the company's products, attract other customers and do not respond to competitors' offers.

Conclusions from this study and prospects for further research in this area. To summarise, the main recommendations for achieving the goal of our study are as follows. Among the types of loyalty programs, which are actively used by international hotel chains, the following can be distinguished: rewards – earning points for purchasing hotel services, the points earned can be used to pay for goods or hotel services; special prices – using discounts when hotels have various offers, discount programs motivate customers to make additional purchases; free services, which aim to develop relationships with hotel services consumers and encourage customers to purchase new services by offering some products within the same brand free of charge; partner programs – customers have possibility to receive rewards for purchasing products from partners.

Bibliography:

1. Best Hotel Rewards Programs for 2024-2025. URL: <https://travel.usnews.com/rankings/travel-rewards/hotel-rewards/>
2. Customer Loyalty: How To Build It For Your Hotel. URL: <https://surl.li/cicxkz>
3. Elevate customer loyalty through tailored experience. URL: <https://surl.li/gnomif>
4. Hospitality Loyalty Trends for 2023 – Comarch and The Loyalty People Report. URL: <https://surl.li/lumgtx>
5. Hotel Loyalty Race: Hilton Gains on Marriott. URL: <https://skift.com/2023/12/31/hotel-loyalty-race-hilton-gains-on-marriott/>

-
6. How To Increase Hotel Customer Loyalty By Improving The Guest Experience. URL: <https://surl.li/uqcqlv>
 7. Juga J., Juntunen J., Paananen M. Impact of value-adding services on quality, loyalty and brand equity in the brewing industry. *International Journal of Quality and Service Sciences*. 2018. Vol. 10. No. 1. P. 61–71.
 8. The Importance of Customer Loyalty Programmes in the Hospitality Industry. URL: <https://surl.cc/nkbqdy>
 9. Horozhankina N., Korneyev M., Farzullaev R. Marriott International's place in international hotel chains. *Науковий погляд: економіка та управління*. 2024. № 4 (88). С. 33–38.
 10. Жегус О. В., Ілляшенко О. В. Управління лояльністю клієнтів у закладах готельно-ресторанного господарства в умовах нових викликів. *Проблеми економіки*. 2020. № 3 (45). С. 118–125.

References:

1. Best Hotel Rewards Programs for 2024-2025. Retrieved from: <https://travel.usnews.com/rankings/travel-rewards/hotel-rewards/>
2. Customer Loyalty: How To Build It For Your Hotel. Retrieved from: <https://surl.li/cicxkz>
3. Elevate customer loyalty through tailored experience. Retrieved from: <https://surl.li/gnomif>
4. Hospitality Loyalty Trends for 2023 – Comarch and The Loyalty People Report. Retrieved from: <https://surl.li/lumgtx>
5. Hotel Loyalty Race: Hilton Gains on Marriott. Retrieved from: <https://skift.com/2023/12/31/hotel-loyalty-race-hilton-gains-on-marriott/>
6. How To Increase Hotel Customer Loyalty By Improving The Guest Experience. Retrieved from: <https://surl.li/uqcqlv>
7. Juga, J., Juntunen, J., Paananen, M. (2018). Impact of value-adding services on quality, loyalty and brand equity in the brewing industry. *International Journal of Quality and Service Sciences*, Vol. 10, No. 1, pp. 61–71.
8. The Importance of Customer Loyalty Programmes in the Hospitality Industry. Retrieved from: <https://surl.cc/nkbqdy>
9. Horozhankina, N., Korneyev, M., Farzullaev, R. (2024). Marriott International's place in international hotel chains. *Naukovy pohliad: ekonomika ta upravlinnia*, № 4 (88), pp. 33–38.
10. Zhehus, O. V., Illiashenko, O. V. (2020). Upravlinnia loialnistiu kliientiv u zakladakh hotelno-restorannoho hospodarstva v umovakh novykh vyklykiv [Customer loyalty management in hotel and restaurant establishments in the face of new challenges]. *Problemy ekonomiky*, № 3 (45), pp. 118–125.

Погребняк А. В., доктор технічних наук, професор
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Кучер М. М., кандидат економічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Сабіров О. В., кандидат технічних наук, доцент
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0003-3214-6410

Гриценко А. В., кандидат економічних наук
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-8986-0714

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ У ПРОЄКТУВАННІ ТА БУДІВНИЦТВІ ГОТЕЛЬНИХ ТА РЕСТОРАННИХ ОБ'ЄКТІВ

Розглянуто можливості зниження енергоспоживання та підвищення енергоефективності. Розглянуто теоретичні основи енергоефективності, законодавче обґрунтування впровадження основних принципів енергоефективного господарювання, необхідність використання відновлюваних джерел енергії, інноваційних матеріалів, технологій, систем управління. Розглянуто переваги впровадження «зеленого» дизайну, використання систем рекуперації тепла, сучасних систем освітлення, будівельних матеріалів, автоматизованої системи управління як будівлями готельно-ресторанних закладів у цілому, так і їх окремими системами функціонування. Доведено, що актуальність та необхідність реформування енергетичної системи є чи не першочерговим завданням для держави та приватного бізнесу, що дозволить значно підвищити свої спроможності щодо перспектив мінімізації енергоспоживання, впроваджуючи необхідні заходи з енергоефективності. Метою статті визначено проведення аналізу сучасних тенденцій у сфері енергоефективності будівництва готельних та ресторанных об'єктів, розгляду практичних прикладів і перспектив розвитку в цій галузі та надання пропозицій щодо впровадження розглянутих підходів. Завданнями дослідження виступали: визначення основних принципів енергоефективного проєктування готельних та ресторанных об'єктів; аналіз використання відновлюваних джерел енергії; проведення аналізу щодо використання інноваційних матеріалів та технологій; характеристика застосування «розумних», автоматизованих систем управління будівлями (BMS) готельно-ресторанних закладів; розгляд використання можливостей «зеленого» дизайну; аналіз необхідності проведення енергетичного аудиту задля оцінки енергетичної ефективності споруд. Впровадження сучасних технологій освітлення, теплоізоляції та водовідведення сприяє досягненню високих стандартів енергоефективності, що, своєю чергою, підвищує комфорт та безпеку для гостей готелів та ресторанів. Розвиток енергоефективності у будівництві готельних та ресторанных об'єктів є складним, але перспективним напрямом. Це не лише питання зниження витрат, але й важлива частина глобальної стратегії боротьби зі зміною клімату, що вимагає відповідального ставлення до використання ресурсів та впровадження інноваційних технологій для збереження планети.

Ключові слова: енергоспоживання, енергоефективність, інноваційні технології, екологічні вимоги, сертифікація, стандартизація, водоспоживання, утилізація, автоматизація, готель, ресторан.

Pogrebnyak A. V., Kucher M. M., Sabirov O. V., Grytsenko A. V. Energy efficiency in the design and construction of hotel and restaurant facilities

The article is devoted to one of the urgent problems of Ukraine's economy, namely, the possibility of reducing energy consumption and increasing the energy efficiency of production activities. The theoretical foundations of energy efficiency, the legislative justification for the implementation of the basic principles of energy-efficient management, the need to use renewable energy sources, innovative materials, technologies, management systems are studied. The advantages of implementing green design, the use of heat recovery systems, modern lighting systems, building materials, automated management system for both buildings as a whole and their individual functioning systems are considered. It is proved that the relevance and necessity of reforming the energy system of Ukraine is one of the top priorities for the state and private business, which will allow to significantly increase the capabilities regarding the prospects of minimizing energy consumption by implementing the necessary

energy efficiency measures. The purpose of the article is to analyze current trends in the field of energy efficiency in the construction of hotel and restaurant facilities, to consider practical examples and development prospects in this field, and to provide proposals for the implementation of the considered approaches. The objectives of the study were: to define the basic principles of energy-efficient design; to analyze the use of renewable energy sources; to analyze the use of innovative materials and technologies; to characterize the use of smart, automated building management systems (BMS); to consider the use of green design opportunities; to analyze the need for an energy audit to assess the energy efficiency of buildings. The article concludes with a list of the studied issues and proposals for the representatives of the hotel and restaurant business on their implementation. The introduction of modern lighting, thermal insulation and water drainage technologies contributes to achieving high standards of energy efficiency, which, in turn, increases comfort and safety for hotel and restaurant guests. The development of energy efficiency in the construction of hotel and restaurant facilities is a complex but promising direction. This is not only a matter of reducing costs, but also an important part of the global strategy to combat climate change, which requires us to be responsible in the use of resources and implement innovative technologies to preserve our planet for future generations.

Key words: energy consumption, energy efficiency, innovative technologies, environmental requirements, certification, standardization, water consumption, disposal, automation, hotel, restaurant.

Постановка проблеми. Актуальність та необхідність реформування енергетичної системи є чи не першочерговим завданням для держави та приватного бізнесу, що дозволить значно підвищити свої спроможності щодо перспектив мінімізації енергоспоживання, впроваджуючи необхідні заходи з енергоефективності. У сучасному світі питання енергоефективності стають одними з ключових у багатьох галузях, включаючи будівництво готелів та ресторанів. Зростання витрат на енергетичні ресурси, підвищені екологічні вимоги та посилення конкуренції на ринку стимулюють підприємства до пошуку нових рішень, які б дозволили знизити енергетичні витрати, покращити екологічні показники та підвищити комфорт для гостей і персоналу. У сфері будівництва готельних і ресторанних об'єктів енергоефективність стає не лише інструментом економії, але й важливим аспектом сталого розвитку. Готелі та ресторани, що дотримуються принципів енергоефективності, не тільки знижують свої витрати на енергоресурси, але й підвищують свою привабливість для екологічно свідомих споживачів. Це дозволяє їм займати провідні позиції на ринку та відповідати сучасним стандартам і вимогам. Застосування енергоефективних заходів у будівництві готелів і ресторанів передбачає комплексний підхід, що включає оптимізацію проектування, використання новітніх технологій.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Аналіз літературних джерел, що стосуються енергоефективності та інноваційних технологій в готельно-ресторанному бізнесі, демонструє широкий спектр тем, від енергоспоживання до впровадження сучасних систем автоматизації. Одним із джерел є стаття, яка охоплює сучасне енергоспоживання людства. Вона надає загальний огляд енергетичних потреб суспільства та підкреслює виклики, з якими стикаються країни в контексті енергоефективності. Ця інформація є важливою для розуміння загальної картини енергетичних витрат, що можуть бути корисними при формуванні концепції енергоефективності в готельно-ресторанному секторі, оскільки підвищення енергоефективності є критично важливим для зменшення витрат і покращення екологічного впливу підприємств [1]. Законодавство визначає правові основи для підвищення енергоефективності в країні, передбачає зобов'язання для підприємств, зокрема для готелів та ресторанів, щодо впровадження енергоефективних технологій. Законодавство про енергетичну ефективність формує рамки для енергетичної політики, що є надзвичайно актуальним для закладів готельно-ресторанного бізнесу, які прагнуть зменшити свої енергетичні витрати та вплив на навколишнє середовище. Енергозбереження може стати важливим чинником національної консолідації, а також обґрунтовують необхідність впровадження енергозберігаючих технологій у проектування та експлуатацію закладів. Цей ресурс є особливо цінним, оскільки пропонує стратегії для розвитку енергоефективних практик в готельно-ресторанному бізнесі [2]. Стаття В. Язіної, О. Вишнікіної та А. Погребняка присвячена сучасним системам автоматизації устаткування в ресторанному господарстві, детально розглядає вплив автоматизації на оптимізацію енергоспоживання. Автори підкреслюють, що використання автоматизованих систем не лише зменшує витрати на енергію, але й підвищує ефективність роботи закладів, що є критично важливим у сучасних умовах конкуренції. Це джерело має особливе значення для розуміння того, як технології автоматизації можуть бути інтегровані в системи безпеки та управління в готельно-ресторанних підприємствах [3]. Енергетичний аудит може виявити можливості для поліпшення енергоефективності в готельних і ресторанних закладах. Цей ресурс підкреслює, що аудит є важливим кроком у впровадженні змін, спрямованих на зменшення споживання енергії, і може слугувати основою для прийняття обґрунтованих рішень щодо інвестицій в енергоефективні технології [4]. Праця про європейські практики інвестування в зелене будівництво описує, як енергоефективні та екологічно чисті технології можуть бути інтегровані в проектування та експлуатацію. Вона може слугувати прикладом для підприємств, що прагнуть адаптувати європейський досвід до місцевих умов. Ця праця також пропонує практичні рекомендації щодо інвестування в зелене будівництво, що може підвищити енергоефективність закладів і сприяти їх сталому розвитку [5]. У праці [6] детально розглядаються різноманітні відновлювальні джерела енергії та їх роль в енергетичній політиці України. Це джерело є корисним для розуміння, як відновлювальні джерела можуть бути впроваджені

в готельно-ресторанному секторі для підвищення енергоефективності та зменшення екологічного сліду. Автори пропонують стратегії, які можуть допомогти підприємствам адаптувати свої енергетичні системи до сучасних вимог [6]. Отже, праці [1–6] формують базу для дослідження можливостей підвищення енергоефективності, впровадження інноваційних технологій та забезпечення безпеки в готельно-ресторанному бізнесі. Вони демонструють, як інтеграція нових технологій, автоматизація та дотримання законодавчих норм можуть стати ключовими аспектами розвитку цієї сфери в Україні.

Мета дослідження. Метою статті визначено проведення аналізу сучасних тенденцій у сфері енергоефективності будівництва готельних та ресторанних об'єктів, розгляду практичних прикладів і перспектив розвитку в цій галузі та надання пропозицій щодо впровадження розглянутих підходів.

Виклад основного матеріалу. Енергоефективність є важливим аспектом будівництва. У багатьох країнах існують жорсткі законодавчі вимоги щодо енергоефективності будівель. Такі стандарти, як LEED та BREEAM, встановлюють критерії для оцінки енергоефективності будівель. Виконання цих стандартів дозволяє не лише знижувати енергетичні витрати, але й отримувати податкові пільги та підвищувати екологічний рейтинг об'єктів. Для сфери будівництва енергетично ефективне проектування передбачається за рахунок використання наступних підходів: орієнтування будівель відносно сторін світу, з урахуванням «рози вітрів»; використання матеріалів з високими теплоізоляційними властивостями; оптимізація форм та розмірів будівлі; впровадження систем природного освітлення та вентиляції; впровадження енергоефективних систем опалення, кондиціонування та освітлення; використання відновлюваних джерел енергії; проведення енергетичного аудиту; сертифікація енергоефективності закладів готельно-ресторанного бізнесу [2].

Одним з основних трендів сучасного будівництва є перехід на відновлювані джерела енергії (ВДЕ). У готелях і ресторанах активно впроваджуються сонячні панелі, вітрові турбіни, геотермальні системи та теплові помпи. Наприклад, сонячні панелі можуть забезпечувати частину енергетичних потреб готелю або ресторану, що значно знижує витрати на електроенергію та скорочує викиди вуглекислого газу.

Інтеграція відновлюваних джерел енергії у готельні та ресторанні об'єкти дозволяє значно знизити залежність від традиційних енергетичних ресурсів. Зокрема, сонячні колектори можуть використовуватися для нагріву води, що є особливо актуальним для готелів із великою кількістю санітарних вузлів.

Геотермальні системи дозволяють використовувати тепло землі для опалення та охолодження приміщень, що забезпечує стабільне енергопостачання незалежно від погодних умов. Вітрові турбіни також можуть використовуватися для генерації електроенергії, зокрема у регіонах з постійними вітрами.

Сучасні матеріали, такі як вакуумні ізоляційні панелі, енергоощадні склопакети та теплоізоляційні штукатурки, дозволяють значно знизити теплові втрати будівлі. Наприклад, використання тришарових склопакетів з покриттям із низьким коефіцієнтом пропускання тепла сприяє підтримці оптимального температурного режиму в приміщеннях, що знижує потребу в додатковому опаленні або кондиціонуванні (табл. 1) [1–3].

Таблиця 1

Залежність показників енергоефективності будівель від видів використаних будівельних матеріалів

Матеріал	Тип будівлі	Економія енергії, %	Зменшення витрат на опалення, %
Вакуумні ізоляційні панелі	Готель	30	25
Енергозберігаючі склопакети	Ресторан	20	18
Теплоізоляційні штукатурки	Готель	15	12

Джерело: [1–3]

Розумні системи управління будівлями, або BMS, відіграють важливу роль у підвищенні енергоефективності. Вони дозволяють автоматизувати процеси управління опаленням, кондиціонуванням, вентиляцією, освітленням та іншими системами будівлі, забезпечуючи їх роботу в оптимальному режимі. Це не лише знижує енергетичні витрати, але й підвищує рівень комфорту для гостей. Наприклад, системи BMS можуть автоматично регулювати температуру в номерах готелю залежно від часу доби та наявності гостей. Це дозволяє знизити витрати на опалення та кондиціонування без зниження комфорту. У ресторанах розумні системи управління можуть забезпечити оптимальне освітлення та вентиляцію кухонь, що також сприяє підвищенню енергоефективності [3].

Зелений дизайн, що включає використання рослин для покращення теплоізоляції, очищення повітря та створення комфортного мікроклімату, набирає популярності в будівництві готельних і ресторанних об'єктів. Вертикальні сади, зелені дахи та інші елементи зеленого дизайну не лише підвищують енергоефективність, але й створюють унікальні умови для відпочинку гостей. Проведення енергетичного аудиту стає обов'язковим етапом перед введенням об'єктів у експлуатацію. Аудит дозволяє оцінити рівень енергоефективності будівлі та виявити можливі недоліки. За результатами аудиту видаються енергоефективні сертифікати, такі як LEED або BREEAM, які підтверджують відповідність об'єкта сучасним стандартам енергоефективності [4].

Заміна традиційних освітлювальних приладів на світлодіодні (LED) дозволяє значно знизити споживання електроенергії. Крім того, використання датчиків руху та систем автоматичного вимкнення освітлення допомагає уникнути непотрібних витрат енергії в готелях та ресторанах (табл. 2) [3,4].

Таблиця 2

Порівняння енергетичної ефективності різних типів освітлення в готелях та ресторанах

Тип освітлення	Середня тривалість служби, годин	Споживання енергії, Вт	Економія енергії, %
Лампи розжарювання	1 000	60	-
Люмінесцентні лампи	10 000	15	75
Світлодіодні лампи	25 000	7	88

Джерело: [3–4]

Системи рекуперації тепла дозволяють використовувати відпрацьоване тепло для підігріву свіжого повітря, що надходить у приміщення. Це значно знижує потребу в додатковому опаленні та підвищує енергоефективність будівлі. У готелях та ресторанах такі системи можуть використовуватися для підігріву води, вентиляції та кондиціонування повітря.

Застосування інноваційних будівельних матеріалів є важливою складовою енергоефективного будівництва. Сучасні теплоізоляційні матеріали, такі як аерогелі, пінополістирол та мінеральна вата, забезпечують високий рівень теплоізоляції, що дозволяє зменшити витрати на опалення та кондиціонування. Крім того, використання енергоощадних віконних систем із низькоемісійним покриттям сприяє зниженню втрат тепла через вікна. Це особливо важливо для готелів та ресторанів, де великі вікна є важливим елементом дизайну (табл. 3) [3,4].

Таблиця 3

Ефективність сучасних теплоізоляційних матеріалів

Матеріал	Теплопровідність, Вт/(м·К)	Зменшення втрат тепла, %
Аерогель	0.013	60
Пінополістирол	0.032	50
Мінеральна вата	0.040	45

Джерело: [3–4]

Інноваційні системи теплоізоляції та водовідведення є важливими елементами енергоефективного будівництва. Вони не лише забезпечують мінімізацію втрат тепла, але й сприяють оптимізації водоспоживання, що є важливим аспектом для готелів та ресторанів. Системи теплоізоляції включають використання сучасних матеріалів, таких як багатошарові ізоляційні панелі та термоплівки, які забезпечують високий рівень теплоізоляції при мінімальних витратах на встановлення та обслуговування. Системи водовідведення, що включають використання дощової води для технічних потреб, дозволяють знизити витрати на водопостачання та підвищити ефективність використання водних ресурсів (табл. 4) [3–5].

Таблиця 4

Ефективність різних систем теплоізоляції та водовідведення

Тип системи	Показники ефективності	Економія енергії/води, %
Багатошарові ізоляційні панелі	Зменшення втрат тепла до 40%	30
Використання дощової води	Зниження споживання води на 50%	50
Високоєфективні системи водовідведення	Оптимізація водоспоживання на 30%	30

Джерело: [3–5]

Дотримання санітарних норм та екологічних стандартів є обов'язковим аспектом при проектуванні та експлуатації готельних і ресторанних об'єктів. Ці вимоги спрямовані на забезпечення здоров'я та безпеки гостей, а також на зниження негативного впливу на довкілля [2,5,6].

Однією з ключових тенденцій у сучасному будівництві є використання екологічно чистих та безпечних матеріалів. Це включає вибір будівельних матеріалів з низьким вмістом летких органічних сполук (VOC), які не виділяють шкідливих речовин у навколишнє середовище і не погіршують якість повітря всередині приміщень. Використання природних матеріалів, таких як деревина з сертифікованих лісових господарств, або матеріалів, що піддаються вторинного перероблення, сприяє зменшенню вуглецевого сліду будівельних

проектів. Крім того, матеріали з високими теплоізоляційними властивостями знижують потребу в енергії для опалення та кондиціонування, що також є внеском у збереження довкілля.

Для підтвердження екологічності та енергоефективності будівель у готельному та ресторанному бізнесі широко використовуються міжнародні сертифікаційні системи. Отримання таких сертифікатів підтверджує відповідність будівлі високим стандартам енергоефективності, екологічності та безпеки, що є додатковою перевагою для готелів та ресторанів на конкурентному ринку. Сертифіковані об'єкти також приваблюють гостей, які піклуються про довкілля, що сприяє підвищенню їхньої привабливості та конкурентоспроможності [2,3].

Для зменшення споживання води та забезпечення дотримання санітарних норм у готелях та ресторанах використовуються системи автоматичного управління водоспоживанням. Такі системи включають використання економічних змішувачів, які знижують витрату води, а також установку систем реутилізації води, що дозволяє повторно використовувати технічну воду для поливу зелених насаджень або змиву в туалетах. Ці технології не лише допомагають знизити операційні витрати, але й сприяють збереженню водних ресурсів, що є критично важливим у сучасних умовах. Впровадження таких систем особливо актуальне у регіонах з обмеженим водопостачанням або в умовах підвищеної екологічної відповідальності.

Готельні та ресторани об'єкти генерують значні обсяги відходів, тому важливою складовою їхньої роботи є впровадження ефективних систем утилізації. Це може включати роздільний збір відходів для подальшого перероблення, компостування органічних відходів, а також використання біогазових установок для перероблення харчових відходів. Впровадження таких систем дозволяє зменшити обсяг відходів, що надходять на полігони, та сприяє розвитку циркулярної економіки, де ресурси використовуються максимально ефективно.

Розвиток енергоефективних технологій не зупиняється на досягнутому, і в найближчому майбутньому можна очікувати появи нових рішень, які дозволять ще більше підвищити енергоефективність готельних і ресторанних об'єктів. Це може включати впровадження більш ефективних систем автоматичного управління енергоспоживанням, використання нових типів відновлюваних джерел енергії, а також подальший розвиток будівельних матеріалів з покращеними ізоляційними властивостями. У табл. 5 представлені основні тенденції розвитку інноваційних технологій енергоспоживання, енергозбереження та енергоефективності у готельно-ресторанному бізнесі [6].

Таблиця 5

Перспективи розвитку енергоефективних технологій у готельно-ресторанному бізнесі

Технологія	Очікувані переваги	Ймовірний термін окупності
Сучасні системи автоматизації енергоспоживання	Підвищення ефективності управління енергоспоживанням	2-3 роки
Вдосконалені відновлювані джерела енергії	Зниження витрат на електроенергію та опалення	3-5 років
Інноваційні будівельні матеріали	Підвищення теплоізоляції та зниження енергетичних втрат	1-2 роки
Диверсифікація енергетичних джерел	Зниження ризику залежності від традиційних джерел енергії	В залежності від вибору джерел

Джерело: [6]

Висновки. Проведене дослідження дозволяє зробити висновки щодо енергоефективності у будівництві готельних та ресторанних об'єктів, а також окреслити перспективи розвитку цієї галузі. Енергоефективність є ключовим фактором у сучасному будівництві, особливо у готельному та ресторанному бізнесі. Розглянуто практичні аспекти впровадження енергоефективних рішень. Впровадження сучасних технологій освітлення, теплоізоляції та водовідведення також сприяє досягненню високих стандартів енергоефективності, що, своєю чергою, підвищує комфорт та безпеку для гостей готелів та ресторанів. Крім того, дотримання санітарних норм та екологічних стандартів забезпечує відповідність будівель найсуворішим вимогам. Галузь енергоефективності не стоїть на місці, і в найближчі роки очікується поява нових технологій та рішень, що дозволять ще більше підвищити енергоефективність готельних і ресторанних об'єктів. Серед перспективних напрямів можна виділити: очікується вдосконалення технологій сонячної та вітрової енергетики, що дозволить знизити витрати на електроенергію та забезпечити стабільне енергопостачання незалежно від зовнішніх умов; інноваційні системи автоматизації енергоспоживання зможуть ще точніше контролювати та оптимізувати роботу інженерних систем, знижуючи витрати енергії та забезпечуючи комфортні умови для гостей; розробка нових матеріалів з покращеними теплоізоляційними властивостями дозволить значно знизити втрати тепла та підвищити ефективність будівель; ці та інші інновації дозволять будівлям готелів та ресторанів досягати ще вищих показників енергоефективності, знижуючи операційні

витрати та підвищуючи їхню конкурентоспроможність на ринку. У результаті, впровадження таких рішень буде сприяти сталому розвитку галузі та забезпеченню високих стандартів якості обслуговування; впровадження систем реутилізації відходів та використання вторинної сировини стане важливим кроком до зменшення вуглецевого сліду будівельних проєктів та сприятиме збереженню природних ресурсів. Вищезазначені інноваційні пропозиції дозволять будівлям готелів та ресторанів досягати ще вищих показників енергоефективності, знижуючи операційні витрати та підвищуючи їхню конкурентоспроможність на ринку. Розвиток енергоефективності у будівництві готельних та ресторанних об'єктів є складним та перспективним напрямом. Це не лише питання зниження витрат, але й важлива частка глобальної стратегії боротьби зі зміною клімату, що вимагає від нас відповідального ставлення до використання ресурсів та впровадження інноваційних технологій для збереження планети.

Список використаних джерел:

1. Вікіпедія. Енергоспоживання. URL: <https://surl.li/sbtgsh>
2. Перегуда Є.В., Стойко О.М., Деревінський В.Ф., Семко В.Л., Мамонтов І.О., Місержи С.Д. Політика енергоефективності та енергозбереження як чинник національної консолідації : проблеми формування та реалізації : Монографія. Київ Тернопіль : «Бескиди», 2018. 203 с.
3. Язіна В., Вишнікіна О., Погребняк А. Сучасні системи автоматизації устаткування підприємств ресторанного господарства. *Економіка та суспільство*. Вип.33. 2021. URL: <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-60>
4. Проведення енергетичного аудиту. Перша будівельна експертиза. <https://pbe.ua/energo-certifikate-50>
5. Чала В.С., Орловська Ю.В., Глущенко А.В. Європейські практики інвестування зеленого будівництва: підручник Д.: ПДАБА. 2023. 148 с.
6. Відроджені джерела енергії / За заг. ред. С.О. Кудрі. Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАНУ, 2020. 392 с.

References:

1. Wikipedia. Energhospozhyvannia. <https://surl.li/sbtgsh>
2. Perehuda Ye.V., Stoiko O.M., Derevynskiy V.F., Semko V.L., Mamontov I.O., Miserzhy S.D. (2018). Polityka enerhoefektyvnosti ta enerhozberezhennia yak chynnyk natsionalnoi konsolidatsii : problemy formuvannia ta realizatsii : Monohrafiia. Kyiv-Ternopil : "Beskydy". 203 p.
3. Yazina, V., Vyshnikina, O., Pohrebniak, A. (2021). Suchasni systemy avtomatyzatsii ustatkuvannia pidpriemstv restorannoho hospodarstva. *Ekonomika ta suspilstvo*, (33). <https://doi.org/10.32782/2524-0072/2021-33-60>
4. Provedennia enerhetychnoho audytu. Persha budivelna ekspertyza. <https://pbe.ua/energo-certifikate-50>
5. Chala V.S., Orlovska Yu.V., Hlushchenko A.V. (2023). Yevropeiski praktyky investuvannia zelenoho budivnytstva: Pidruchnyk. D.: PDABA. 148 p.
6. Vidnovliuvalni dzherela enerhii (2020) / Za zah. red. S.O. Kudri. Kyiv: Instytut vidnovliuvanoi enerhetyky NANU. 392 p.

UDC 338.4

DOI <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.36>

Yudina O. I., Doctor of Economics, Professor Department of International Tourism and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0003-3699-5321

Nebaba N. O., Doctor of Economics, Professor Department of Economic Modeling, Accounting and Statistics
Oles Honchar Dnipro National University
ORCID: 0000-0003-1264-106X

Saihak Ye. L., PhD Department of International Tourism and Hotel and Restaurant Business
University of Customs and Finance
ORCID: 0000-0002-6406-9272

Tatarenko D. K., Higher Education Student
University of Customs and Finance
ORCID: 0009-0006-6237-6558

PECULIARITIES AND MODERN TRENDS IN THE ORGANIZATION OF HOTEL SERVICES

The article examines the specific features and components of the service process organization in hotel establishments, as well as the current trends in its development that contribute to enhancing the quality and efficiency of hotel services. The objective of this article is to analyze and characterize the main elements involved in the organization of hotel service processes and to identify innovative directions for its development in the present-day context.

The study investigates the stages of organizing the hotel service process and outlines their essential content. The factors influencing the quality of hotel services are identified and described, including staff training, hotel infrastructure and equipment, management efficiency, personalized customer service, implementation of new technologies, effective communication, partnerships, and feedback mechanisms. Based on the conducted analysis, the article highlights contemporary directions in organizing hotel service, such as the integration of new information and communication technologies (ICT), optimization via popular media platforms, the efficient role of a Social Media Marketing (SMM) manager, and the establishment of barter agreements. These contemporary approaches allow accommodation facilities to minimize advertising costs while significantly enhancing brand awareness and attracting new clientele. Using the experience and skills of an SMM manager ensures the successful implementation of a marketing strategy and a positive impact on the organization of the customer service process.

The introduction of ICT innovations, characterized by the use of media platforms such as Facebook, Instagram, LinkedIn, and TikTok, the development and implementation of SMM manager responsibilities, and the formation of barter agreements with celebrities and influencers for promotional purposes represent current trends in hotel service organization that impact the growth of service quality and operational performance of hotel enterprises. The factors that influence the quality of service to consumers of hotel services have been identified, as well as modern directions for organizing the service process and approaches to improving its efficiency and quality have been established. They can be used in further research for planning activities on a progressive basis and for developing strategies for hotel establishments.

Key words: service organization, hotel, modern trends, social networks, media platforms, information and communication technologies, SMM manager, enterprise, service quality, efficiency.

Юдіна О. І., Небаба Н. О., Сайгак Є. Л., Татаренко Д. К. Особливості та сучасні напрями організації готельного обслуговування

Розглянуто особливості та складові організації процесу обслуговування в закладах готельного господарства, а також сучасні напрями його розвитку. Метою статті є аналіз та характеристика основних складових організації процесу обслуговування споживачів готельних послуг, визначення прогресивних напрямів його розвитку в сучасних умовах. Розглянуто етапи організації процесу готельного обслуговування, розкрито їх основний зміст. Визначено та описано фактори, що впливають на якість обслуговування споживачів готельних послуг, до яких відносяться: професійна підготовка персоналу, стан та обладнання готелю, ефективність управління готелем, індивідуальний підхід до споживачів, застосування нових технологій, ефективна організація комунікацій, співробітництво з партнерами, зворотний

зв'язок. Виявлено сучасні напрями організації готельного обслуговування: впровадження нових інформаційно-комунікаційних технологій, їх удосконалення шляхом використання популярних медіа-платформ, забезпечення ефективної роботи SMM-менеджерів та укладання бартерних угод. Сформовано цільові групи споживачів для роботи в соціальних мережах, а також перелік завдань та план робочого дня SMM-менеджера, що дозволяє закладам готельного господарства мінімізувати витрати на рекламу, при цьому значно посилювати пізнаваність бренду та залучати нових клієнтів. Використання досвіду та навичок SMM-менеджера забезпечує успішну реалізацію маркетингової стратегії та позитивний вплив на організацію процесу обслуговування споживачів. Впровадження інформаційно-комунікаційних нововведень, що характеризуються використанням популярних медіа-платформ, розробка функцій SMM-менеджера та їх реалізація у процесі управління, а також укладання бартерних угод являють собою сучасні напрями організації готельного обслуговування, які впливають на зростання рівня якості послуг та ефективності діяльності готельних підприємств, зміцнення їх конкурентних позицій. Визначені фактори, що впливають на якість обслуговування споживачів готельних послуг, а також встановлені сучасні напрями організації процесу обслуговування та підходи до підвищення його ефективності й якості можуть використовуватися у подальших дослідженнях для планування діяльності на прогресивній основі та стратегії розвитку закладів готельного господарства.

Ключові слова: організація обслуговування, готель, сучасні напрями, соціальні мережі, медіа-платформи, інформаційно-комунікаційні технології, SMM-менеджер, підприємство, якість послуг, ефективність.

Problem statement. Today, hotel operations are aimed not only at providing temporary accommodation and comfortable living conditions for guests but also represent a complex set of economic, organizational, and technological processes. The strengthening of competitive positions and sustainable development of accommodation facilities are largely influenced by the effectiveness and quality of customer service. These are driven by technical and technological updates, innovation implementation, service individualization, and the availability of professionally trained personnel, which altogether characterize the features of hotel service organization.

Analysis of research and publications. Issues related to hotel service organization, its directions and development aspects in a modern market environment have been explored by numerous researchers. L. Chepurda and L. Ivashyna have studied the challenges in organizing the activities of domestic hotel enterprises under crisis conditions [1]. A. Diakonova, F. Trishin and others have explored the implementation of reengineering based on innovative technologies and management information systems, which enhances service quality and efficiency [2]. V. Kifyak's and others research identifies factors significantly influencing the development and effectiveness of the hotel and restaurant business, including internal aspects such as staff training, establishment of a favorable moral and psychological climate, adaptability to market dynamics, innovative approaches, investment policy, and service quality [3]. However, the identification of differentiated approaches to improving service technologies and the management of functional units, as well as determining innovative development directions, remains relevant.

The aim of the article is to analyze and characterize the main elements of organizing hotel service processes and determine innovative directions for their development under current market conditions.

Main content presentation. Hotel service is a type of business that is developing very rapidly and, therefore, is characterized by a high level of competition. The process of providing hotel services is regulated by quality standards, is cyclical in nature, and is divided into several business processes that are carried out in a certain sequence. An important parameter for assessing hotel service is the hotel rating, which is formed based on consumer reviews on booking websites, in social networks, and on other web resources. The collection of operational information using information and communication technologies and media platforms enables accommodation facilities to promptly identify and eliminate shortcomings in their operations and to improve service quality. The quality of the service process organization depends on the precise and highly professional execution of technological operations in accordance with a defined algorithm that characterizes the main stages of hotel service organization, and begins with the reception and registration of guests through various communication channels (online booking, social networks, telephone networks, and direct contact within the facility). The subsequent stages include: guest accommodation services within the room inventory, provision of food services, core and additional services, and the final stage involves the organization of guests' departure from the hotel (Fig. 1).

Thus, the organization of the service process in an accommodation facility consists of a set of stages, each of which plays a significant role in creating a convenient, comfortable, and pleasant environment for guest stay and in ensuring a high level of hotel service quality. The quality of guest service depends on a range of factors that influence this process (Table 1). Key factors include: professional training of personnel, the condition and equipment of the hotel, efficiency of hotel management, personalized approach to consumers, implementation of new technologies, effective communication management, cooperation with partners, and feedback mechanisms.

In the current context of socio-economic instability in the country, there is a growing need to ensure the economic resilience of enterprises, which is aimed at meeting dynamic needs through the implementation of advanced technologies and the improvement of management systems. These measures, in turn, contribute to enhancing financial and economic efficiency, improving goal-oriented activities of business entities, and increasing the quality of service provision [4, p. 162].

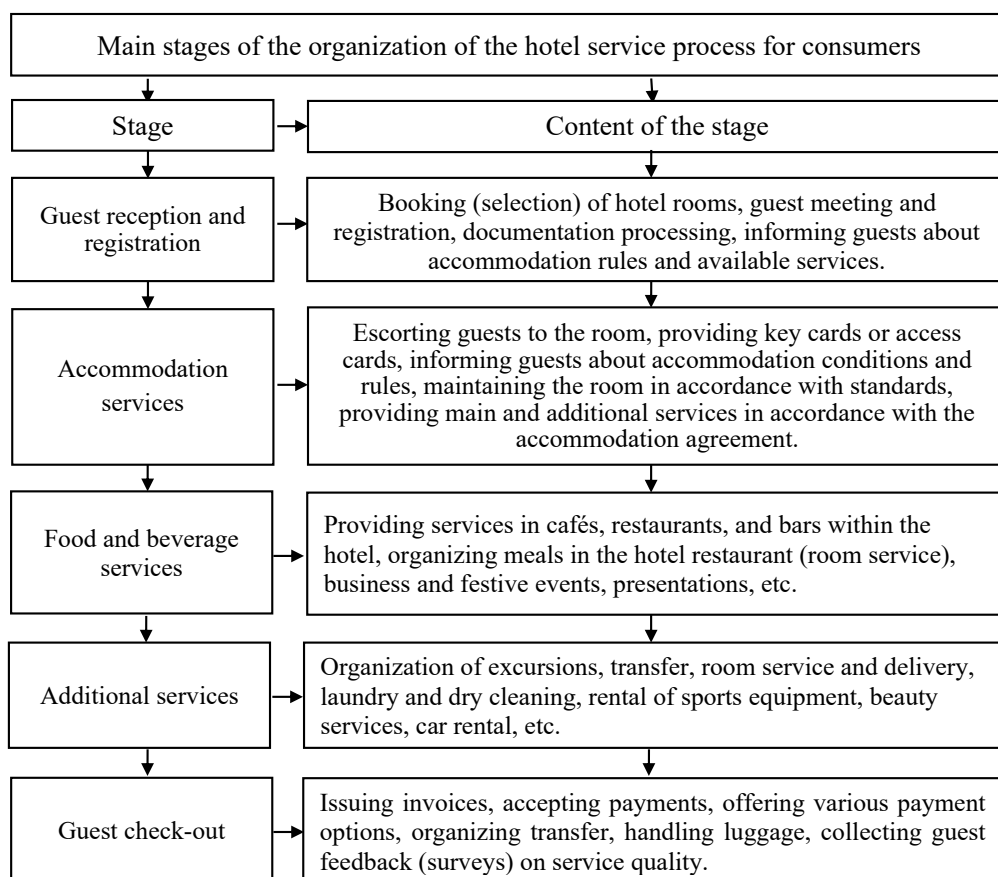


Fig. 1. Main stages of the organization of the hotel service process for consumers

Source: compiled by the authors

Table 1

Factors influencing the quality of hotel services

Factor	Description
Professional staff training	The qualification level and skills of hotel personnel, their knowledge of service procedures and standards, communication competencies, and ability to interact effectively with guests.
Condition and equipment of the hotel	The condition of the building, furniture, and equipment; cleanliness and order in the hotel; availability of necessary amenities and services for guests, such as wireless Internet, parking, gym, pool, etc.
Efficiency of hotel management	The effectiveness of the hotel's management system, including the distribution of duties and responsibilities, development and adherence to service standards, quality control, and continuous process improvement.
Personalized approach to consumers	The ability of the hotel to provide personalized service, taking into account the individual needs and preferences of each guest, and responding to their requests and complaints attentively and promptly.
Use of new technologies	The use of modern information and communication technologies to facilitate and automate service processes, as well as to ensure guest access to necessary information and services through IT tools.
Communication organization	The quality of communication between hotel staff and guests, as well as among different hotel departments; the ability to resolve conflicts effectively and interact with clients considering their needs and expectations.
Cooperation with partners	Collaboration with other providers and partners such as travel agencies, restaurants, and transport companies to offer additional services and ensure comprehensive guest satisfaction.
Evaluation and feedback	Collection of guest reviews and evaluations regarding their stay experience, and the hotel's ability to use this information to improve service quality and respond to specific customer needs.

Source: compiled by the authors

Modern tools and directions in the organization of hotel service that contribute to enhancing the economic resilience of enterprises, as well as the quality and efficiency of service provision, include the Internet and information and communication technologies. These tools help reduce costs, facilitate consumer access to various types of accommodation establishments, promote their visibility, and ensure leading competitive positions in the hotel services market.

An important role in the development of information and communication technologies and in improving the service process within a hotel belongs to the SMM manager (Social Media Marketing Manager). The SMM manager is responsible for brand promotion and the advancement of products or services on online platforms. This specialist develops and implements strategies aimed at attracting and retaining consumers, enhancing the hotel's reputation, shaping a favorable image of the accommodation facility, and maintaining stable communication ("feedback") with the target audience. The manager analyzes the behavior and interests of both existing and potential consumers of the hotel product, their influence on the service process, and fosters interaction with various user communities on media platforms.

The functional responsibilities of the social media manager are formulated depending on the development directions required to increase the efficiency of automated information processing systems and the quality level of hotel service. Promotional activities for a business entity's brand and services on social networks are tailored to the target audience that the business intends to reach. According to the conducted analysis, the media platforms and the age categories of their users have been identified, which show specific preferences when choosing hotel products. This enables the identification of target audiences and the organization of the SMM manager's work in accordance with targeted directions (Table 2).

The presented evaluative characteristics of the functioning and use of modern computer technologies in the process of organizing hotel service make it possible to formulate a set of tasks for the SMM manager and to define the ways of their implementation (Table 3).

Table 2

Characteristics of the target audience of hotel product consumers for organizing the activities of the SMM manager

Age group	Key characteristics of the target group	Communication channels	Potential interests and needs
18–24 years	Young, active individuals; frequent users of social media and mobile applications	Instagram, TikTok, Facebook, YouTube	Active recreation, adventures, traveling with friends, budget-friendly accommodation
25–34 years	Young professionals and couples; interested in comfortable leisure	Instagram, Facebook, LinkedIn, YouTube	Romantic getaways, luxury vacations, sports events, convenient conditions for both work and rest
35–44 years	Families, often travel with children; interested in high-quality service	Facebook, Instagram, LinkedIn, YouTube	Family vacations, child-friendly amenities, wellness and relaxation programs, quality dining
45–54 years	Experienced travelers; interested in comfort and exclusive services	Facebook, LinkedIn, YouTube	Comfortable and peaceful vacations, cultural events, gastronomic tourism, wellness programs
55+ years	Retirees; looking for calm and safe leisure experiences; interested in high-quality service	Facebook, YouTube	Peaceful vacations, wellness and medical programs, cultural and historical excursions, elder-friendly amenities

Source: compiled by the authors

Table 3

List of tasks for the hotel SMM manager regarding the development of information and communication technologies and the service process

№	Task	Task description	Implementation methods
1	2	3	4
1	Studying the target audience	Conduct an analysis of existing and potential consumers to identify the main demographic groups and their needs	Use of analytical tools, conducting surveys, analysis of user feedback and behavior on social media
2	Developing a content strategy	Create a detailed content plan for social media that considers seasonality, audience specifics, and key events	Development of a monthly content plan including text posts, photos, videos, stories, and other content formats
3	Content publication and audience interaction	Regularly publish content and actively engage with followers by responding to comments and messages	Planning and implementing posts across various social networks, monitoring user activity, and responding to inquiries

Table 3 (Continued)

1	2	3	4
4	SMM performance analysis	Continuously analyze the outcomes of SMM activities and adjust the strategy accordingly	Use of analytical tools to monitor performance indicators such as user engagement, reach, number of followers, interactions, and conversions
5	Managing advertising campaigns	Create and manage targeted advertising campaigns to attract new consumers and promote special offers	Setting up and launching ad campaigns via Facebook Ads, Instagram Ads, Google Ads; analyzing their performance and optimization
6	Conducting contests and promotions	Organize contests and promotions on social networks to increase follower engagement and activity	Development of contest terms and conditions, announcement publication, result monitoring, and winner determination

Source: compiled by the authors

To ensure the effective execution of the assigned tasks, it is necessary to develop a work schedule for the SMM manager (Fig. 2).

08:00 - 09:00
Monitoring news and trends on social media; analyzing competitor activity
09:00 - 10:00
Daily content planning: selecting content, writing texts, preparing visual materials
10:00 - 11:00
Publishing content on social media (Facebook, Instagram, LinkedIn, TikTok) according to the content plan
11:00 - 12:00
Interaction with followers: responding to comments and messages, monitoring activity on social media
12:00 - 13:00
Preparing and launching targeted advertising campaigns: audience targeting, budgeting, creative development
13:00 - 14:00
Lunch break
14:00 - 15:00
Analyzing the effectiveness of publications and advertising campaigns: collecting and analyzing statistics, report preparation
15:00 - 16:00
Developing the content plan for the following week: idea generation, team discussions
16:00 - 17:00
Organizing promotions and contests: drafting terms and conditions, creating publications, coordinating with other departments
17:00 - 18:00
Training and development: studying new SMM tools and methods, participating in webinars and training sessions
18:00 - 19:00
Interaction with followers: evening monitoring of user activity, responding to comments and messages

Fig. 2. Daily work plan of a hotel SMM manager

Source: compiled by the authors

As a result of identifying the most popular media platforms and segmenting their users based on consumer preferences, specific directions are outlined for organizing the work of the SMM manager. These directions support the development of information and communication (computer) technologies and contribute to improving the quality of hotel service provision (Table 4).

Table 4

Areas of SMM manager activity based on the media platforms Instagram and TikTok

Media platform	Criterion	Areas of activity
Instagram	Age categories	Developing content for young adults (18–34 years); publishing stylish photos, reviews, and promotional campaigns.
TikTok	Age categories	Creating entertaining content for youth (10–29 years); using challenges and dance videos.
Instagram	Growth rate	Investing in the platform to ensure steady audience growth; implementing targeted advertising campaigns.
TikTok	Growth rate	Active use to attract a new, younger audience; launching viral marketing campaigns.
Instagram	Average time spent on the platform	Engaging the audience through Stories, Reels, IGTV, interactive polls, and Q&A sessions.
TikTok	Average time spent on the platform	Creating dynamic videos; engaging through comments and live streams; participating in trending formats.
Instagram TikTok	Popularity trends	Analyzing trends to adapt content strategy; monitoring user engagement and adjusting campaign performance accordingly.

Source: compiled by the authors

Another modern direction in the organization of hotel service and an important function of the SMM manager in the hospitality industry, which contributes to the improvement of this process, is the conclusion of barter agreements. These serve as an effective tool for brand promotion, expansion of the target audience, enhancement of communication quality, and improvement of interaction with consumers. The most common form of barter in the hotel business is providing complimentary stays to celebrities and influencers in exchange for advertising and promotion of the accommodation facility. The organization of such interactions under barter conditions consists of several stages.

The first stage is goal setting, during which conditions are created to attract new consumers, promote the brand, and increase the number of bookings. The second stage—partner selection—involves identifying influencers, celebrities, and bloggers whose audiences match the hotel's target market, as well as reviewing their previous promotional campaigns and feedback. The third stage includes negotiation and agreement of barter terms, under which influencers are offered complimentary accommodation and services in exchange for advertising posts, stories, and reviews on social media. The final, fourth stage entails discussion of the agreement details and formalization of the contract. The agreement typically specifies the duration of stay, quantity and type of promotional content, key messages, and hashtags to be used.

Organizing cooperation with influencers requires the SMM manager to carry out the following tasks:

1. Identifying and selecting influencers, including profile analysis, initiating contact, and verifying their audience demographics.
2. Conducting negotiations to agree on the terms of cooperation and drafting written agreements.
3. Coordinating the influencer's visit, which includes arranging arrival and ensuring a comfortable stay.
4. Monitoring the execution of the agreement by collecting analytics, verifying publications, and compiling performance reports.
5. Evaluating effectiveness based on analysis of the impact on booking numbers, social media follower growth, and overall brand recognition.

Barter agreements represent a contemporary direction in hotel service organization, an effective communication mechanism for engaging with the market environment, and a marketing method for promoting the hotel product. They enable accommodation establishments to minimize advertising expenses while significantly enhancing brand recognition and expanding their customer base. This, in turn, improves the quality and efficiency of the service process. Enhancing two-way communication via digital platforms increases consumer awareness about the hotel, provides insight into their preferences and needs, and thus allows for business process optimization and service quality improvement based on the obtained information. Leveraging the experience and competencies of the SMM manager ensures the successful implementation of the marketing strategy and has a positive impact on the organization of consumer service processes.

Conclusions. Thus, the implementation of information and communication innovations characterized by the use of popular media platforms, the development of SMM manager functions and their integration into management

processes, as well as the conclusion of barter agreements, represent modern trends in the organization of hotel service. These factors contribute to improving the quality of services and the operational efficiency of hotel enterprises, thereby strengthening their competitive positions. The identified factors influencing the quality of consumer service, along with the established modern directions of service process organization and approaches to enhancing its effectiveness and quality, may be applied in further research to guide strategic planning and progressive development of accommodation establishments.

Bibliography:

1. Чепурда Г.М., Івашина Л.Л. Проблеми розвитку готельного господарства у місті Черкаси під час пандемії. *Інновації та технології в сфері послуг і харчування*. 2020. № 2. С. 5–12.
2. Д'яконова А.К., Трішин Ф.А., Тітомир Л.А., Коротич О.М. Інноваційні напрямки розвитку закладів готельного господарства. *Економіка харчової промисловості*. 2021. Т. 13, вип. 1. С. 62–68.
3. Сфера гостинності Буковини в кризових умовах: стан та перспективи розвитку: монографія / колектив авторів за загальною редакцією д.е.н., професора Кицяка В. Ф.: Чернівці: Чернівецький торговельно-економічний інститут КНТЕУ, 2021. 220 с.
4. Юдіна О. І. Моделювання сталого економічного розвитку підприємств готельно-ресторанного бізнесу на основі декомпозиційного аналізу. *Економічний простір*. 2022. № 181. С. 162–167.

References:

1. Chepurda, H.M., Ivashyna, L.L. (2020) Problemy rozvytku hotel'noho hospodarstva u misti Cherkasy pid chas pandemiyi. [Problems of hotel development in the city of Cherkasy during the pandemic]. *Innovations and technologies in the field of services and food*, No. 2, pp. 5–12.
2. Diakonova, A.K., Trishyn, F.A., Titomyr, L.A., Korotych, O.M. (2021) Innovatsiyni napryamky rozvytku zakladiv hotel'noho hospodarstva. [Innovative directions of development of hotel establishments]. *Economics of the Food Industry*, vol. 13, issue 1, pp. 62–68.
3. Sfera hostynnosti Bukovyny v kryzovykh umovakh: stan ta perspektyvy rozvytku: monohrafiya / za zah. red. Kyfyaka V.F. [The hospitality sector of Bukovina in crisis conditions: state and development prospects: monograph / edited by Kyfyak, V.F.] (2021). Chernivtsi.
4. Yudina, O.I. (2022) Modelyuvannya stalogo ekonomichnogo rozvytku pidpriyemstv gotelno-restorannogo biznesu na osnovi dekompozitsijnogo analizu [Modeling of sustainable economic development of hotel and restaurant business enterprises based on decomposition analysis]. *Economic Space*, No. 181, pp. 162–167.