

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

# СИСТЕМИ управління, навігації та зв'язку

# Control, navigation and communication systems

Випуск 3 (73)

Issue 3 (73)

## Щоквартальне видання

Засноване у 2007 році

У журналі відображені результати наукових досліджень з розробки та удосконалення систем управління, навігації та зв'язку у різних проблемних галузях.

### Засновник і видавець:

Національний університет  
“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка”

### Телефон:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail редколегії:

kuchuk\_nina@ukr.net

### Інформаційний сайт:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

## Quarterly

Founded in 2007

Journal represent the research results on the development and improvement of control, navigation and communication systems in various areas

### Founder and publisher:

National University  
“Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic”

### Phone:

+38 (050) 302-20-71

### E-mail of the editorial board:

kuchuk\_nina@ukr.net

### Information site:

<http://journals.nupp.edu.ua/sunz>

*За достовірність викладених фактів, цитат та інших відомостей відповідальність несе автор*

*Журнал індексується міжнародними наукометричними базами: Index Copernicus (ICV = 82.05), General Impact Factor, Google Scholar, Academic Resource Index, Scientific Indexed Service*

*Затверджений до друку Вченою Радою Національного університету*

*“Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка” (протокол від 15 вересня 2023 року № 9).*

*Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 24464-14404 ПР від 27.03.2020 р.*

*Включений до “Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії” до категорії Б – наказами МОН України від 17.03.2020 № 409 та від 09.02.2021 № 157*

Полтава • 2023

## Редакційна колегія

### Головний редактор:

КОСЕНКО Віктор Васильович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*).

### Заступники головного редактора:

НЕСТЕРЕНКО Катерина Сергіївна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ШЕФЕР Олександр Віталійович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*).

### Члени редакційної колегії:

БЛАУНШТЕЙН Натан Олександрович  
(*д-р техн. наук, проф., Ізраїль*);  
БОГОМ'Я Володимир Іванович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ВАРБАНЕЦЬ Роман Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Одеса, Україна*);  
ВЕСОЛОВСЬКИЙ Кшиштоф  
(*д-р техн. наук, проф., Польща*);  
ГАВРИЛКО Євген Володимирович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ГАШИМОВ Ельшан Гіяс огли  
(*д-р наук, проф., Баку, Азербайджан*);  
ГЛИВА Валентин Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ДАКІ Олена Анатоліївна  
(*д-р техн. наук, доц., Ізмаїл, Україна*);  
ЗАЩЕПКИНА Наталія Миколаївна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
КАСАТКІНА Наталія Вікторівна  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);  
КОВАЛЕНКО Андрій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
КОЛОМІЙЦЕВ Олексій Володимирович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
КОРОБКО Богдан Олегович  
(*д-р техн. наук, доц., Полтава, Україна*);  
КРАСНОБАЄВ Віктор Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
КУЧУК Георгій Анатолійович  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*);  
ЛЕВЧЕНКО Лариса Олексіївна  
(*д-р техн. наук, доц., Київ, Україна*);  
ЛУКОВА-ЧУЙКО Наталія Вікторівна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ЛУНТОВСЬКИЙ Андрій Олегович  
(*д-р техн. наук, проф., Німеччина*);  
ПИСАРЧУК Олексій Олександрович  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ПОДКОПАЄВ Сергій Вікторович  
(*д-р техн. наук, проф., Покровськ, Україна*);  
СЕМЕНОВ Сергій Геннадійович  
(*д-р техн. наук, проф., Краків, Польща*);  
ТИМОЩУК Олена Миколаївна  
(*д-р техн. наук, проф., Київ, Україна*);  
ТРИСТАН Андрій Вікторович  
(*д-р техн. наук, доц., Чернігів, Україна*);  
ФРОЛОВ Євгеній Андрійович  
(*д-р техн. наук, проф., Полтава, Україна*);  
ЧОРНИЙ Олексій Петрович  
(*д-р техн. наук, проф., Кременчук, Україна*);

### Відповідальний секретар:

КУЧУК Ніна Георгіївна  
(*д-р техн. наук, проф., Харків, Україна*).

### Технічні секретарі:

ЗАХАРЧЕНКО Руслан Володимирович  
(*канд. техн. наук, доц., Полтава, Україна*);  
ПЕТРОВСЬКА Інна Юріївна  
(*магістр комп. інж., Харків, Україна*).

## Editorial board

### Editor-in-Chief:

Viktor KOSENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

### Associates editor:

Katerina NESTERENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Oleksandr SHEFER  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*).

### Editorial board members:

Nathan BLAUNSTEIN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Israel*);  
Volodymyr BOHOMYA  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Roman VARBANETS  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Odesa, Ukraine*);  
Krzysztof WESOŁOWSKI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poland*);  
Yevhen HAVRILKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Elshan Giyas oglu HASHIMOV  
(*Dr. Sc., Prof., Baku, Azerbaijan*);  
Valentyn GLYVA  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Olena DAKI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Izmail, Ukraine*);  
Nataliia ZASHCHEPKINA  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Natalia KASATKINA  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Andriy KOVALENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Oleksii KOLOMIITSEV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Bohdan KOROBKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);  
Viktor KRASNOBAYEV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Heorhii KUCHUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Larysa LEVCHENKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Natalia LUKOVA-CHUIKO  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Andriy LUNTOVSKYY  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Oleksii PYSARCHUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Serhii PODKOPAIEV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Pokrovsk, Ukraine*);  
Serhii SEMENOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*);  
Olena TYMOSHCHUK,  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kyiv, Ukraine*);  
Andrii TRYSTAN  
(*Dr. Sc. (Tech.), Ass. Prof., Cherkasy, Ukraine*);  
Yevhen FROLOV  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Poltava, Ukraine*);  
Oleksii CHORNYI  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kremenchuk, Ukraine*).

### Responsible secretary:

Nina KUCHUK  
(*Dr. Sc. (Tech.), Prof., Kharkiv, Ukraine*).

### Technical secretaries:

Ruslan ZAKHARCHENKO  
(*PhD (Tech.), Ass. Prof., Poltava, Ukraine*);  
Inna PETROVSKA  
(*MSD of Comp. Eng., Kharkiv, Ukraine*).

# З М І С Т

## АВТОМОБІЛЬНИЙ, РІЧКОВИЙ, МОРСЬКИЙ ТА АВІАЦІЙНИЙ ТРАНСПОРТ

<i>Горбачов П. Ф., Любий Є. В., Колій О. С.</i> Аналітичне моделювання транспортних затримок на регульованих перехрестях при груповому прибутті транспортних засобів до них .....	5
<i>Кацман М. Д., Мацюк В. І., Мироненко В. К.</i> Моделювання надійності транспорту в екстремальних умовах функціонування як системи масового обслуговування з пріоритетами .....	10
<i>Ковиур К. Г., Ескожанова Н. Г.</i> Підхід до вибору альтернативи способів адресної доставки .....	18
<i>Ганношина І. М.</i> Розробка моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна .....	25
<i>Дубинець О. І.</i> Метод тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна в різних навігаційних ситуаціях .....	32
<i>Маранов О. В.</i> Прогнозування відмов судових навігаційних систем з використанням методів машинного навчання .....	37

## УПРАВЛІННЯ В СКЛАДНИХ СИСТЕМАХ

<i>Євсіна Н. О., Качанов П. О., Тарасенко М. В.</i> Синтез нейро-нечіткого регулятора з налаштуванням генетичним алгоритмом .....	41
<i>Заповловський М. Й., Мезенцев М. В., Баленко О. І., Оліфір М. В.</i> Оптимізаційна модель тягового асинхронного електроприводу дизель-поїзда та її дослідження .....	45
<i>Носков В. І., Гавриленко С. Ю., Скородєлов В. В., Гейко М. В.</i> Розробка методу оцінки показників тягових електропередач автономних локомотивів .....	54
<i>Pavlenko P., Samborskyi Ye., Krykhovetskyi H., Samborskyi I.</i> Control model of a group of maneuverable unmanned aerial vehicles taking into account their flight safety .....	58
<i>Дрючко О. Г., Шефер О. В., Боряк Б. Р., Бороздін М. К., Галай В. М., Захарченко Р. В.</i> Розробка модулів терморегулювання для зонної переробки пластичних мас екструзією .....	64

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

<i>Bodyanskiy Ye., Chala O.</i> Adaptive Double neo-fuzzy neuron and its combined learning .....	70
<i>Важинський В. Б., Ткачов В. М.</i> Проблематика безпеки та критерії надійності мультимарних середовищ .....	75
<i>Горносталь О. А., Гавриленко С. Ю.</i> Метод ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі ансамблевих класифікаторів з покращеною процедурою голосування .....	79
<i>Dvirna O., Verhal K., Ivanov Y.</i> The higher educational information system: management of the timetable scheduling and logistics of the educational process .....	86
<i>Dmytrenko T., Derkach T., Dmytrenko A.</i> Using Java and C# programming languages for server platforms and workstations .....	93
<i>Zhyvylo Y., Kuz V.</i> Technical requirements for the physical and apartment infrastructure of the mobile data processing and storage system for the data processing centre of the container type of financial institutions, enterprises, organisations .....	95
<i>Kapiton A., Dziuban O., Talybov R., Kanivets B.</i> Combined method for protecting user privacy when using a web browser .....	103
<i>Kolesnikov O., Golovko G.</i> The objective need to implement an information system to automate daily tasks in recruitment workflow .....	106
<i>Коростельов А. С., Гученко М. І., Перекрест А. Л., Нікітіна А. В., Вадурін К. О.</i> Модель корпоративної мережі базованої на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень .....	111
<i>Кулягін А. І.</i> Використання розпізнаної емоції як неявного фідбеку для рекомендаційної системи .....	115
<i>Лактіонов О. І., Боряк Б. Р., Педченко Н. М., Двірна О. А., Михайліченко О. В.</i> Огляд алгоритмів комп'ютерного зору для виявлення небезпечних об'єктів дронами .....	120
<i>Левтеров А. І., Плехова Г. А., Костікова М. В., Очеретенко С. В.</i> Аналіз вразливостей площини даних SDN і функціональних можливостей засобів маршрутизації щодо протидії можливим атакам .....	123
<i>Nevliudov I., Maksymova S., Klymenko O., Bilousov M.</i> Development of a mobile robot prototype with an interactive control system .....	128
<i>Starodubtsev M., Nevlyudova V., Vzesnevsky M., Shibanov S.</i> Development of an intelligent robot control subsystem .....	134
<i>Чалий С. Ф., Лециньський В. О.</i> Можливісна модель каузального зв'язку по вхідній змінній для побудови пояснення в інтелектуальній системі .....	138
<i>Янко А. С., Краснобаєв В. А., Сабельнікова П. С.</i> Математична модель надійності комп'ютерних систем, функціонуючих в модулярній системі числення по основі використання принципу пасивної відмовостійкості .....	144
<i>Андрусенко Ю. О., Фесенко Т. Г.</i> Грід-технології в розподілених обчислювальних середовищах .....	148

Заковоротний О. Ю., Орлова Т. О. Порівняльний аналіз хмарних та туманних середовищ Інтернету речей .....	152
--	-----

### ЦИВІЛЬНА БЕЗПЕКА

Винтенко Б. Ю., Смірнов О. А., Коваленко А. С., Смірнов С. А., Буравченко К. О. Дослідження вимог міжнародних стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки .....	155
--	-----

Самченко Д. М., Тихенко О. М., Зозуля Л. А., Цибульник Н. Н. Проектування електромагнітних екранів гарантованої ефективності для галузей цивільної безпеки та електромагнітної сумісності .....	167
---	-----

### ЗВ'ЯЗОК, ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЇ ТА РАДІОТЕХНІКА

Hashimov E., Maharramov R., Sabziev E., Pashaev A. Assessment of dead zone of jointly operating radars .....	171
--	-----

Yerokhin V., Peleshok Ye., Zaluzhnyi O. Coherent demodulation of synchronous mutually not orthogonal digital signals with manipulation in the minimum shift keying .....	176
--	-----

Ковальчук А. О., Кузнєцов О. Л., Коломійцев О. В., Карлов А. Д. Забезпечення заданої стійкості супроводження повітряних об'єктів за радіальною швидкістю в реальних умовах поширення і відбиття радіолокаційного сигналу .....	181
--	-----

Нікітіна Л. О., Дженюк Н. В., Борисова Л. В. ІТ та технології штучного інтелекту у підготовці інженерів з телекомунікацій .....	189
---	-----

АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК .....	196
---------------------------	-----

#### Організації авторів

##### АЗЕРБАЙДЖАН

Азербайджанський технічний університет, Баку  
Військовий науково-дослідний інститут, Баку  
Інститут систем управління, Баку, Азербайджан  
Національний університет оборони, Баку, Азербайджан

##### КАЗАХСТАН

Казахський автомобільно-дорожній інститут імені  
Л. Б. Гончарова, Алмати, Казахстан

##### УКРАЇНА

Акціонерне товариство «Українська залізниця», Київ  
Військовий інститут телекомунікацій та інформаційних  
технологій імені героїв Крут, Київ, Україна  
Державний університет інфраструктури та технологій,  
Київ, Україна  
Кременчуцький національний університет імені Михайла  
Остроградського, Кременчук, Україна  
Науково-виробниче підприємство «Радій»,  
Кропивницький, Україна  
Науково-дослідний інститут військової розвідки, Київ, Україна  
Національний авіаційний університет, Київ, Україна  
Національний технічний університет «Харківський  
політехнічний інститут», Харків, Україна  
Національний університет біоресурсів і  
природокористування України, Київ, Україна  
Національний університет «Полтавська політехніка імені  
Юрія Кондратюка», Полтава, Україна  
Національний аерокосмічний університет імені  
М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна  
Національний технічний університет України «КПІ імені  
Ігоря Сікорського», Київ, Україна  
ТОВ «Kapelou», Київ, Україна  
Харківський національний автомобільно-дорожній  
університет, Харків, Україна  
Харківський національний університет ім. В. Н. Каразіна,  
Харків, Україна  
Харківський національний університет радіоелектроніки,  
Харків, Україна  
Харківський національний університет Повітряних Сил  
імені Івана Кожедуба, Харків, Україна  
Центральноукраїнський національний технічний  
університет, Кропивницький, Україна

#### Authors affiliation

##### AZERBAIJAN

Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan  
Military Scientific Research Institute, Baku  
Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan  
National Defense University, Baku, Azerbaijan

##### KAZAKHSTAN

Kazakh Automobile and Road Institute named  
after L. B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan

##### UKRAINE

Joint Stock Company Ukrainian Railways, Kiev  
Kruty Heroes Military Institute of Telecommunication  
and Information Technologies, Kiev, Ukraine  
State University of Infrastructure and  
Technologies, Kiev, Ukraine  
Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National  
University, Kremenchuk, Ukraine  
«Radium» Scientific and Production Enterprise,  
Kropyvnytskyi, Ukraine  
Research Institute of Military Intelligence, Kyiv  
National Aviation University, Kyiv, Ukraine  
National Technical University «Kharkiv Polytechnic  
Institute», Kharkiv, Ukraine  
National University of Life and Environmental  
Sciences of Ukraine, Kyiv, Ukraine  
National University «Yuri Kondratyuk Poltava  
Polytechnic», Poltava, Ukraine  
National Aerospace University named after  
M.E. Zhukovsky "KHAI", Kharkiv, Ukraine  
National Technical University "Igor Sikorsky Kyiv  
Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine  
«Kapelou» LLC, Kyiv, Ukraine  
Kharkiv National Automobile and Highway  
University, Kharkiv, Ukraine  
V.N. Karazin Kharkiv National University,  
Kharkiv, Ukraine  
Kharkiv National University of Radio Electronics,  
Kharkiv, Ukraine  
Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force  
University, Kharkiv, Ukraine  
Central Ukrainian National Technical University,  
Kropyvniyskiy, Ukraine



# Автомобільний, річковий, морський та авіаційний транспорт

УДК 656.051

doi: 10.26906/SUNZ.2023.3.005

П. Ф. Горбачов, Є. В. Любий, О. С. Колій

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## АНАЛІТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТРАНСПОРТНИХ ЗАТРИМОК НА РЕГУЛЬОВАНИХ ПЕРЕХРЕСТЯХ ПРИ ГРУПОВОМУ ПРИБУТТІ ТРАНСПОРТНИХ ЗАСОБІВ ДО НИХ

**Анотація.** У статті представлені результати уточнення аналітичних моделей, які можна використовувати для оцінювання затримок транспортних засобів, які рухаються скоординованими ділянками міських магістралей в умовах низького навантаження та при їхньому груповому прибутті до чергового перехрестя в плані координації. Використання отриманих в роботі залежностей є дуже актуальним на прикладі просторової координації роботи світлофорів на вулично-дорожній мережі міст, коли є ділянки з близько розташованими світлофорними об'єктами. Подальшим напрямком проведення досліджень є експериментальна перевірка розроблених аналітичних моделей визначення середньої затримки транспортних засобів, що рухаються скоординованими ділянками міських магістралей, за умови їх групового прибуття до перехрестя.

**Ключові слова:** аналітичні моделі, групове прибуття, зелена хвиля, пачка автомобілів, план координації, транспортні затримки.

### Вступ

У світовій практиці організації дорожнього руху (ОДР) одним із основних критеріїв ефективності впровадження та оцінювання систем управління (СУ) світлофорними об'єктами (СО) на міських магістралях (ММ) прийнято вважати затримки транспортних засобів (ТЗ) при подоланні ними скоординованих фрагментів вулично-дорожньої мережі (ВДМ) [1-5].

На даний час основним джерелом для отримання величини затримок ТЗ при подоланні скоординованих ділянок ММ є засоби мікросимуляції руху транспортних потоків (ТП). Отримані за рахунок використання імітації руху ТП результати є доброю основою для оцінки ефективності впровадження або удосконалення планів координації (ПК), але, далеко не завжди, ці результати повною мірою характеризують реальні умови руху ТЗ скоординованими ділянками ММ, наприклад, групове прибуття транспортних засобів до чергового перехрестя скоординованої ділянки ММ.

**Аналіз досліджень і публікацій.** Ця наукова стаття є прямим продовженням роботи [3], де було представлено результати аналізу існуючих підходів формування ПК з урахуванням опису групового прибуття транспортних засобів до скоординованих перехрестя, тому в даній статті не має потреби проводити аналітичний огляд останніх досліджень і публікацій за обраною тематикою.

**Постановка завдання. Мета статті** уточнення розроблених у статті [3] аналітичних моделей, які можна використовувати для оцінювання середніх затримок транспортних засобів, що рухаються в пачках зеленої хвилі (ЗХ) за умов низького завантаження скоординованих ділянок ММ.

### Виклад основного матеріалу

Слід розуміти, у своєму початковому вигляді представлена в роботі [3] формула (1), може використовуватися тоді, коли періоди раннього і пізнього прибуття до перехрестя існують одночасно. А така ситуація може виникати в разі, якщо тривалість лівоповоротної фази є меншою за тривалість фази ЗХ, що, взагалі-то, не є чимось незвичайним. При цьому обов'язковою умовою можливості одночасного існування обох областей є потрапляння і початку, і кінця лівоповоротної фази в середню частину відрізка фази лівого повороту (ЛП), тобто

$$T = T_{\varepsilon} \cdot \Delta_{\varepsilon} + T_{\lambda} \cdot \Delta_{\lambda}, \quad \text{якщо } \tau_0, \tau_1 \in ]t_0; t_1[. \quad (1)$$

У всіх інших випадках ненульову довжину матиме тільки одна з областей. При вході зсуву лівоповоротної фази в позитивну частину значень і подальшому його збільшенні, з'являється область раннього прибуття ТЗ у пачці. Вона існуватиме завжди за подальшого зсуву в позитивному напрямі, і для неї завжди існуватиме позитивне значення часу очікування,  $T_{\varepsilon} > 0$ , за будь-якої довжини фази ЛП  $\tau_0$ .

Однак, зрештою, це не зовсім вірно з погляду остаточної оцінки часу очікування, оскільки тривалість циклу обмежена й існує область пізнього прибуття ТЗ. Ця область виникає відразу після того, як кінець лівоповоротної фази досягає початку наступного циклу, тобто початку періоду прибуття ТЗ до перехрестя. Отже, у момент, коли

$$\tau_1 = t_0 + T_{\varepsilon}, \quad (2)$$

виникають одночасно обидві області прибуття ТЗ із затримкою ЛП – і рання, і пізня. Область раннього прибуття розташовується у стартовому циклі, а о

бласть пізнього прибуття – у наступному. Обидві вони мають одну довжину та повинні мати один час очікування, якщо залежності (5) і (7), що представлені в статті [3] отримано правильно.

Після підстановки в (5) і (7), що представлені в статті [3], значення зсуву лівоповоротної фази  $\tau_0 = T_u - \tau_l$ , і відповідних лінійних перетворень, з використанням зв'язків між елементами і моментами світлофорного циклу (СЦ), було отримано, що

$$T_\varepsilon = T_\lambda = T_u - \tau_l - \frac{t_p}{2}. \quad (3)$$

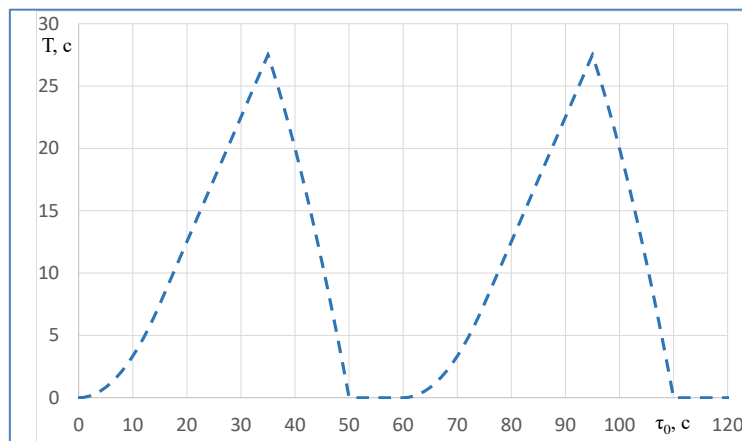
Ця точка позначає момент, в який має змінитися джерело виникнення часу очікування для лівоповоротних ТЗ – з області раннього прибуття ТЗ попереднього циклу, на область пізнього прибуття ТЗ у новому циклі.

Побудована в такий спосіб залежність середнього часу очікування моменту ввімкнення дозвольного сигналу для ЛП, для ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, від параметрів циклу світлофорного регулювання в підсумку має такий вигляд:

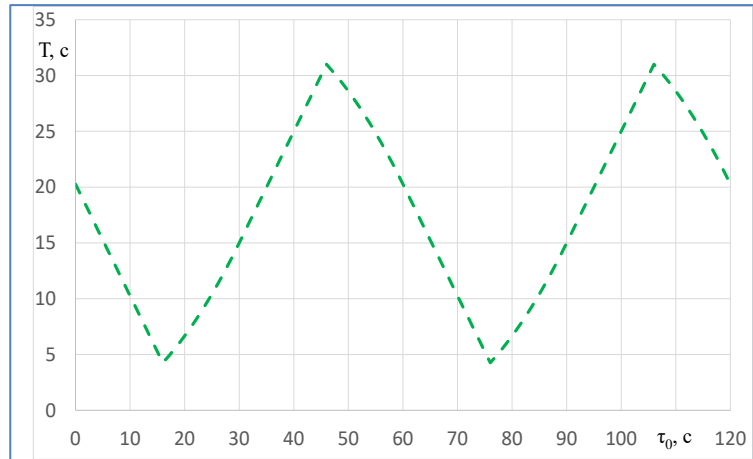
$$T = \begin{cases} T_\varepsilon \cdot \Delta_\varepsilon + T_\lambda \cdot \Delta_\lambda, & \text{якщо } 0 < \tau_0 \leq T_u - \tau_l \\ T_\lambda \cdot \Delta_\lambda, & \text{якщо } T_u - \tau_l < \tau_0 \leq T_u \end{cases}, \quad (4)$$

або

$$T = \begin{cases} \Delta_\varepsilon \left[ T_u - \tau_l - \frac{t_p}{2} \right] + \\ + \Delta_\lambda \begin{cases} T_u - \tau_l - \frac{t_l - \tau_l}{2}, & \text{за } 0 < t_l - \tau_l \leq t_p, \\ 0, & \text{за } t_l - \tau_l \leq 0 \text{ або } t_l - \tau_l > t_p \end{cases}, & 0 < \tau_0 \leq T_u - \tau_l \\ \Delta_\lambda \cdot \begin{cases} T_u - \tau_l - \frac{t_l - \tau_l}{2}, & \text{за } 0 < t_l - \tau_l \leq t_p, \\ 0, & \text{за } t_l - \tau_l \leq 0 \text{ або } t_l - \tau_l > t_p \end{cases}, & T_u - \tau_l < \tau_0 \leq T_u \end{cases} \quad (5)$$



**Рис. 2.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 15$  с та  $\tau_l = 25$  с

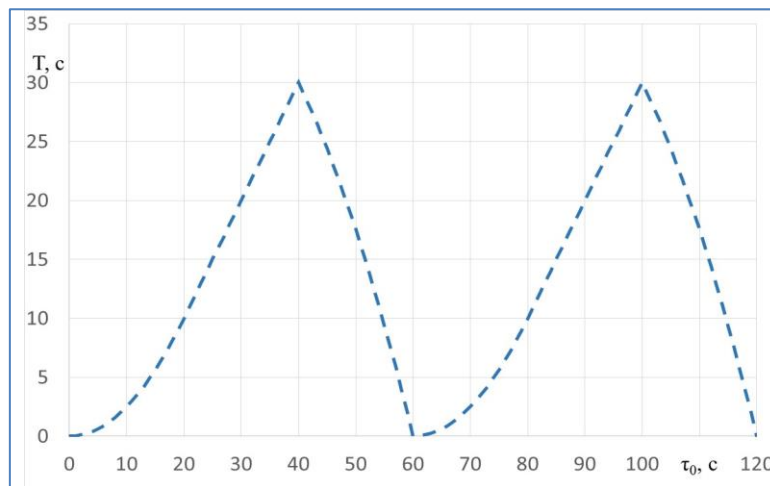


**Рис. 1.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 30$  с та  $\tau_l = 14$  с

Отримані залежності добре ілюструються відповідним графіком, за віссю абсцис якого відкладається зсув лівоповоротної фази відносно початку циклу,  $\tau_0$ , а за віссю ординат – середній час очікування дозволу на виконання ЛП для ТЗ, що прибувають на перехрестя в пачці ЗХ, рис. 1. За нульового зсуву лівоповоротної фази щодо початку циклу, коли  $t_0 = \tau_0 = 0$ , середній час очікування для лівоповоротних ТЗ є

$$T_0 = T_{\lambda 0} = \left( T_u - \frac{t_p + \tau_l}{2} \right) \cdot \frac{t_p - \tau_l}{t_p}. \quad (6)$$

За  $t_p - \tau_l < 0$ , час очікування у стартовій точці дорівнює нулю,  $T_0 = 0$ , і взагалі, виконання цієї умови призводить до наявності проміжків із нульовим часом очікування на відрізку зсуву, довжиною  $\tau_l - t_p$  секунд, рис. 2. За рівної тривалості періодів прибуття і роз'їзду ТЗ, відрізки з нульовим часом очікування перетворюються на точку, що відображає збіг моментів прибуття пачки та ввімкнення дозвольного сигналу для них, тобто оптимальний час початку циклу, рис. 3.



**Рис. 3.** Залежність середнього часу очікування ТЗ, які прибувають до перехрестя, що координується, у складі пачки ЗХ, ввімкнення сигналу, що дозволяє ЛП, від зсуву лівоповоротної фази відносно початку циклу за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 20$  с та  $\tau_l = 20$  с

Отримані на прикладі лівоповоротних ТЗ, що прибувають до перехрестя у складі координованої пачки, залежності часу очікування ввімкнення дозвільного сигналу мають загальний характер, оскільки охоплюють будь-які варіанти тривалості періодів прибуття та роз'їзду ТЗ, а також моментів прибуття пачки та ввімкнення дозвільного сигналу. Природно, що всі вони працюють тільки в разі, якщо сумарна тривалість дозвільної фази для ЛП і періоду прибуття пачки ЗХ буде меншою за тривалість усього циклу

$$\tau + t < T. \quad (7)$$

Ця умова в реальності виконується завжди, з урахуванням обов'язкової наявності в циклі окремої фази для другорядного напрямку, відсутність якого означає також і відсутність ЛП, оскільки тоді повертати буде просто нікуди. Ця фаза не може поєднуватися з жодною з двох дозвільних фаз для ТЗ, що рухаються магістраллю. Але під час розгляду інших ситуацій групового прибуття до регульованого перехрестя, не в плані магістральної координації, теоретично можливі ситуації, коли умова (7) не виконується. У цьому разі потрібно вводити додаткові обмеження на використання отриманих залежностей для оцінки часу очікування дозвільного сигналу ТЗ, що прибувають від попереднього скоординованого перехрестя.

У ситуаціях же, що виникають у ПК, отримані залежності можна використовувати не тільки для оцінювання часу затримки лівоповоротних ТЗ, а й для оцінювання затримок додаткових ТЗ, які приєднуються до пачки на черговому перехресті, а також для пачки ТЗ, яка рухається координованою магістраллю у зворотному напрямку, для якої моменти ввімкнення зеленого сигналу і розрахунковий час прибуття пачки можуть не збігатися. Насправді, для того, щоб оцінка затримок за отриманими залежностями була адекватною, потрібно, щоб потік ТЗ, які прибувають на перехрестя, не був безперервним, а формувався світлофором на попередньому перехресті, і його, в якомусь наближенні, можна було вважати рівномірним упродовж часу прибуття пачки на поточне перехрестя, за який можна прийняти трива-

лість дозвільного сигналу на світлофорі, що формує пачку ЗХ. Далі, для такої групи має бути визначено час їхнього прибуття на перехрестя, на якому оцінюються затримки і, після появи в ПК моменту ввімкнення дозвільного сигналу для пачки, що прибуває, з відомою за часом довжиною, можна оцінити шуканий час за залежністю (5). І додаткові ТЗ з другорядних напрямків, і пачка ТЗ, що рухається координованою ділянкою ММ в зворотному напрямі, відповідають цим умовам, тому (5) цілком можна використовувати для отримання оцінок часу їхніх затримок. А вони є вельми значущою частиною всіх затримок, що виникають у ПК, та обов'язково мають враховуватися під час оцінки його ефективності на стадіях як проектування, так і реалізації.

Однак ще більшої значущості отримані залежності набувають під час використання в просторовій координації роботи світлофорів у міській ВДМ, що можлива на її фрагментах із близько розташованими СО. Хоча зараз цьому питанню і приділяється досить багато уваги, усі наявні на сьогодні методи мережевої (не магістральної) координації роботи СО побудовані на деяких оптимізаційних алгоритмах, що мінімізують, на думку авторів, загальні витрати часу учасників руху на об'єкті дослідження. Як показує наявний досвід реалізації подібних алгоритмів, результати такої координації часто практично не відрізняються від звичайної роботи локальних світлофорів із жорсткими циклами.

У той же час, отримані залежності показують, що за синхронізованої роботи сусідніх світлофорів, із циклами однакової тривалості, зсуви початку циклу безпосередньо впливають на затримки ТЗ на перехрестях із груповим прибуттям, що дає змогу визначити оптимальні моменти початку циклу на кожному перехресті, за відомого (заданого) часу початку роботи попереднього перехрестя. Для цього потрібно мінімізувати сумарний час затримки ТЗ, що рухаються в зустрічних напрямках по одному перегону між двома сусідніми регульованими перехрестями. Наскільки сильно залежить сумарна затримка від зсуву початку циклу добре видно з рис. 4.

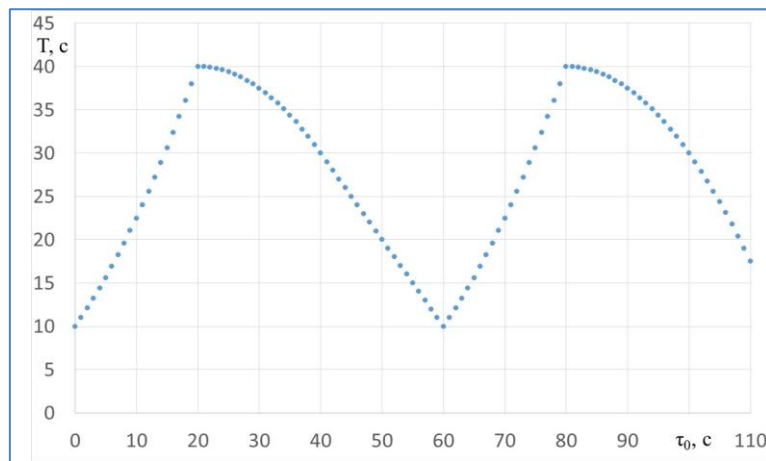


Рис. 4. Залежність сумарної затримки ТЗ, що прибувають до перехрестя на кінцях перегону вулиці з розрахунковим часом проїзду 20 с, від різниці в моментах початку СЦ на перехрестях за умов:  $T = 60$  с,  $t_p = 20$  с та  $\tau_l = 20$  с

Рис. 4 побудований для ділянки мережі з тривалістю поїздки нею 20 с, на початку та наприкінці якої працюють світлофори з однаковими циклами, параметри яких запозичені з рис. 3. Як видно, для цих умов, затримка може збільшуватися в 4 рази відносно її мінімального значення, що демонструє дуже широкі потенційні можливості для мережевої оптимізації, шляхом послідовного розширення мережі скоординованих світлофорів у напрямку від джерела координації. За таке джерело можуть виступати або координовані ділянки ММ, або ключові перехрестя на фрагменті ВДМ з близько розташованими один від одного СО. Природно, що такі просторові фрагменти мережі повинні відповідати загальним вимогам до формування ПК і не мати нерегульованих перетинів конкуруючих потоків учасників руху.

На таких територіях також можуть виникати задачі визначення раціонального зсуву не з двома, а з трьома, а можливо, і з чотирма сусідніми перехрестями, коли два (три) з них уже мають заданий постійний час початку циклу в координації, який задає час прибуття пачок до одного, розрахунково-облікового перехрестя з різних напрямків. У таких задачах також можна успішно мінімізувати сумарні затримки ТЗ за допомогою отриманих залежностей.

Останнім аспектом оцінки затримки ТЗ, що прибувають у складі пачки до регульованого перехрестя в умовах низького навантаження, є оцінка адекватності отриманих залежностей. Це завдання, взагалі кажучи, належить до експериментальних досліджень, але в даному випадку їх проведенню заважає:

- незначна кількість реальних СО, що працюють синхронно, які підходять для спостереження;
- істотний вплив на результати оцінки індивідуального стилю водіння автомобілістів, що може призводити до значних відхилень фактичного часу прибуття до перехрестя від його розрахункового значення, як у бік його збільшення, так і зменшення;
- необхідність втручання в роботу СО для оцінювання затримок в усьому діапазоні зрушень, що неможливо реалізувати в реальних ПК через жорсткі функціональні зв'язки між усіма його елементами, за яких для зміни одного зсуву потрібна перебудова всього ПК.

Також не варто забувати про те, що умови руху з низьким навантаженням належать в основному тільки до нічного періоду доби, що також не полегшує проведення необхідних спостережень. З огляду на всі ці причини експериментальна перевірка отриманих залежностей дуже обмежена за своїми можливостями і не може гарантувати отримання безпомилкового висновку про їхню адекватність.

У такій ситуації доцільно використовувати інший підхід – порівняння оцінок затримки на регульованому перехресті за допомогою отриманої моделі з оцінками за вже відомими моделями, що підтвердили на практиці свою адекватність. Безальтернативною базою для такого порівняння є формула Вебстера, точніше, її перший доданок [6], що відтворюється в незмінному вигляді в аналогічних формулах усіх основних сучасних керівництв з ОДР [7-9]. І це не єдина причина безальтернативності формули Вебстера в цьому випадку, коли оцінка затримки дається для умов низького завантаження.

Річ ще в тім, що її отримано за допомогою імітаційного експерименту, багато років використовували та продовжують використовувати в усьому світі, а основна критика цієї формули впродовж багатьох десятиліть її існування стосується неможливості її застосування за рівня завантаження більшого за 90 %, а також отриманої на її основі залежності для розрахунку тривалості СЦ, що далеко не завжди приводить до найкращого результату. І саме в цих аспектах формула Вебстера зазнала коригування в сучасних посібниках, зберігши при цьому в незмінному вигляді перший доданок, який можна легко привести до умов руху з низьким навантаженням, прирівнявши відповідний показник рівним 0.

Так вчинив автор роботи [10], отримавши при цьому залежність для середньої затримки ТЗ за випадкового прибуття до регульованого перехрестя  $\bar{T}$ , що в прийнятих у даній роботі позначеннях має такий вигляд:

$$\bar{T} = \frac{(T_u - \tau_l)^2}{2 \cdot T_u}. \quad (8)$$

Для коректного порівняння двох моделей необхідно забезпечити відповідність порівнюваних оцінок між собою, оскільки отримана в роботі оцінка середньої затримки ТЗ у пачці під час групового прибуття (5), дає точковий результат для конкретних значень часу прибуття пачки, її довжини та часу ввімкнення зеленого сигналу для неї. А формула (8) дає оцінку середньої затримки одиночних ТЗ, що випадково прибувають до перехрестя. В обох випадках під затримкою розуміють різницю між часом увімкнення зеленого сигналу і часом прибуття ТЗ, але у випадку з (8) це усереднена за всіма прибуттями затримка, а в (5) її усереднено не за прибуттями, а за рівномірно розподіленими в пачці ТЗ, за прибуттями її не усереднено. Крім того, оцінка (5) містить у собі затримки ТЗ з області пізнього прибуття, які не встигли проїхати на перший дозвільний сигнал світлофора, яких у (8) немає.

Також для коректного порівняння оцінок за двома моделями, результати розрахунків за (5) необхідно привести у відповідність з оцінкою, одержуваною за (8), тобто створити пачку мінімальної довжини, щоб вилучити область пізнього прибуття, й отримати оцінку, усереднену за прибуттями для неї.

З погляду отриманої тут моделі, пачка мінімальної довжини означає, що всі ТЗ в її складі за будь-якого зсуву встигнуть проїхати на сигнал світлофора, що дозволяє їм рух,  $t_p \leq \tau_0 - t_0$ . А це призводить до

такого наслідку, що всі ТЗ в пачці прибувають на перехрестя протягом періоду раннього прибуття та

$$\Delta_\varepsilon = 1, \Delta_\lambda = 0. \quad (9)$$

Для усереднення часу очікування дозвільного сигналу за прибуттям пачки доцільно провести чисельний експеримент із виконанням умови (9), щоб розрахувати затримки для різних зсувів часу прибуття пачки, рівномірно розподілених у межах СЦ.

### Висновки

На прикладі лівоповоротних ТЗ, що рухаються в складі пачки ЗХ скоординованою ділянкою ММ, побудовані аналітичні залежності часу очікування ввімкнення дозвільного сигналу, які мають загальний характер, оскільки охоплюють будь-які варіанти тривалості періодів прибуття та роз'їзду ТЗ, а також моментів прибуття пачки ЗХ та ввімкнення дозвільного сигналу світлофору.

Використання отриманих в роботі залежностей є дуже актуальним на прикладі просторової координації роботи СО на ВДМ міст, коли є ділянки з близько розташованими світлофорами.

Подальшим напрямком проведення досліджень є експериментальна перевірка розроблених аналітичних моделей визначення середньої затримки ТЗ, що рухаються скоординованими ділянками ММ, за умови їх групового прибуття до перехрестя.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Любий, Є.В. (2022). Аналіз методів формування планів координації світлофорних об'єктів. Сучасні технології в машинобудуванні та транспорті, 2(19), 108-122. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
2. Любий, Є.В., Горбачов П.Ф. (2022). Методика оцінки часу, необхідного для забезпечення рівномірного руху пачки автомобілів на координованій ділянці міської магістралі. Автомобіль і електроніка. Сучасні технології, 22, 81-91. <https://doi.org/10.30977/VEIT.2022.22.0.2>.
3. Горбачов, П.Ф., Любий, Є.В. (2023). Підхід до оцінювання затримок транспортних потоків у плані координації. Системи управління, навігації та зв'язку, 2(72), 15-19. doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.015>.
4. Горбачов, П.Ф., Макарічев, О.В., Шевченко, В.В. (2019). Оцінка затримок руху на регульованих перехрестях міських вулиць із трифазним циклом регулювання. Автомобільний транспорт, 44, 30-39. <https://doi.org/10.30977/AT.2219-8342.2019.44.0.30>.
5. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2015). Signal Timing Manual – Second Edition. Washington, DC: The National Academies Press. <https://doi.org/10.17226/22097>.
6. Webster, F.V. (1958). Traffic Signal Settings. Road Research Technical Paper No. 39. London: Department of Scientific and Industrial Research, 45 p.
7. National Research Council. (2010). Highway Capacity Manual. Washington, DC: TRB. 1475 p.
8. Institute of Transportation Engineers. (2008). Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections. Canada, Ottawa: ITE. 232 p.
9. Austroads. (2020). Guide to Traffic Management Part 9: Transport Control Systems – Strategies and Operations. Publication No. AGTM09-20. 271 p.
10. Мінь В.Д. (2021). Підвищення ефективності організації дорожнього руху в транспортних районах міста : дисертація доктор філософії. Харків: ХНАДУ. 205 с.

Received (Надійшла) 12.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.08.2023

### Analytical modeling of transport delays at signalized intersections in condition of group arrival of vehicles

Peter Horbachov, Yevhen Liubiy, Oleksandr Koli

**Abstract.** The article presents the results of updating analytical models that can be used to estimate the delays of vehicles moving along coordinated sections of city highways in low traffic conditions and when they arrive in groups at the next intersection in terms of coordinated timing plan. The use of the dependencies obtained in this work is very relevant for the example of spatial coordination of traffic lights on cities road network, when there are areas with closely located traffic lights. A further direction of research is the experimental verification of the developed analytical models for determining the average delay of vehicles moving along coordinated sections of city highways, under conditions of group arrival at intersections.

**Keywords:** analytical models, group arrival, green wave, platoon, coordinated timing plan, transport delays.



М. Д. Кацман<sup>1</sup>, В. І. Мацюк<sup>2</sup>, В. К. Мироненко<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Акціонерне товариство «Українська залізниця», Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний університет біоресурсів і природокористування України, Київ, Україна

<sup>3</sup> Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## МОДЕЛЮВАННЯ НАДІЙНОСТІ ТРАНСПОРТУ В ЕКСТРЕМАЛЬНИХ УМОВАХ ФУНКЦІОНУВАННЯ ЯК СИСТЕМИ МАСОВОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ З ПРІОРИТЕТАМИ

**Анотація.** В статті представлено імітаційну модель системи масового обслуговування з чергою і відносним пріоритетом, яка може використовуватися для управління надійністю транспортних систем в умовах ресурсних обмежень. Розроблена імітаційна модель поєднує агентний та дискретно-подієвий принципи симуляції і дозволяє вивчати системи масового обслуговування в частині встановлення закономірностей: імовірностей (обслуговування, відмови, виштовхування), затримок часу (перебуванням у черзі, під обслуговуванням), розмірів черги, порядку формування черги при надходженні вимог різного пріоритету. В результаті досліджень отримані залежності: імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їхнього надходження та обслуговування; імовірності обслуговування вимог нижчого пріоритету залежно від інтенсивності обслуговування та обслуговування вимог вищого пріоритету; імовірності «виштовхування» зі СМО вимог нижчого пріоритету вимогами вищого пріоритету залежно від інтенсивностей обслуговування та надходження вимог високого пріоритету.

**Ключові слова:** транспортна система, агентне моделювання, імітаційне моделювання, системи масового обслуговування, абсолютний пріоритет, інтенсивності обслуговування і надходження, імовірності обслуговування і виштовхування, імовірність обслуговування вимог.

### Вступ

Математична теорія масового обслуговування знайшла широке застосування при моделюванні функціонування реальних систем, інформаційних [1], обчислювальних, енергетичних, медичних [2], біологічних [3], транспортних [4, 5] та інших.

В сфері транспорту застосування методів теорії масового обслуговування є достатньо традиційним, але події агресивної війни росії, яку вона веде проти України протягом 2022-23 років, змушують по-новому формулювати практичні задачі, які розв'язуються з застосуванням цих методів, зокрема в системах масового обслуговування (СМО) з пріоритетами.

Військові дії в Україні неодноразово мали метою руйнування залізничної інфраструктури. З історичних та технологічних причин на українських залізницях для перевезень використовувалося електровозів майже у 4 рази більше, ніж тепловозів. При такій диспропорції тепловози не можуть замінити весь парк електровозів, необхідний для виконання усіх перевезень на електрифікованих лініях, у разі, якщо на цих припиняється електропостачання. Так само, неможливо перевести всі поїзди із зруйнованих електрифікованих ліній на не електрифіковані лінії, у зв'язку з визначеною географією перевезень між відправниками та одержувачами.

Тоді виникали «задачі з пріоритетами» - наприклад, на який маршрут який поїзд відправляти, якщо пропускна здатність маршруту та кількість локомотивів певного типу обмежені. При цьому пріоритетність відправлення поїздів може визначатися за різними критеріями, окремо для пасажирських і вантажних перевезень.

Пріоритети пасажирських перевезень можна визначити, наприклад, як військові перевезення особового складу, першочергову термінову евакуацію, а

решти пасажирських поїздів, можливо, співвідношенням вартості усіх проданих квитків на поїзд до часу, який лишився до часу його прибуття на станцію призначення. При вантажних перевезеннях найвищі пріоритети мають особливо важливі вантажі для державної та оборонної мети, а решту вантажів можна пріоритизувати співвідношенням вартості цих вантажів до часу, який є в наявності для їх доставки до станції призначення. З урахуванням визначених пріоритетів, від вищого до нижчого, повинні прийматися рішення щодо використання обмеженого парку локомотивів для відправлення поїздів відповідних пріоритетів. Обґрунтованість та швидкість цих рішень тільки зростає, якщо застосувати математичний апарат оптимізації СМО з пріоритетами.

У таких СМО, якщо у черзі знаходяться вимоги з різними пріоритетами, то раніше обслуговуються вимоги з вищим пріоритетом. Пріоритети можуть бути абсолютними чи відносними. У СМО з абсолютними пріоритетами обслуговування вимоги нижчого пріоритету перериваються, якщо у цей час надійшла вимога вищого пріоритету. Вимога обслуговування, якою було перервано, повертається у чергу та дообслуговується чи обслуговується заново тільки тоді, коли у черзі не залишається вимоги вищого пріоритету.

У СМО з відносними пріоритетами вимога, яка надійшла у канал обслуговування, завжди обслуговується до кінця, навіть якщо у цей час надійшла вимога з вищим пріоритетом.

Окремої уваги заслуговують СМО, в яких інтенсивності обслуговування і надходження вимог вищого пріоритету малі. Тобто інтервали часу між вимогами у вхідному потоці і терміни часу обслуговування таких вимог великі. Наприклад, при всій їхній непередбачуваності, відомо, що інтервали часу між ударами, що руйнують інфраструктуру, а тривалість

її відновлення відносно великі, порівняно з інтервалами між поїздами та тривалістю перевезень в нормальних, мирних умовах. Тоді пріоритетними стають саме перевезення, пов'язані з відновленням інфраструктури, і саме для забезпечення цих перевезень спрямовуються локомотиви та інші ресурси.

У кожному пріоритеті може бути окремий список ранжированих вимог і своя черга. Вимоги із списку нижчого пріоритету обслуговуються тільки після останньої вимоги із списку вищого пріоритету. Для усіх вимог передбачається, що процеси надходження вимог незалежні, пуассоновські і не залежать від тривалостей обслуговування.

СМО із пріоритетами достатньо вивчалися протягом тривалого часу. За допомогою апарату перетворень Лапласа отримано залежності щодо визначення характеристик таких СМО для різних дисциплін обслуговування [6]. При дослідженні СМО з різними пріоритетами – пріоритетами без переривання обслуговування і з перериванням обслуговування та дообслуговування – отримано залежності щодо знаходження середнього часу очікування у черзі, середнього часу перебування у системі вимог  $k$ -го пріоритету [7].

У монографії [8] за допомогою середі розробки імітаційних моделей MathLab Simulinc (із бібліотеками SimEvent і StateFlaw) досліджувалась частково модифікована СМО. Показано, що за допомогою динамічних пріоритетів одноразово підвищується пріоритет безпріоритетної заявки, при цьому ймовірність обслуговування цих заявок збільшується. Однак така характеристика СМО як ймовірність обслуговування потоку вхідних заявок зменшується, оскільки безпріоритетні заявки обслуговуються довше за пріоритетні.

За допомогою середі розробки імітаційних моделей (AnyLogic, із бібліотеками Java SE) та інструментів теорії масового обслуговування, агентного і дискретно-подієвого принципів проводились дослідження технологічних ризиків та відмов у транспортних та логістичних системах [9, 10]. У результаті встановлена закономірність впливу кількості каналів обслуговування на середню інтенсивність обслуговування заявок при незмінній сумарній інтенсивності надходження та обробці заявок у системі. Однак у даних дослідженнях не враховувалась пріоритетність заявок.

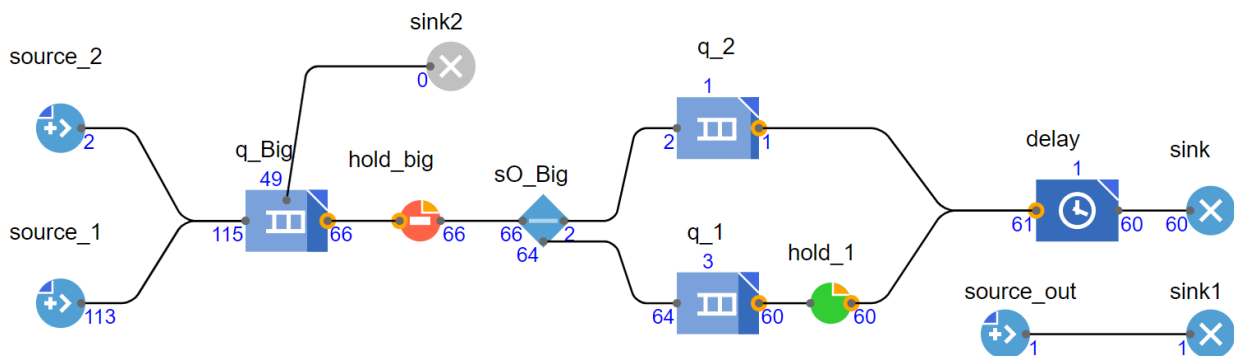


Рис. 1. Головне вікно імітаційної моделі в середовищі AnyLogic

Для можливості формування пріоритетності вимог на основі базового класу агентів *Entity* створено

У роботі [11] запропоновані методи теорії масового обслуговування марковського та немарковського типів для моделювання протидії персоналу охорони зловмисній групі з випадковою кількістю злочинців у групі та різними способами організації дій такого персоналу. А у дослідженнях [12] розглядаються математичні моделі системи масового обслуговування, що моделюють процеси нештатних ситуацій при перевезенні небезпечних вантажів залізничним транспортом, а також процеси ліквідації екологічно небезпечних наслідків таких подій.

У даній роботі досліджується система масового обслуговування з чергою і відносним пріоритетом на вхід якої надходять вимоги вищого і нижчого пріоритетів з інтенсивностями  $\lambda_n, \lambda_L$ , терміни обслуговування вимог показові з інтенсивностями  $\mu_n, \mu_L$ . Вимога вищого пріоритету, яка надійшла у СМО, «виштовхує» вимогу вищого пріоритету після закінчення її обслуговування й займає місце перед нею, якщо вона стоїть у черзі на обслуговування. Вимога нижчого пріоритету, яка була виштовхнута, залишає СМО без обслуговування, якщо у черзі місце немає, а якщо місце є, то вимога стає у чергу, якщо місце існує.

Особливістю пропонованого експерименту, проведеного з метою дослідження функціонування моделі є те, що на її вхід надходить потік подій, які мають негативні наслідки, що суттєво впливають на функціонування цієї моделі (наприклад, зменшують інтенсивність обслуговування в системі). Потік цих «негативних» подій (потік вищого пріоритету) має низьку інтенсивність у порівнянні з потоком нижчого пріоритету й потребує значний час для обслуговування вимог цього потоку.

Складність реалізації аналітичних методів теорії систем масового обслуговування обумовлюють об'ємні форми математичного допису функціонування СМО. Тому при розв'язанні поставленого наукового завдання доцільно використання методів комп'ютерної симуляції.

## 1. Розробка імітаційної моделі СМО із пріоритетними вимогами

Модель розроблено на основі дискретно-подієвого та агентного принципів. При розробці моделі використовувались стандартні блоки бібліотеки *Process Modeling Library*.

популяцію агентів (вимог) *MyAgent* із доданим параметром *priority*.

При моделюванні кожній новій вимозі буде при-  
власнюватись рівень пріоритету:

$priority = 2,0$  – вимоги вищого пріоритету із зна-  
ченням параметру;

$priority = 1,0$  – вимоги нижчого пріоритету із  
значенням параметру.

Симуляція надходження та обслуговування ви-  
мог починається з блоків  $source\_1$  та  $source\_2$ , які фо-  
мують вимоги нижчого та вищого пріоритетів від-  
повідно. При виході згенерованих агентів (вимог) з  
блоків  $source$  параметру  $priority$  присвоюється зна-  
чення рівню пріоритетності вимог:

для агентів (вимог) нижчого пріоритету:

«agent.priority = 1;»;

для агентів (вимог) вищого пріоритету:

«agent.priority = 2;».

Далі агенти (вимоги) потрапляють до загальної  
черги  $q\_Big$ . Даний елемент використовуються для  
формування загальної черги із вимог, що будуть  
прийматись СМО, та обробляться в ній. Черга  $q\_Big$   
не є елементом СМО, що досліджується, і знахо-  
диться за межами СМО.

Черга в елементі  $q\_Big$  формується за загальним  
принципом FIFO («*first in, first out*») із врахуванням  
пріоритетності вимог та модельного часу генерації  
вимоги. Тобто принцип FIFO використовується в ме-  
жах вимог вищого та нижчого пріоритетів. Для вери-  
фікації процесу формування черги вся інформація  
про перебування вимог виводиться у текстове поле:  
чим вище запис у візуальному відображенні форму-  
вання черги (рис. 2), тим ближче знаходиться вимога  
до виходу з блоку  $q\_Big$ . Інформація про всі вимоги  
представлена у вигляді: «*порядковий номер генерації  
вимоги | рівень пріоритету вимоги | модельний час  
генерації вимоги*».

формування черги з вимог вищого пріоритету	59   2.0   46.25755548555329
	62   2.0   48.1663569634813
	63   2.0   48.453920530276484
	65   2.0   49.55600857118395
	66   2.0   50.80820062272476
	67   2.0   51.056665195592
	69   2.0   52.57789533847726
формування черги з вимог нижчого пріоритету	23   1.0   18.74180565204156
	24   1.0   19.891553009613112
	27   1.0   22.500494831050226
	30   1.0   22.946753825482073
	31   1.0   23.632296483761976
	32   1.0   25.13147214439839
	35   1.0   27.67875914479366

Рис. 2. Візуальне відображення формування черги  
у блоці  $q\_Big$

Оскільки в самій СМО кількість місць в черзі  
обмежена, задіяний механізм сепарації вимог за пріо-  
ритетом і формування окремих черг із вимог за ви-  
щим і нижчим пріоритетами відповідно (блоки  $q\_2$  та  
 $q\_1$ ). Сепарація вимог здійснюється елементом  
 $sO\_Big$ . Проходження вимог із загальної черги  $q\_Big$   
до черги СМО здійснюється за допомогою блоку  
типу  $hold$  ( $hold\_big$ , рис. 1). Алгоритм реалізується  
через *Java*-код за допомогою вбудованої функції  
 $fun\_hold\_big()$ :

```
«if ((q_2.size() + q_1.size()) < places){
    hold_big.unlock();
}»
```

Функція  $fun\_hold\_big()$  реалізується при кож-  
ному надходженні будь-якої вимоги до черги  $q\_Big$   
або блоку  $delay$ . Алгоритм функції  $fun\_hold\_big()$  пе-  
ревіряє загальну кількість вимог у черзі СМО, і якщо  
кількість вимог менша за встановлену кількість місць  
у черзі ( $places$ ), то розблоковується блок  $hold\_big$   
(процедура  $hold\_big.unlock()$ ).

В моделі також реалізовано алгоритм прохо-  
дження агентів (вимог) у середину системи «за пріо-  
ритетом» і виштовхування за межі системи агентів  
(вимог) нижчого пріоритету агентами (вимогами) ви-  
щого пріоритету. Зазначений алгоритм реалізовано  
за допомогою блоків типу  $hold$  ( $hold\_1$ ) та додаткової  
функції  $fun\_Logic\_HighPr()$  із *Java*-кодом:

```
«if ((q_2.size() + q_1.size()) =
= places && q_1.size() > 0){
    if (q_Big.size() > 0 &&
    q_Big.get(0).priority == 2){
        q_1.remove(q_1.get(0));
        source_out.inject(1);
        hold_big.unlock();
    }
}»
```

За алгоритмом, у випадку надходження до СМО  
агенту (вимоги) вищого пріоритету та при відсутно-  
сті вільних місць у черзі СМО, агент (вимога) ни-  
жчого пріоритету «виштовхується» із черги СМО  
(блоку  $q\_1$ ) та замінюється відповідним агентом (ви-  
могою) вищого пріоритету з загальної черги (блоку  
 $q\_Big$ ).

Для симуляції обробки агентів (вимог) викорис-  
товується блок  $Delay$  із одним місцем (одним прила-  
дом обслуговування). Агенти (вимоги) вищого пріо-  
ритету обслуговуються в першу чергу та поступають  
одразу з блоку  $q\_2$  до блоку  $Delay$  без затримок.

Надходження агентів (вимог) нижчого пріори-  
тету регулюється функціонально за допомогою  
блоку  $hold\_1$  та функції  $fun\_Logic\_LowPr()$  із *Java*-  
кодом:

```
«if (q_2.size() == 0 && q_1.size() > 0){
    hold_1.unlock();
}»
```

При проходженні агентом (вимогою) блоку  
 $hold\_1$  за допомогою *Java*-коду блок  $hold\_1$  блоку-  
ється:

```
«hold_1.block();»
```

Під час моделювання збираються дані щодо імо-  
вірності обслуговування або виштовхування вимог за  
загальним принципом:

$$\xi = \frac{\sum N_{i,success}}{\sum N_i},$$

де  $\sum N_{i,success}$  – кількість  $i$ -х подій, що були оброб-  
лені в системі, або витиснені із системи;

$\sum N_i$  – загальна кількість  $i$ -х подій, згенерованих  
під час моделювання.

Крім того формується статистична інформація  
щодо середнього розміру черг та часу перебування  
вимог у системі масового обслуговування під обслу-  
говуванням або очікуванням.



## 2. Результати експериментів та обговорення результатів

Для дослідження закономірностей формування черг та імовірностей обслуговування у системі проведено серію експериментів на чутливість моделі, де параметром, що змінюється, є вхідний потік вимог вищого пріоритету ( $\lambda_H \in [0,001; 0,5]$ ) при різних значеннях інтенсивності їхнього обслуговування ( $\mu_H \in [0,001; 0,5]$ ). Інші вихідні дані експериментів подані у табл. 1.

Основні результати моделювання наведені на рис. 3 – 8. Дані рис. 3 свідчать про те, що імовірність обслуговування вимог вищого пріоритету зменшується із наближенням інтенсивності обслуговування вимог вищого пріоритету до 0,5. Причому «точка перелому» на початку зменшення імовірності з 1,0 починається у момент рівноваги інтенсивностей надходження та обслуговування вимог вищого пріоритету, тобто у цій точці:

$$\lambda_H = \mu_H.$$

Таблиця 1 – Вихідні параметри експериментів

Параметр моделювання	Умовна позначка	Діапазон значень	Щільність розподілу
Інтенсивність надходження вимог вищого пріоритету (High)	$\lambda_H$	0,001 – 0,5; крок 0,001	експонентний
Інтенсивність надходження вимог нижчого пріоритету (Low)	$\lambda_L$	0,5 – const	експонентний
Інтенсивність обслуговування вимог вищого пріоритету (High)	$\mu_H$	0,001 – 0,5; крок 0,1	експонентний
Інтенсивність обслуговування вимог нижчого пріоритету (Low)	$\mu_L$	0,5 – const	експонентний
Кількість каналів обслуговування		1	
Кількість місць в черзі СМО		4	
Кількість пріоритетів		2	
Одиниця модельного часу		година	
Тривалість модельного часу		6 місяців (4392 години)	

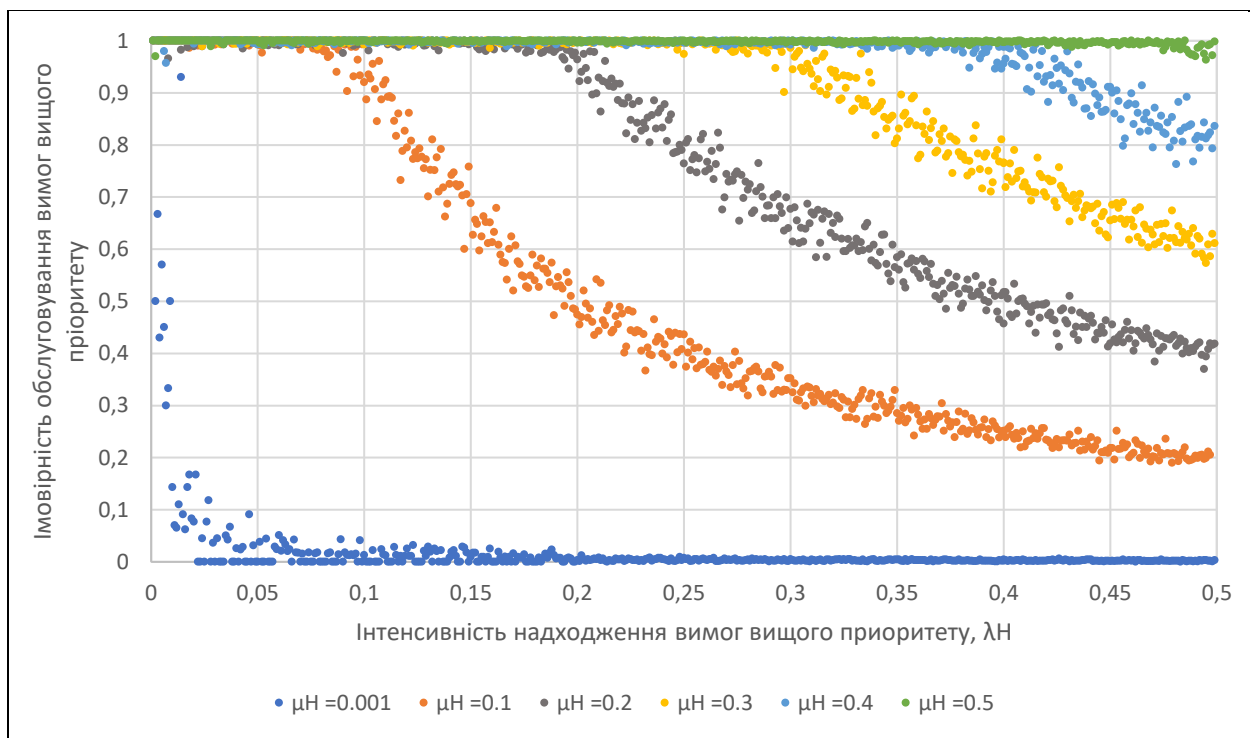


Рис. 3. Імовірність обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їхнього надходження та обслуговування

Спадна частина залежності імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету (рис. 4) щільно описується ступеневою функцією виду:

$$y = kx^{-c},$$

де  $k$  та  $c$  – коефіцієнти;

$$\begin{aligned} \text{для } \mu_H = 0,1: & y = 0.0994x^{-0.998}, \\ \text{для } \mu_H = 0,2: & y = 0.2032x^{-0.981}, \\ \text{для } \mu_H = 0,3: & y = 0.3067x^{-0.97}. \end{aligned}$$

Результат апроксимації ступеневиими залежностями періодів падіння імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їх обслуговування та надходження подано на рис. 4.

З отриманих на рис. 4 даних можна записати:

$$\begin{cases} P_{\mu_H} = \mu_H \lambda_H^{-1}, & \lambda_H > \mu_H, \\ P_{\mu_H} = 1, & \lambda_H \leq \mu_H. \end{cases}$$

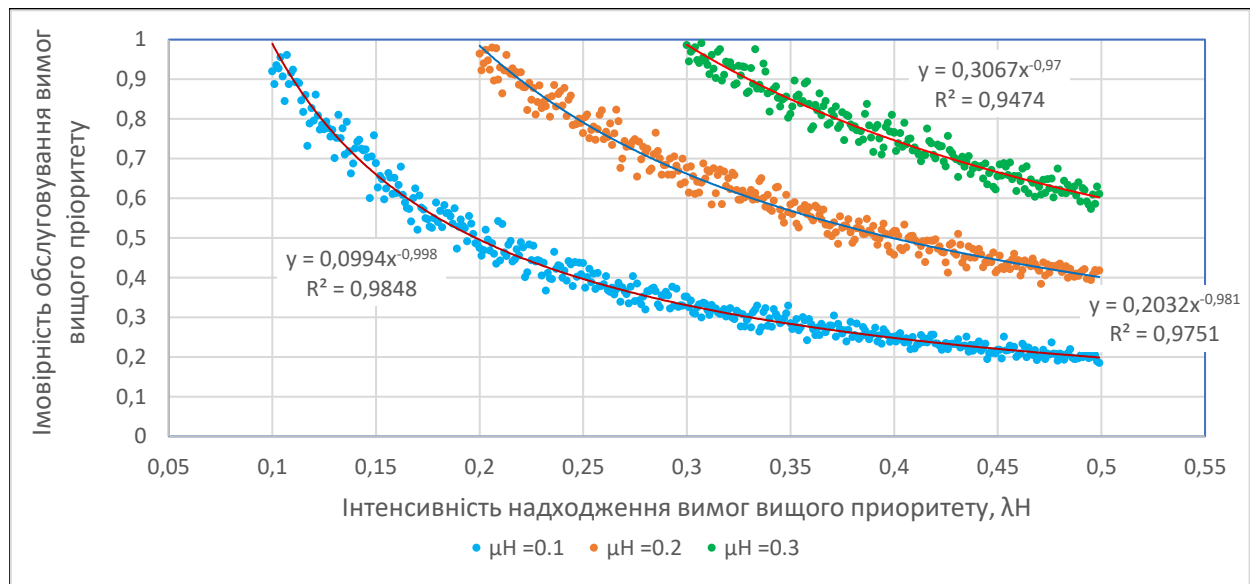


Рис. 4. Апроксимація ступеневими залежностями періодів падіння імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їх обслуговування та надходження

Якщо округлити значення  $k$  до десятих, то отримаємо:

$$P_{\mu_H} = \mu_H \lambda_H^{-C}, \lambda_H \geq \mu_H,$$

то остаточно:

$$P_{0,1} = 0,1\lambda_H^{-1}, \lambda_H \in [0,1, \dots, 0,5],$$

$$P_{0,2} = 0,2\lambda_H^{-1}, \lambda_H \in [0,2, \dots, 0,5],$$

$$P_{0,3} = 0,3\lambda_H^{-1}, \lambda_H \in [0,3, \dots, 0,5].$$

Залежність інтенсивності  $\mu_H$  обслуговування вимог вищого пріоритету від імовірності  $P_H$  та інтенсивності  $\lambda_H$  надходження вимог вищого пріоритету подано у табл. 2.

Таблиця 2 – Залежність величини  $\mu_H$  від величин  $P_H$  та  $\lambda_H$

$P_H$	$\lambda_H$	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5
1.00	$\mu_{H1,0}$	0.10	0.20	0.30	0.40	0.50
0.90	$\mu_{H0,9}$	0.09	0.18	0.27	0.36	0.45
0.80	$\mu_{H0,8}$	0.08	0.16	0.24	0.32	0.40
0.70	$\mu_{H0,7}$	0.07	0.14	0.21	0.28	0.35
0.60	$\mu_{H0,6}$	0.06	0.12	0.18	0.24	0.30
0.50	$\mu_{H0,5}$	0.05	0.10	0.15	0.20	0.25
0.40	$\mu_{H0,4}$	0.04	0.08	0.12	0.16	0.20
0.30	$\mu_{H0,3}$	0.03	0.06	0.09	0.12	0.15
0.20	$\mu_{H0,2}$	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
0.10	$\mu_{H0,1}$	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05

Графіки залежності величин  $\mu_H$  від  $P_H$  та інтенсивності  $\lambda_H$  для  $P_H = 1,0$ ;  $P_H = 0,7$ ;  $P_H = 0,5$  та  $P_H = 0,3$  представлено на рис. 5. З табл. 2 і рис. 5 видно, що для збільшення величини  $P_H(\lambda_H, \mu_H)$  необхідно збільшення величин  $\mu_H$ . Так, для збільшення  $P_H$  на 0,1 необхідне збільшення  $\mu_H$  на 1% при  $\lambda_H = 0,1$ , при  $\lambda_H = 0,2$  – на 2% й т.п., при  $\lambda_H = 0,5$  збільшення становить 5% від попередніх значень  $\mu_H$ .

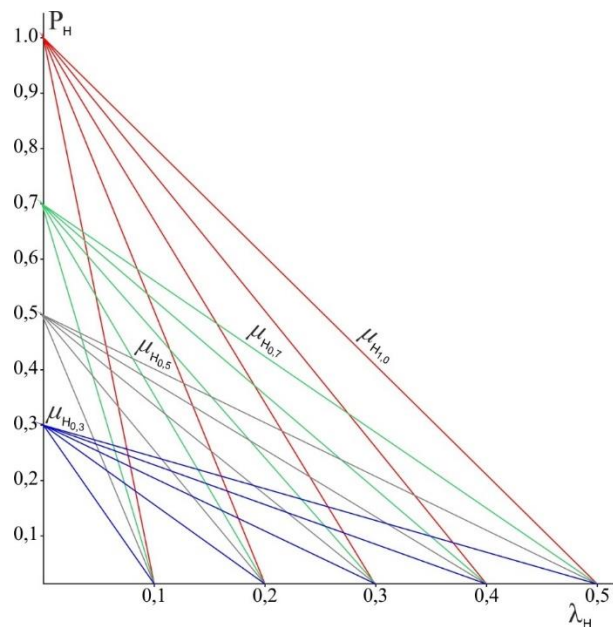
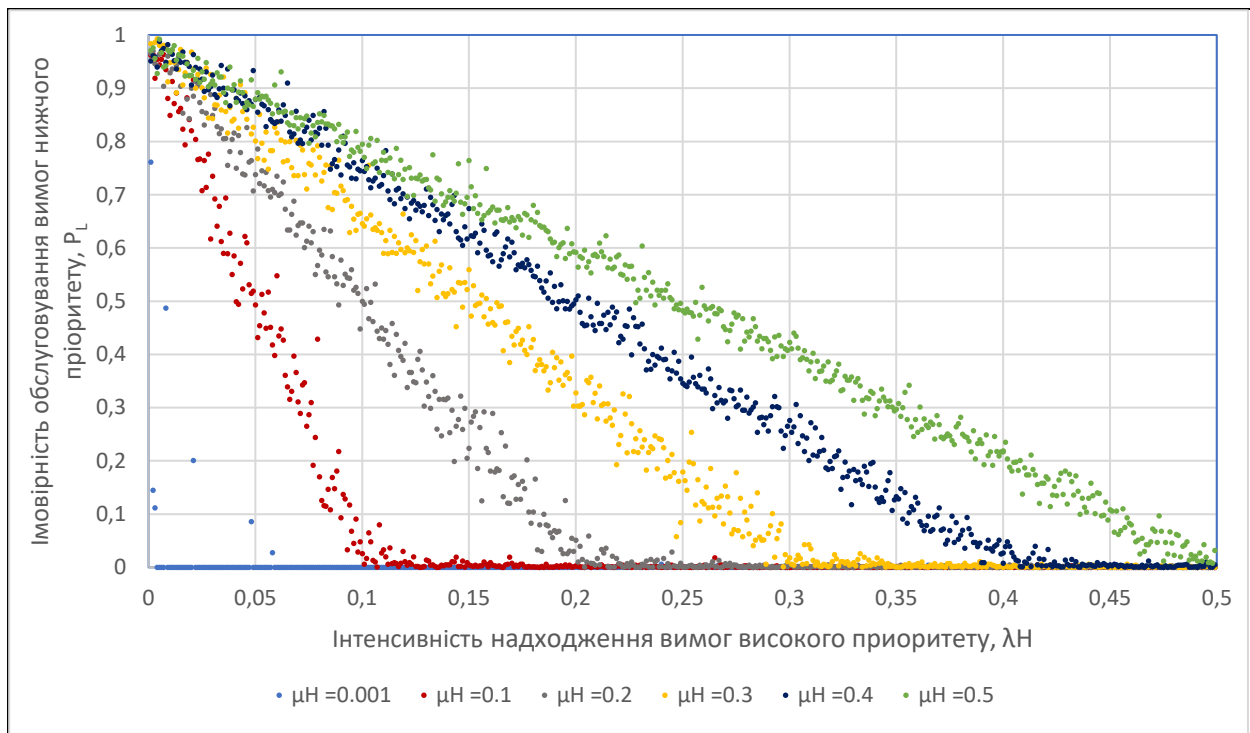


Рис. 5. Графік залежності величин  $\mu_H$  від величин  $\lambda_H$  при  $P_H = 1,0$ ;  $P_H = 0,7$ ;  $P_H = 0,5$  та  $P_H = 0,3$

Графік імовірностей  $P_L$  обслуговування вимог нижчого пріоритету залежно від інтенсивностей обслуговування  $\mu_H$  та надходження  $\lambda_H$  вимог вищого пріоритету подано на рис. 6.

З рис. 6 видно, що імовірність обслуговування вимог нижчого пріоритету має спадний характер, причому «різкість» характеру падіння обернено пропорційна інтенсивності обслуговування вимог вищого пріоритету.

Розглянемо функцію  $P_L(t)$  залежно від інтенсивності  $\mu_H$  і часу  $t_H = 1 / \lambda_H$  інтервалу між вимогами вищого пріоритету вхідного потоку. Функція  $P_L(t)$  є функцією імовірності безвідмовного обслуговування вимог нижчого пріоритету, яка має лінійний характер. Середній час безвідмовного обслуговування цих вимог дорівнює площі, що обмежена лінією  $P_L(t)$  і осями координат  $P_L(t)$  та  $t_H$ .



**Рис. 6.** Імовірність обслуговування  $P_L$  вимог нижчого пріоритету залежно від інтенсивності обслуговування та обслуговування вимог вищого пріоритету

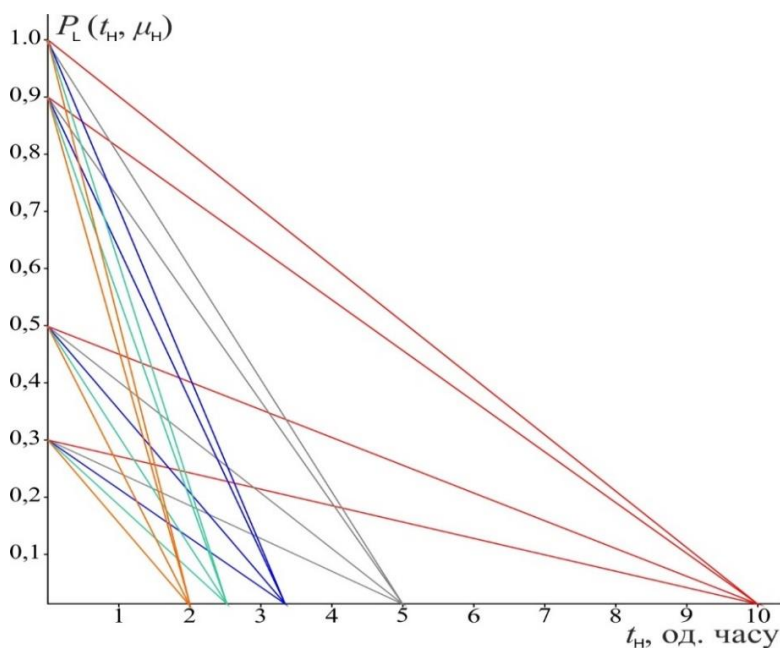
Залежність величини імовірності  $P_L(t)$  обслуговування вимог нижчого пріоритету від інтенсивності  $\mu_H$  обслуговування вимог вищого пріоритету і тривалості інтервалу часу  $t_H$  між цими вимогами у вхідному потоці подано на рис. 7. Дійсно, із збільшенням величини  $\mu_H$  зменшується середня тривалість обслуговування, одночасно з цим із збільшенням величини  $\lambda_H$  зменшується інтервал між вимогами у вхідному потоці вимог вищого пріоритету, що призводить до збільшення середньої кількості таких вимог, отже й до більшого завантаження каналу обслуговування, що у свою чергу, перешкоджає надходженню у канал

обслуговування вимог нижчого пріоритету й зменшує ймовірність  $P_L$  їхнього обслуговування.

З рис. 7 видно, що при зменшенні величини  $t_H$  при  $P_L(t_H, \mu_H) = \text{const}$ , чи величини  $P_L(t_H, \mu_H)$  при  $t_H = \text{const}$  величина  $\bar{t}_L 0.5 P_L(t_H, \mu_H) t_H$  зменшується.

Для збільшення величини  $P_L(t_H, \mu_H)$  при певному значенні  $t_H$  необхідно збільшення величини  $\mu_H$ , тобто більш інтенсивне обслуговування вимог вищого пріоритету.

На рис. 8 відображено графіки залежності ймовірності виштовхування  $P_{LV}$  вимог нижчого пріоритету.



**Рис. 7.** Графіки залежності імовірності  $P_L(t_H, \mu_H)$  від величин  $\mu_H$  і  $t_H$

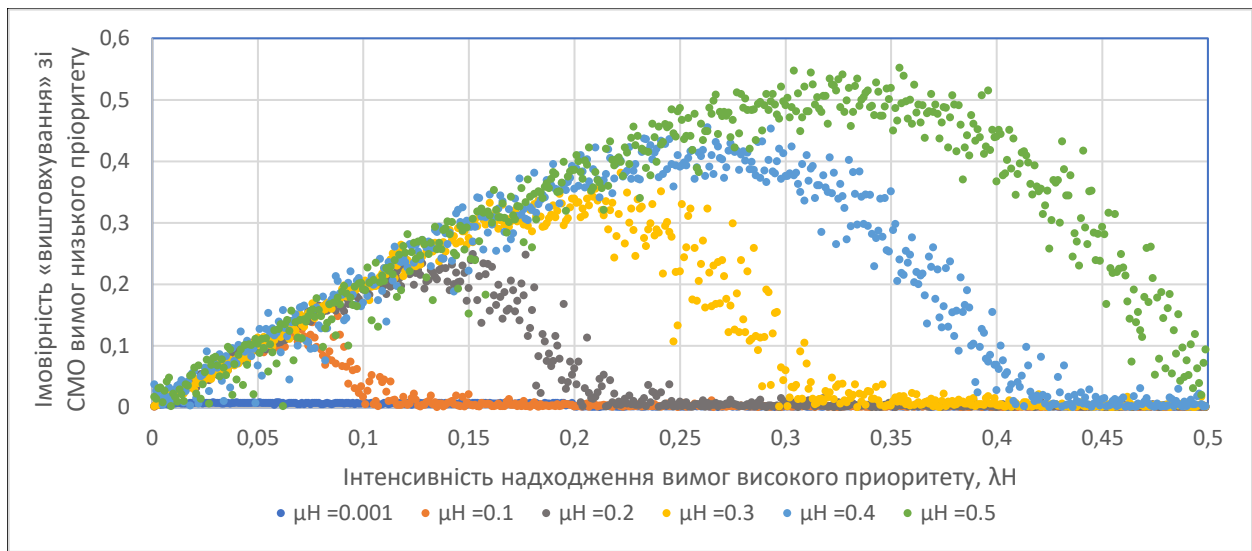


Рис. 8. Імовірність  $P_{LB}$  «виштовхування» зі СМО вимог нижчого пріоритету вимогами високого пріоритету залежно від інтенсивностей обслуговування та надходження вимог високого пріоритету

Процеси, які пов'язані із збільшенням  $P_{LB}$ , детально описані вище, зменшення  $P_{LB}$  після досягнення її максимуму, пов'язано із зменшенням кількості вимог нижчого пріоритету і завантаженості каналу обслуговування. Максимальному значенню  $P_{LB}$  відповідає величина  $\lambda_{H,екстр}$ . Для визначення величини

$\lambda_{H,екстр}$  отримані залежності ймовірності  $P_{LB}$ , апроксимовано поліномом шостого ступеню, виду :

$$y = a_6x^6 + \dots + a_1x + C.$$

Коефіцієнти поліномів, що апроксимують ймовірності  $P_{LB}$  величини  $\lambda_{H,екстр}$  представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Коефіцієнти поліномів, що апроксимують ймовірності «виштовхування» СМО вимог низького пріоритету

Коефіцієнт полінома	$\mu_H=0.1$	$\mu_H=0.2$	$\mu_H=0.3$	$\mu_H=0.4$	$\mu_H=0.5$
$a_6$	-1767609	97550.53	4593.061	1980.917	983.323
$a_5$	431830.5	-54236	-3453.6	-2276.31	-1392
$a_4$	-42096	10862.98	857.173	966.0881	721.876
$a_3$	1791.001	-1046.51	-114.584	-212.099	-184.777
$a_2$	-34.143	48.5078	8.249455	23.6418	23.30407
$a_1$	2.292621	1.042772	1.748402	0.770417	0.615751
$a_0$	-0.00172	0.004007	-0.0002	0.017116	0.019575
Екстремум, $\lambda_{H,екстр}$	0.071	0.135	0.198	0.2628	0.328

Знання екстремумів ймовірностей виштовхування вимог нижчого пріоритету та відповідних ним інтенсивностей вхідного потоку та обслуговування вимог вищого пріоритету має прикладне значення, наприклад, для прийняття рішень щодо розподілу потіздів різних пріоритетів (відбудовних, пасажирських, вантажних, інших видів) по різних вузлах та маршрутах транспортної мережі.

### Висновки

1. З урахуванням практичного досвіду функціонування та забезпечення надійності залізничної транспортної системи в екстремальних умовах воєнних дій, руйнувань та відновлення інфраструктури, дефіциту часу і парку транспортних засобів, запропоновано формалізувати функціонування цієї системи як СМО з пріоритетами, із змінними параметрами вхідних

потоків та обслуговування вимог вищого та нижчого пріоритетів, що дозволяє приймати більш обґрунтовані рішення для управління подібними системами.

2. Доведена необхідність використання, поруч з аналітичними методами, інструментів імітаційного моделювання, зокрема розроблена та реалізована імітаційна модель, яка поєднує агентний та дискретно-подієвий принципи симуляції і дозволяє вивчати системи масового обслуговування при надходження вимог різного пріоритету, а саме в частині встановлення закономірностей:

- ймовірностей (обслуговування, відмови, виштовхування),
- затримок часу (перебуванням у черзі, під обслуговуванням),
- порядку формування черги при надходження вимог різного пріоритету,

- розмірів черги.
- 3. Отримані залежності:
  - імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їхнього надходження та обслуговування;
  - імовірності обслуговування вимог нижчого пріоритету залежно від інтенсивності обслуговування та обслуговування вимог вищого пріоритету;
  - імовірності «виштовхування» зі СМО вимог нижчого пріоритету вимогами вищого пріоритету залежно від інтенсивностей обслуговування та надходження вимог вищого пріоритету;
  - величини імовірності  $P_L$  від величин інтенсивності обслуговування  $\mu_H$  вимог вищого пріори-

тету та тривалості інтервалу  $t_H$  між цими вимогами у вхідному потоці;

- величини інтенсивності обслуговування вимог вищого пріоритету  $\mu_H$  від імовірності  $P_H$  та інтенсивності їх надходження  $\lambda_H$ .

4. У результаті апроксимації експериментальних даних імовірності обслуговування вимог вищого пріоритету залежно від інтенсивностей їхнього надходження та обслуговування лінійними залежностями встановлено, що:

$$\begin{cases} P_{\mu_H} = \mu_H \lambda_H^{-1}, & \lambda_H > \mu_H, \\ P_{\mu_H} = 1, & \lambda_H \leq \mu_H. \end{cases}$$

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. I. Makushenko, I. Usar, H. Livinska, and M. Sharapov, "Optimal threshold strategies for retrial systems with queue," *J. Comput. Appl. Math.*, vol. 427, p. 115136, Aug. 2023, doi: 10.1016/J.CAM.2023.115136.
2. A. Aghsami, S. R. Abazari, A. Bakhshi, M. A. Yazdani, S. Jolai, and F. Jolai, "A meta-heuristic optimization for a novel mathematical model for minimizing costs and maximizing donor satisfaction in blood supply chains with finite capacity queueing systems," *Healthc. Anal.*, vol. 3, p. 100136, Nov. 2023, doi: 10.1016/J.HEALTH.2023.100136.
3. H. Jahani, A. E. Chaleshtori, S. M. S. Khaksar, A. Aghaie, and J. B. Sheu, "COVID-19 vaccine distribution planning using a congested queueing system—A real case from Australia," *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.*, vol. 163, p. 102749, Jul. 2022, doi: 10.1016/J.TRE.2022.102749.
4. A. Mazaraki, V. Matsiuk, N. Ilchenko, O. Kavun-Moshkovska, and T. Grygorenko, "Development of a multimodal (railroad-water) chain of grain supply by the agent-based simulation method," *Eastern-European J. Enterp. Technol.*, vol. 6, no. 3 (108), pp. 14–22, Dec. 2020, doi: 10.15587/1729-4061.2020.220214.
5. K. Abdulaziz Alnowibet, A. Khireldin, M. Abdelawwad, and A. Wagdy Mohamed, "Airport terminal building capacity evaluation using queueing system," *Alexandria Eng. J.*, vol. 61, no. 12, pp. 10109–10118, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.AEJ.2022.03.055.
6. "Вычислительные системы с очередями — Леонард Клейнрок." <https://www.livelib.ru/book/1001277388-vychislitelnye-sistemy-s-ocheredyami-leonard-klejnrok> (accessed Mar. 03, 2023).
7. D. P. Bertsekas and R. G. Gallager, "Сети передачи данных," p. 486, 1986, Accessed: Mar. 03, 2023. [Online]. Available: <http://libarch.nmu.org.ua/handle/GenofondUA/60656>.
8. "Управление моделью системы массового обслуживания с использованием динамических приоритетов - CORE Reader." <https://core.ac.uk/reader/80134930> (accessed Mar. 15, 2023).
9. V. Matsiuk, N. Ilchenko, O. Pryimuk, D. Kochubei, and A. Prokhorchenko, "Risk assessment of transport processes by agent-based simulation," *AIP Conf. Proc.*, vol. 2557, no. 1, p. 080003, Oct. 2022, doi: 10.1063/5.0105913.
10. V. Matsiuk, O. Galan, A. Prokhorchenko, and V. Tverdomed, "An Agent-Based Simulation for Optimizing the Parameters of a Railway Transport System."
11. M. D. Katsman, V. K. Myronenko, V. I. Matsiuk, and P. V. Lapin, "Approach to determining the parameters of physical security units for a critical infrastructure facility," *Reliab. Theory Appl.*, vol. 16, no. 1, pp. 71–80, 2021, doi: 10.24412/1932-2321-2021-161-71-80.
12. M. D. Katsman, V. K. Myronenko, and V. I. Matsiuk, "Mathematical models of ecologically hazardous rail traffic accidents," *Reliab. Theory Appl.*, vol. 10, no. 1 (36), 2015, Accessed: Nov. 14, 2020. [Online]. Available: <https://cyberleninka.ru/article/n/mathematical-models-of-ecologically-hazardous-rail-traffic-accidents>.

Received (Надійшла) 27.03.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 19.07.2023

#### Modeling the reliability of transport under extreme conditions of operation as a queueing system with priorities

M. Katsman, V. Matsyuk, V. Myronenko

**Abstract.** The article presents a simulation model of a queueing system (QS) with a queue and relative priority, which can be used to manage the reliability of transport systems under resource constraints. The developed simulation model combines agent and discrete-event simulation principles and allows studying queueing systems in terms of establishing regularities: probabilities (service, failure, push-out), time delays (waiting in a queue, under service), queue sizes, order of queue formation upon arrival of clients of different priority. As a result of the research, dependencies were obtained for the probability of servicing higher priority clients depending on the intensities of their arrival and service; probabilities of servicing lower priority clients depending on the intensity of service and servicing of higher priority clients; the probability of "pushing out" lower priority clients from the QS by higher priority clients depending on service intensities and the arrival of high priority clients.

**Keywords:** transport system, agent modeling, simulation modeling, queueing systems, absolute priority, arrival and service intensity, service and push-out probabilities, client service probabilities.

К. Г. Ковцур<sup>1</sup>, Н. Г. Ескожанова<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

<sup>2</sup> Казахський автомобільно-дорожній інститут ім. Л.Б. Гончарова, Алмати, Республіка Казахстан

## ПІДХІД ДО ВИБОРУ АЛЬТЕРНАТИВИ СПОСОБІВ АДРЕСНОЇ ДОСТАВКИ

**Анотація.** У статті розглянуті альтернативні способи здійснення адресної доставки, такі як доставка легковим автомобілем, доставка мопедом, велосипедом та пішки кур'єром. В дослідженні визначені фактори, що чинять вплив на вартість доставки. Для конкретних умов доставки запропоновано раціональні альтернативи для адресної доставки, які забезпечать економічну ефективність, екологічну стійкість та соціальну відповідність. Як критерій ефективності запропоновано витрати на доставку та час доставки. Представлені результати можуть бути використані підприємствами-постачальниками товарів, в яких організовано та впроваджено адресу доставку.

**Ключові слова:** адресна доставка, час доставки, витрати на організацію доставки, роздрібна торгівельна мережа, транспорт.

### Вступ

Починаючи з весни 2020 р. через запровадження в Україні карантинних обмежень багато суб'єктів господарювання перемістили свою торгівлю зі стаціонарних магазинів в інтернет-магазини. У зв'язку з цим у нових інтернет-торговців виникало багато питань з приводу організації адресної доставки замовлених товарів клієнтам.

Адресна доставка або доставка останньої милі – це фаза ланцюгів постачань, що включає діяльність, за допомогою якої товари фізично переміщуються до замовника. Такий ланцюг представляє потік товару між компаніями та замовниками [1]. Постачальникам послуг доставки доводиться стикатися зі складнощами, такими як розбіжність структури розподілу вантажоотримувачів, велика кількість невеликих за розміром замовлень, різноманітні та змінні вимоги споживачів.

Створені системи адресної доставки на сьогодні ще вимагають удосконалення через низку існуючих «вузких» місць у всіх учасників такої системи [2, 3].

Так, покупці часто стикаються з проблемами доставки, такими як затримки в доставці, втрата замовлення, пошкодження або незручні години доставки. Доставка до пункту самовивозу або альтернативні служби доставки можуть забезпечити більш зручний та надійний спосіб отримання товару. Продавці ж часто стикаються з такими проблемами, як високі витрати на доставку або складність організації доставки для клієнтів. Не слід забувати і про екологічну складову. Традиційні способи доставки можуть мати негативний вплив на довкілля через велику кількість викидів вуглекислого газу. Однак альтернативні способи доставки, такі як велосипедні кур'єри або електричні автомобілі можуть знизити викиди вуглекислого газу та зробити доставку більш екологічною.

Отже питання дослідження альтернативних способів доставки, які можуть знизити витрати на доставку та зробити процес доставки більш ефективним та зручним для продавців та їх клієнтів, є актуальним питанням сьогодення.

**Аналіз досліджень і публікацій.** З метою підвищення ефективності роботи служби доставки виникає на практиці ряд питань [4, 5]. Одним з таких питань є визначення і обґрунтування тарифів за доставку. Раціональним вбачається надання клієнтам кількох варіантів доставки і забезпечення прозорості термінів доставки. Можна виділити п'ять основних способів встановлення плати за здійснення адресної доставки:

– безкоштовна доставка для всіх замовлень. В цілому, таку доставку для усієї номенклатури товару важко здійснити. Як показує досвід провідних українських та казахських торговельних компаній перед прийняттям цього рішення потрібно проаналізувати наступне: чи пропонує безкоштовну або більш дешеву доставку сторонній постачальник послуг (якщо конкуренти не пропонують безкоштовну доставку, то можна повністю виключити цей спосіб); чи є час і ресурси для реклами цієї пропозиції; чи є фінансова спроможність у компанії, щоб дозволити пробний запуск безкоштовної адресної доставки. Для підвищення якості обслуговування клієнтів доцільним є впровадження безкоштовної адресної доставки. Однак потрібно мати на увазі, що крупні торговельні платформи фактично не надають безкоштовну доставку для більшості клієнтів. Зазвичай вартість такої доставки вже включена в основну вартість товару. Таким чином, навіть такі крупні торговці як Amazon знаходять спосіб стягнення плати за доставку;

– безкоштовна доставка на деякі види товарів. Такий спосіб може бути впроваджений, якщо у компанії широкий асортимент товарів. Можна впровадити безкоштовну доставку для товарів з високою вартістю, де прибуток від продажу буде більшим за витрати на доставку. Але такий спосіб стягнення плати може виявитись не зручним для клієнтів через незрозумілість, які саме продукти мають безкоштовну доставку;

– безкоштовна доставка, коли клієнти досягають мінімальної точки купівлі – це дуже поширений спосіб стягувати плату за адресу доставку серед клієнтів. Така система заохочує великі покупки і її можна рекламувати як вигоду. Але при цьому необ-



хідно обов'язково проводити регулярний моніторинг витрат, щоб мати змогу порівнювати отримані доходи з витратами на доставку;

– єдиний тариф доставки для всіх продуктів і клієнтів – це найпростіша стратегія для налаштування. Більшість перевізників надають фіксовану вартість адресної доставки. Клієнти рідше плутаються, але тим не менш, багатьом клієнтам не подобається фіксована плата за доставку через те, що ці витрати є додатковою статтею витрат замовника;

– доставка нараховується за замовленням – це одна з найскладніших систем для налаштування і пояснення. Багато інтернет-магазинів використовують саме цей спосіб. Він гарантує, що транспортні витрати повністю покриваються за всіма замовленнями. У більшості операторів є системи API в реальному часі для розрахунку вартості доставки для клієнтів. Однак клієнтам це зазвичай не подобається, так як доставка для них виходить дорожче в порівнянні з фіксованою ставкою.

З урахуванням динамічного розвитку інтернет-доставок та інтернет-торгівлі в цілому все більшу роль у виборі програмного забезпечення для кур'єрських служб відіграє можливість розраховувати вартість доставки автоматично.

Аналіз сучасного стану роздрібною торгівлі доводить важливість впровадження адресної доставки в роздрібні торговельні мережі.

Особливо гостро став перехід роздрібних мереж до е-комерції в умовах неможливості здійснення офлайн-покупок, що стало актуальним на протязі пандемії [6].

Результати існуючих систем організації доставки в роздрібних торгових мережах показали, що існуючі підходи визначення вартості доставки є необґрунтовані і визначені інтуїтивно логістами. Виходячи з цього, доцільно розробити заходи щодо підвищення ефективності адресної доставки за рахунок вибору раціонального варіанту схеми доставки для конкретних умов доставки в залежності від характеристик району обслуговування та попиту на адресну доставку.

### Постановка завдання

**Мета роботи** – підвищення ефективності функціонування системи адресної доставки вантажів роздрібною торговельною мережею за рахунок раціонального способу доставки в заданих умовах.

Підхід до вибору альтернативних способів адресної доставки має включати наступні кроки:

1. Аналіз потреб клієнтів. Для того, щоб зрозуміти, які альтернативні способи доставки можуть бути використані, необхідно заздалегідь вивчити потреби та вимоги клієнтів. Наприклад, якщо більшість клієнтів проживає в містах, то можна розглянути можливість використання кур'єрської доставки.

2. Аналіз ринку. Важливо вивчити, які способи доставки використовують конкуренти та які є тенденції на ринку. Наприклад, якщо більшість конкурентів використовують поштову доставку, то можна розглянути можливість використання кур'єрської доставки для забезпечення конкурентної переваги.

3. Аналіз вартості та ефективності. Для цього необхідно вивчити вартість та ефективність кожного способу доставки. Наприклад, якщо кур'єрська доставка є дорожчою, ніж поштова, то можна розглянути можливість використання поштової доставки для зниження витрат.

4. Вибір оптимального способу доставки. Після аналізу потреб клієнтів, ринку та вартості та ефективності кожного способу доставки, необхідно вибрати оптимальний спосіб доставки, який задовольняє потреби клієнтів та є ефективним з точки зору вартості та часу доставки.

### Виклад основного матеріалу

Аналізуючи роботу служб адресної доставки можна зазначити, що однією з важливих умов забезпечення ефективності адресної доставки є повне задоволення потреб клієнта з найменшими витратами. Для багатьох клієнтів терміновість та вартість доставки є основним фактором при виборі. Для цього необхідно обрати спосіб адресної доставки, який найбільш задовольняє потреби клієнтів та несе менші втрати.

У зв'язку з цим виникають певні питання щодо визначення раціонального типу транспортного засобу та виду доставки. Під час вибору типу транспортного засобу враховують швидкість і терміни доставки, рівень зберігання вантажів, зручність підвезення-вивезення, регулярність перевезень, комплексність обслуговування та інші якісні характеристики.

Собівартість адресної доставки є найважливішим узагальнюючим показником, що характеризує економічну сторону діяльності служби доставки. У ній відображається якість усієї роботи:

стан технічної оснащеності,  
ступінь використання основних засобів,  
рівень застосовуваних нормативів витрат усіх видів ресурсів,  
кадрова політика,  
якість управлінської праці

та багато інших характеристик та показників роботи підприємства.

Загальні витрати на організацію адресної доставки можна представити таким чином

$$B = B^{nocm} + B^{zm}, \quad (1)$$

де  $B^{nocm}$  – постійні витрати, грн.;  $B^{zm}$  – змінні витрати, грн.

В процесі розвезення замовлень клієнтам беруть участь перевізник (транспорт) і роздрібна мережа. Цільова функція даного процесу матиме такий вигляд

$$B = \sum_{i=1}^m B^{nocm} + \sum_{i=1}^n B^{zm} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $B^{nocm}$ ,  $B^{zm}$  – відповідно загальні постійні, змінні витрати транспорту під час розвезення вантажів від торговельних точок роздрібною мережею до клієнта протягом доби  $i$ -ми маршрутами, грн.;  $m$  – кількість

маршрутів, що обслуговують клієнтів, од.;  $n$  – кількість пунктів завезення, од.

Розписавши складові витрат в формулі (2) маємо

$$B = B^{nocm} \cdot T_M + B^{3M} \cdot L_{3az}, \quad (3)$$

де  $T_M$  – час роботи на маршруті, год;  $L_{3az}$  – загальний пробіг транспортного засобу, км.

Загальний пробіг розраховується за формулою

$$L_{3az} = l_0 + l_{ван} + l_x, \quad (4)$$

де  $l_x$  – холостий пробіг, км;  $l_{ван}$  – пробіг з вантажем, км;  $l_0$  – нульовий пробіг, км.

Час роботи на маршруті розраховується за формулою

$$T_M = t_{пух} + t_{nep}, \quad (5)$$

$$t_{пух} = \frac{l_{ван}}{V}, \quad (6)$$

де  $V$  – середня швидкість руху на маршруті, км/год.

Сумарний час перерв у русі визначається за формулою

$$t_{nep} = t_o + t_{дон} \quad (7)$$

де  $t_o$  – час на очікування клієнта або збирання замовлення, год;  $t_{дон}$  – час на доставку до дверей клієнта (якщо є потреба), год.

Змінні витрати враховують нормативні значення витрат на 1 км пробігу та загальний пробіг. Постійні витрати включають витрати на заробітну плату.

Витрати по заробітній платі водіїв складаються із заробітної плати по тарифу ( $Z_m$ ), заробітної плати за експлуатацію ( $Z_{ecnл}$ ), премії з фонду заробітної плати ( $Z_{np}$ ), додаткової заробітної плати ( $Z_{соц}$ )

$$ЗП = Z_m \cdot n_3 + Z_{ecnл} + Z_{np} + Z_{соц}, \quad (8)$$

Для водіїв транспортного засобу заробітна плата за тарифом дорівнює

$$Z_m = C_3, \quad (9)$$

де  $C_3$  – базова тарифна ставка кур'єра за одне замовлення,  $C_3 = 20$  грн./од.

$$Z_{експ} = C_{км} \cdot L, \quad (10)$$

де  $C_{км}$  – ставка за кілометр загального пробігу,  $C_{км} = 6$  грн/км.

Премія за високоякісне виконання завдання приймається по прийнятій на підприємстві системі преміювання

$$Z_{np} = Z_m \cdot \frac{\Pi}{100}, \quad (11)$$

де  $\Pi$  – відсоток премії,  $\Pi = 50$  %.

Нарахування за соціальне страхування розраховується за формулою

$$Z_{соц} = \frac{ЗП \cdot T}{100}, \quad (12)$$

де  $T$  – тарифна ставка відрахувань до фондів,  $T = 22$  %.

Якщо обрати фіксовану вартість АД для клієнта незалежно від відстані та ваги замовлення, тоді клієнт буде сплачувати водієві за його працю. Тобто заробітна плата водія буде становити

$$ЗП_{ф} = n_3 \cdot S_{ф} + Z_{np}. \quad (13)$$

де  $S_{ф}$  – фіксована вартість доставки, грн

Час доставки залежить від таких параметрів

$$t_{xij}^{nep} = f(\delta_{zij}; R_{xij}; L_{xij}^{nos}) \quad (14)$$

де  $\delta_{zij}$  – коефіцієнт ухилу на шляху руху від  $i$ -го учасника роздрібною мережі до  $j$ -го клієнта в  $x$ -й зоні обслуговування;  $R_{xij}$  – коефіцієнт непрямої лінійності сполучення;  $L_{xij}^{nos}$  – відстань від  $i$ -го учасника роздрібною мережі до  $j$ -го клієнта в  $x$ -й зоні обслуговування, км.

Адресна доставка може відбуватися одним з альтернативним способом: шляхом доставки замовлення легковими автомобілями з двигуном внутрішнього згорання, велосипедами, доставка міським пасажирським транспортом, «попутна» та піша доставки у межах міста (crowd-shipping) тощо.

При перерахунку всіх витрат доставки шляхом перевезення легковим автомобілем необхідно враховувати усі статті можливих витрат. До них слід віднести витрати на паливо, витрати на мастильні матеріали, витрати на відновлення зносу і ремонт шин транспортного засобу, витрати на технічне обслуговування та ремонт транспортного засобу, витрати на амортизаційні відрахування та обов'язкове страхування цивільно-правової відповідальності власників транспортних засобів.

Витрати на паливо для легкових автомобілей з двигуном внутрішнього згорання визначаються

$$B_n = H_n \cdot \Pi_{л}, \quad (15)$$

де  $H_n$  – нормативні витрати палива на 100 км, л/100 км;  $\Pi_{л}$  – ціна за літр палива, грн.

Витрати на мастильні матеріали визначаються

$$\begin{aligned} B_{м.м} &= \frac{H_{м.м}}{100} \cdot \Pi_{м.м} + \\ &= \frac{H_{mp.м}}{100} \cdot \Pi_{mp.м} + \frac{H_{к.м}}{100} \cdot \Pi_{к.м}, \end{aligned} \quad (16)$$

де  $H_{м.м}$  – норма витрат моторного масла на 100 км пробігу, л;  $H_{mp.м}$  – норма витрат трансмісійного масла на 100 км пробігу, л;  $H_{к.м}$  – норма витрат консистентного мастила на 100 км пробігу, кг;  $\Pi_{м.м}$ ,  $\Pi_{mp.м}$ ,  $\Pi_{к.м}$  – ціна моторного, трансмісійного масел і консистентного мастила відповідно, грн./л.



Витрати на відновлення зносу і ремонт шин транспортного засобу визначаються

$$B_{ш} = \frac{H_{ш} \cdot C_{ш} \cdot n_k}{1000}, \quad (17)$$

де  $H_{ш}$  – норма зносу на 1000 км пробігу, грн./км;  
 $C_{ш}$  – ціна однієї шини, грн.;  $n_k$  – кількість коліс без урахування запаски, од.

Витрати на технічне обслуговування та ремонт транспортного засобу визначаються

$$B_{Рем\_ТО} = \frac{H_{Рем\_ТО}}{1000}, \quad (18)$$

де  $H_{Рем\_ТО}$  – норма витрат на ТО і експлуатаційний ремонт на 1000 км пробігу, грн./1000 км.

Витрати на амортизаційні відрахування, що визначається на повне відновлення автомобіля на 1 км пробігу

$$B_{ам} = \frac{H_{ам} \cdot C_{авто}}{100000}, \quad (19)$$

де  $H_{ам}$  – норма амортизаційних відрахувань на повне відновлення автомобіля на 100 000 км пробігу;  
 $C_{авто}$  – ринкова вартість автомобіля, грн.

Амортизаційні відрахування на капітальний ремонт транспортного засобу на 1 км пробігу

$$B_{ам} = \frac{H_{кр} \cdot C_{авто}}{100000}, \quad (20)$$

де  $H_{кр}$  – норма амортизаційних відрахувань на капітальний ремонт автомобіля. Зазвичай приймається  $H_{кр} = 0,02$ .

Обов'язкове страхування цивільно-правової відповідальності власників транспортних засобів на 1 км пробігу розраховуються за формулою

$$B_{стр\_авто} = \frac{C_{стр\_авто} + C}{L_{рік}}, \quad (21)$$

де  $C_{стр\_авто}$  – вартість страхування транспортного засобу, грн.;  $L_{рік}$  – річний пробіг транспортного засобу, км.

Обов'язкове страхування водіїв від нещасного випадку на транспорті розраховуються за формулою

$$B_{стр\_в} = \frac{n_v \cdot C_{стр\_в}}{L_{рік}}, \quad (22)$$

де  $C_{стр\_в}$  – вартість страхування водіїв, грн.;  $n_v$  – кількість водіїв, що працюють.

Таким чином, сумарні витрати на організацію доставки автомобілем розраховується за формулою

$$B_{авто} = B_n + B_{м.м} + B_{ш} + B_{Рем\_ТО} + B_{ам} + B_{стр\_авто} + B_{стр\_в}. \quad (23)$$

Доставка автомобілем має значно більше витрат для торгової мережі, якщо порівнювати із ви-

тратами при доставці велосипедом. На тлі ціни на пальне розвиток велосипедних кур'єрських служб несе також і економічний потенціал. Основною перевагою доставки автомобілем є швидкість доставки на великі відстані, а також погодні умови не впливають на комфорт роботи кур'єра.

Доставка велосипедами розвинена у всіх містах України та Казахстану, де є можливість та необхідність подібних видів кур'єрських послуг, оскільки велосипед є альтернативним транспортним засобом, що сприяє охороні навколишнього середовища та підтримці екології міст.

Існують такі переваги кур'єрів на велосипеді:

- швидкість доставки. Велосипед визнаний найшвидшим транспортом у світі на відстанях до 5 км;
- затори впливають на час доставки велосипедом;
- екологічність. Велосипедні кур'єри не спалюють паливо та не забруднюють навколишнє середовище;
- всеосяжність. Велокур'єри зможуть доставити замовлення будь-куди (пішохідні вулиці, складські приміщення тощо);
- низька вартість. Велокур'єри не витрачають кошти на пальне, а амортизація велосипеда значно дешевша, ніж автомобіля.

Загальні витрати на організацію вело доставки включають: купівля або оренда велосипеда, амортизація велосипеда, зарплата кур'єру.

Відповідно до особливостей пересування велосипедом обґрунтовано ключові принципи планування велосипедної мережі до яких належать:

- максимальна прямолінійність шляхів пролягання маршруту;
- забезпечення зв'язності мережі, яка характеризується можливістю реалізувати поїздку без необхідності переходу до інших форм пересування;
- орієнтованість на мету поїздки і типи користувачів, яка реалізується за рахунок комбінації форм організації руху і виділення різних рівнів ієрархії мережі;

врахування рівня фізичної роботи, необхідної для реалізації поїздки за рахунок вибору шляху проходження велосипедного маршруту і інтеграції з громадським транспортом;

- забезпечення безпеки руху велосипедиста;
- організація доступності мережі для велосипедистів у безпосередній близькості до об'єктів тяжіння;

максимізація ефективності створення фрагменту веломережі за рахунок її пріоритизації.

Можна відзначити основні категорії факторів вибору шляху руху:

- безпека,
- комфорт,
- фізична складність пересування.

Для оцінки значущості кожного з показників необхідно надати кількісні оцінки факторам, для чого в кожній категорії були виділені параметри шляху руху, які можуть бути виражені кількісно, а саме:

– безпека: швидкість моторизованого транспорту, кількість лівих поворотів; загальна кількість поворотів, щільність вуличного паркування, частка шляху, що проходить по фізично відокремленій інфраструктурі;

– складність маршруту: протяжність, фізичне навантаження;

– комфорт: кількість регульованих перехресть.

Для формалізації показника фізичного навантаження (накопиченого зусилля) необхідно розглянути, як відбувається процес приведення велосипедиста в рух за допомогою фізичної сили людини. Потужність, необхідна для руху на велосипеді, є функцією опору повітря, опору коченню, і схилових сил опору і може виражатись рівнянням [7]

$$N_w = [K_A \cdot (V + V_w)^2 + m \cdot g \cdot (s + C_R)] \cdot V, \quad (24)$$

де  $N_w$  – потужність велосипедиста, Вт;  $K_A$  – коефіцієнт аеродинамічного опору, кг/м;  $V$  – швидкість руху велосипедиста, м/с;  $V_w$  – швидкість зустрічного вітру, м/с;  $m$  – сума маси велосипедиста і велосипеда, кг;  $g$  – прискорення сили тяжіння, м/с<sup>2</sup>;  $s$  – поздовжній ухил дороги, %;  $C_R$  – коефіцієнт опору коченню.

Зазначається, що швидкість зустрічного вітру залежить від абсолютної швидкості та напрямку вітру, швидкості та положення велосипеда по відношенню до напрямку вітру. Швидкість зустрічного вітру в даному дослідженні виключено, оскільки він не є постійною величиною. Аеродинамічний фактор опору, залежить від розміру велосипедиста, його положення на велосипеді, одягу, температури, тиску і вологості повітря. Для міського велосипедиста, що здійснює адресну доставку коефіцієнт аеродинамічного опору рекомендовано прийняти 0,387. З урахуванням цього рівняння (24) може бути спрощений до такого вигляду [7]

$$N_w = [K_A \cdot V^2 + m \cdot g \cdot (s + C_R)] \cdot V. \quad (25)$$

Можна припустити, що в нормальних умовах велосипедист буде рухатися у транспортному потоці з фіксованою швидкістю, досягнення якої не вимагає надмірних зусиль. Якщо припустити, що кур'єру необхідно швидко доставити замовлення, тобто  $N_w = N_{\max}$ , тоді вираз (25) має вигляд [7]

$$V_i = \frac{N_{\max}}{K_A \cdot V^2 + m \cdot g \cdot (s_i + C_R) \cdot (1/(K_C + 1))}. \quad (26)$$

Час проходження ділянки на основі отриманої швидкості визначається за загальновідомою залежністю.

Тоді фізична робота велосипедиста на ділянці мережі можна визначити як

$$w_{in} = N_{in} \cdot t_i. \quad (27)$$

А сумарна фізична робота або накопичене зусилля на маршруті дорівнює

$$W_j = \sum w_{in}. \quad (28)$$

Особливостями руху велосипедного транспорту є те, що мережа, якою може пересуватися велосипед, є значно більш розгалуженою ніж мережа для автомобільного транспорту. Тому при моделюванні можливих шляхів руху велосипедиста необхідно включати такі елементи мережі, як доріжки, стежки, пішохідні та велосипедні мости та інші елементи.

При доставці міським пасажирським транспортом або пішим кур'єром витрати на заробітну плату кур'єру та при необхідності плата за проїзд. Час доставки залежить від віддаленості роздрібною мережі до клієнта.

Якщо кур'єр користується міським пасажирським транспортом, то також впливає графік руху пасажирського транспорту.

Зазвичай кур'єри ходять на відстані не більше ніж (800-1000) м від точки роздрібною мережі, для більш далеких замовлень є автокур'єри, але іноді на такі замовлення відправляють і піших кур'єрів – тоді вони їдуть автобусом або навіть таксі. Якщо автобуса довго немає і кур'єр спізнюється, то можуть взимати штрафну плату за несвоєчасність або зовсім відмовитись від замовлення.

Витрати часу обумовлюються швидкістю. Швидкість руху пішоходу залежить від багатьох факторів.

Дослідники відокремлюють такі показники швидкості для різних категорій людей [8]:

для молодих людей віком до 18 років – 5 км/год;

для чоловіків – 4,5 км/год; для жінок – 3,7 км/год;

для мешканців понад 65 років – 3 км/год.

На практиці приймають різну середню швидкість сполучення на транспорті для різних міст та різних видів транспорту. Її межі містяться в діапазоні від 18 км/год до 50 км/год залежно від міста, години доби та низку інших факторів [9].

Для моделювання системи адресної доставки використані характеристики найбільшої роздрібною торгівельної мережі в Україні. Ця українська мережа супермаркетів є найбільшою як за товарообігом, так і за числом торговельних точок. З початком карантинних обмежень, компанія відкрила перший в країні інтернет-магазин повного циклу, а отже і питання раціоналізації адресної доставки і викликає інтерес. В якості району обслуговування взята територія м. Харкова. Схема району обслуговування приведена на рис. 1.

Під районом обслуговування слід розуміти територію, в межах якої постачальник обслуговує клієнтів. Форма і розмір району обслуговування різні і залежать від таких факторів як місцезнаходження підприємства, характеру пропонованих товарів або послуг [10].

Звичайно, зі збільшенням відстані між місцем розташування відправника і одержувача збільшується вартість доставки. Так, для розрахунку вартості доставки по Харкову, з огляду на значну його площу, розроблено багатьма компаніями ряд тарифних зон і для доставки в кожен з цих зон відповідно встановлюється свій тариф.

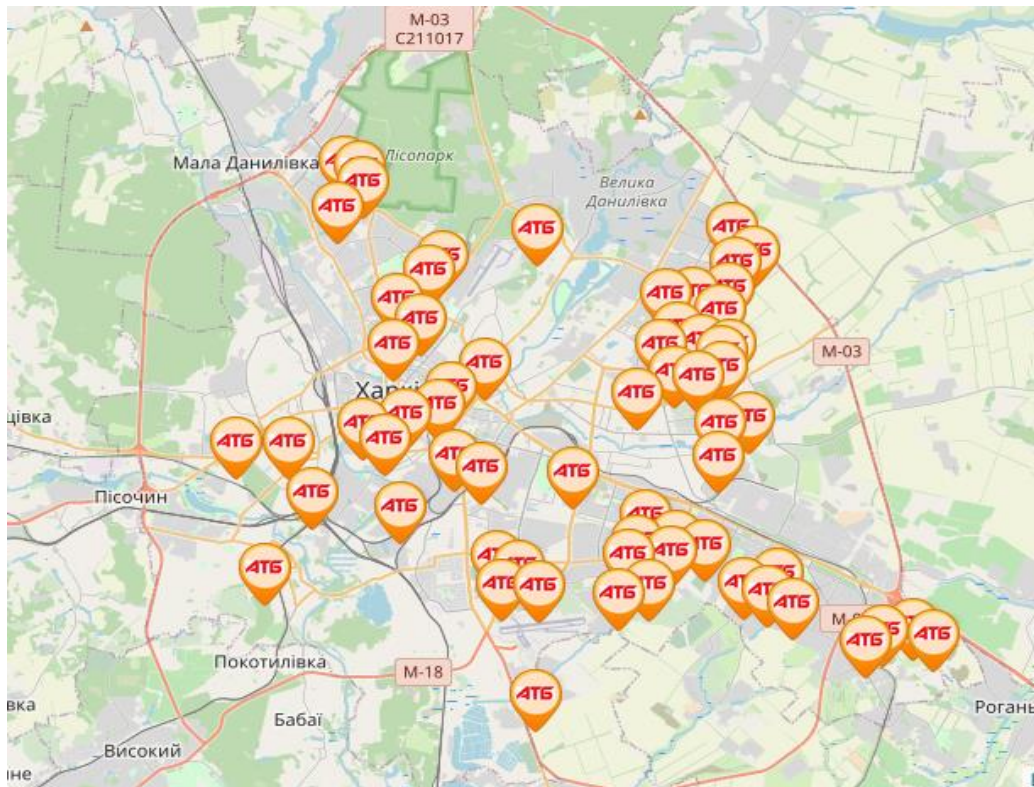


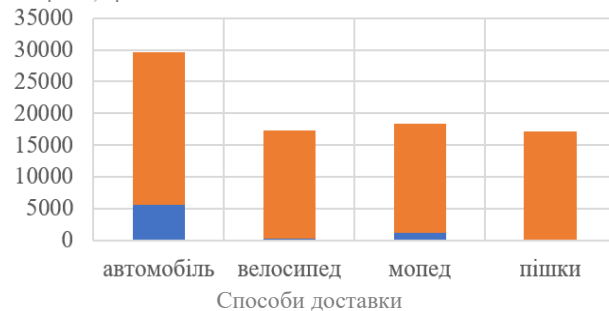
Рис. 1. Схема об'єкту дослідження

У кожної служби доставки власний поділ на тарифні зони і свій тарифний план для кожної з цих зон. Більшість підприємств націлює роботу своєї логістичної системи на максимізацію прибутку.

Для організації адресної доставки легковим транспортним засобом запропоновано розділити площу міста на 5 однакових районів та закріпити за кожним з них автомобіль. Доставка здійснюється на розв'язному маршруті. При визначенні загального добового пробігу необхідно врахувати коефіцієнт непрямолінійності дорожньої мережі, що визначається відношенням фактичної довжини маршруту до довжини маршруту визначеної по «повітряній лінії».

Таким чином визначені два показники вартості організації адресної доставки різними способами доставки – змінні та постійні витрати, що дає змогу оцінити ефективність того чи іншого способу здійснення адресної доставки (рис. 2).

Витрати, грн./міс.



Умовні позначення: ■ Змінні витрати ■ Постійні витрати

Рис. 2. Загальні витрати на організацію адресної доставки за місяць

В сучасних умовах, де якість надання послуг та сервіс переважає економічними показниками, основним показником роботи служби доставки стає саме час доставки.

Для розрахунку витрат часу велосипедом, мопедом та пішки прийнято наступні значення швидкостей:

середня швидкість велосипеда в місті – 18 км/год;

середня швидкість мопеду в місті – 25 км/год;

середня швидкість ходьби для чоловіків – 4,5 км/год;

середня швидкість автомобіля – 40 км/год.

Час доставки велосипедом, мопедом та пішки визначаються за умови виконання доставки одного замовлення з однієї торгової точки.

Приймається допущення, що один велосипедист, водій мопеда та кур'єр, що здійснює доставку пішки, закріплюються за конкретною торгівельною точкою, з якої буде здійснено доставка замовлень (табл. 1).

Таблиця 1 – Результати розрахунків витрат часу адресної доставки одного замовлення та собівартість перевезень

Спосіб доставки	Витрати часу на виконання замовлення, хв.	Собівартість доставки, грн./зам.
Автомобілем	10	82
Мопедом	38	26
Велосипедом	39	24
Пішки	51	23

Виходячи з представлених розрахунків найменшу собівартість має піша доставка, але при виборі способу адресної доставки слід враховувати вимоги клієнта, а основними критеріями вибору є не тільки вартість, а ще і час доставки. Для цього необхідно розглянути вимоги клієнтів до адресної доставки продуктів харчування, проранжувати основні критерії.

На основі експертного методу бальної оцінки кожен з способів адресної доставки матиме свій ступінь за критеріями. Обирається той спосіб доставки, що має найменший сумарний ранг.

За результати ранжування визначено, що для випадку, коли клієнтові необхідно терміново доставити, то клієнт обиратиме спосіб доставки автомобілем, а отже перший спосіб доставки матиме вищу оцінку.

Для випадку, коли у клієнта в пріоритеті найдешевший спосіб доставки, то він обере пішу доставку. Слід зазначити, що коли витрати на доставку рівнозначні для клієнта, то сумарний рейтинг для

всіх схем доставки буде однаковий, що говорить, про можливість використання будь-якого з представлених способів адресної доставки.

### Висновки

Використання представленою методики дає змогу оцінити вартість здійснення адресної доставки різними способами з урахування потреб клієнтів.

Аналіз існуючих способів організації адресної доставки дає змогу виділити основні з них: доставка легковими автомобілями з двигуном внутрішнього згорання, велосипедами, мопедами та піша доставки у межах міста.

Одними з основних критеріїв, що характеризують ефективність впровадження альтернативного способу адресної доставки є собівартість доставки та час на здійснення такої доставки.

Подальшим напрямком проведення досліджень є порівняння ефективності використання найманих послуг існуючих кур'єрських служб та впровадження власної адресної доставки.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Kawa, A. (2020) Out-of-Home Delivery as a Solution of the Last Mile Problem in E-Commerce. In Smart and Sustainable Supply Chain and Logistics—Trends, Challenges, Methods and Best Practices; Springer: Cham, Switzerland, 25–40 [https://doi.org/10.1007/978-3-030-61947-3\\_2](https://doi.org/10.1007/978-3-030-61947-3_2).
2. Corejova, T., Jucha, P., Padourova, A., Strenitzerova, M., Stalmachova, K., and Valicova, A. (2022) E-commerce and last mile delivery technologies in the European countries," PRODUCTION ENGINEERING ARCHIVES, 28(3), 217–224. <https://doi.org/10.26552/tac.C.2022.2.3>
3. Koncová, D., Kremeňová, I., Fabuš, J. (2022). Last Mile and its Latest Changes in Express, Courier and Postal Services Bound to E-commerce. Transport And Communications, 10(2):12-17. <https://doi.org/10.26552/tac.C.2022.2.3>
4. Lu, C. W., Lin, G. H., Wu, T. J., and Hu, I. H.,(2021) Influencing factors of cross-border E-commerce consumer purchase intention based on wireless network and machine learning Security and Communication Networks, 19, 1-9. <https://doi.org/10.1155/2021/9984213>
5. Niranjana Devkota, Shashwat Dhungana, Seepata Parajuli, Udbodh Bhandari, & Udaya Raj Paudel. (2021). Nepalese consumers' perception on online shopping challenges and its managerial solution. International Research Journal of Science, Technology, Education, and Management, 1(2), 65–77. <https://doi.org/10.5281/zenodo.5726289>
6. Vincent F. Yu, Grace Aloina, Timo Eccarius, (2023). Adoption intentions of home-refill delivery service for fast-moving consumer goods. Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review, 171, 103041, ISSN 1366-5545, <https://doi.org/10.1016/j.tre.2023.103041>
7. Чернишова О.С. Формування мережі велосипедного транспорту в містах з низьким рівнем його використання: дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2019. 207 с. <https://doi.org/10.36910/automash.v2i19.909>.
8. Онлайн-замовлення продуктів харчування з адресною доставкою. в Харкові: Онлайн-замовлення продуктів харчування з доставкою додому в Києві: що, де, за якою ціною: Prostobank.ua. URL: <https://gx.net.ua/specproekt/pokupki-onlajn-v-harkovskie-internet-magaziny-vystroilis-ocheredi.html> (дата звернення 15.10.2022).
9. Онлайн калькулятор: Кабанчик сервіс замовлення послуг. URL: <https://kharkov.kabanchik.ua/ua/tag/sluzhba-dostavki-produktov-pitaniya> (дата звернення 15.10.2022).
10. Птиця Н.В. Формування процесу доставки дрібнопартиїних вантажів у логістичній системі роздрібної торгівельної мережі : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.22.01. Харків, 2020. 20 с.

Received (Надійшла) 15.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 09.08.2023

### An approach to selecting alternative methods of home-refill delivery

Kateryna Kovtsur, Nazgul Eskozhanova

**Abstract.** The article considers alternative ways of making home-refill delivery, such as delivery by car, delivery by moped, bicycle and on foot by courier. The study identifies factors that influence the cost of delivery. For specific delivery conditions, rational alternatives for home-refill delivery are proposed that will ensure cost effectiveness, environmental sustainability, and social compliance. Delivery costs and delivery time are proposed as an efficiency criterion. The presented results can be used by enterprises-providers of goods in which home-refill delivery is organized and implemented.

**Keywords:** home-refill delivery, delivery time, delivery costs, retail network, transport.

І. М. Ганношина

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## РОЗРОБКА МОДЕЛІ ГЛИБОКОЇ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ОЦІНКИ СТАНУ МОРЯ НА ОСНОВІ РУХУ СУДНА

**Анотація.** Метою роботи є розробка моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна з використанням щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності, точності, залежності та динаміки оцінки стану моря для вирішення як завдань класифікації, так і завдань регресії. В результаті побудови моделі глибокої нейронної мережі оцінки стану моря на основі руху судна були отримані такі результати: спочатку була розроблена архітектура мережі на основі щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж (DenseNet) з унікальним поєднанням модифікацій і шарів. Така архітектура дає можливість ефективно враховувати залежності і динаміку руху судна, що призводить до більш точної оцінки стану моря. По-друге, мережа була навчена підготовленим даним руху судна за допомогою оптимізаторів і функцій втрат, підібраних відповідно до завдання оцінки стану моря. Тренувальний процес містив налаштування гіперпараметрів, оптимізацію ваг та оцінку продуктивності моделі за тестовими даними. По-третє, модель оцінювалася за даними випробувань за допомогою відповідних метрик у залежності від конкретного завдання оцінки стану моря. Наприклад, для задачі класифікації використовувалася матриця точності і помилок, а для задачі регресії – середня абсолютна похибка (MAE) і середня квадратична похибка кореня (MSE). Результати побудови моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна підтверджують її ефективність і значимість для мети дослідження. Застосування такої моделі важливо саме в контексті оцінки стану моря. Висока точність оцінки допомагає приймати більш достовірні рішення і прогнозувати можливі зміни відповідно до морських умов, що виникають на даний час руху судна. Врахування залежностей і динаміки руху судна дозволяє моделювати й адаптуватися до умов, що змінюються, що підвищує його технологічність та ефективність. Використання такої моделі сприяє підвищенню безпеки та ефективності морських операцій, оптимізації використання ресурсів і запобігання можливим аваріям. Таким чином, модель глибокої нейронної мережі, розроблена для оцінки стану моря на основі руху судна, є ефективним інструментом у сфері безпеки та ефективності судноплавства. Її використання сприяє більш точним прогнозам і прийняттю обґрунтованих рішень, що важливо для морських операцій і забезпечення безпеки судноплавства в цілому.

**Ключові слова:** глибока нейронна мережа, модель мережі, оцінка стану моря, рух судна, щільно пов'язана згорткова нейронна мережа.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Оцінка стану моря є важливою і актуальною проблемою в області морського судноплавства і навігації. Стан моря охоплює широкий спектр фізичних параметрів і явищ, таких як хвилі, вітер, течії, лід та інші фактори, що впливають на безпеку та ефективність морських перевезень. Точна та достовірна оцінка стану моря має вирішальне значення для прийняття обґрунтованих рішень, забезпечення безпеки судноплавства та оптимізації операцій на морі.

Однак оцінити стан моря складно через кілька факторів. По-перше, морське середовище – це динамічне і мінливе середовище, що вимагає врахування часових і просторових коливань параметрів. По-друге, більшість існуючих методів оцінки стану моря засновані на фізичних моделях, які можуть бути неповними або приблизними. Крім того, обробка та аналіз великих обсягів різномірних даних від різних датчиків є складним завданням. У світлі цих складнощів використання глибоких нейронних мереж представляє перспективний напрямок досліджень для вирішення проблеми оцінки стану моря.

Використання глибоких нейронних мереж в області оцінки стану моря і руху судна має ряд переваг:

1. Обробка складних і неструктурованих даних: глибокі нейронні мережі дозволяють ефективно працювати з великими обсягами даних, включаючи зображення, радіолокаційні вимірювання і мультисенсорні дані. Це дозволяє враховувати різні фактори і

особливості, пов'язані з оцінкою стану моря і рухом судна.

2. Автоматизація і точність: Використання глибоких нейронних мереж дозволяє автоматизувати процес оцінки стану моря і руху судна, що знижує людський фактор і підвищує точність результатів. Глибокі нейронні мережі можуть виявляти складні закономірності і залежності в даних, роблячи оцінку більш надійною і точною.

3. Виявлення та класифікація об'єктів: глибокі нейронні мережі можуть ефективно виявляти та класифікувати різні об'єкти в морському середовищі, включаючи кораблі, хвилі, лід та інші елементи. Це може бути корисним для навігації, безпеки, охорони навколишнього середовища та інших аспектів морської техніки.

4. Покращення прогнозування та прийняття рішень: глибокі нейронні мережі можуть аналізувати історичні дані та виявляти приховані зв'язки, що може покращити здатність прогнозувати та приймати рішення щодо стану моря та руху судна. Це може бути корисно для морських операцій, планування маршрутів, прогнозування погоди та інших додатків.

5. Гнучкість та адаптивність: глибокі нейронні мережі мають гнучкість та адаптивність для застосування в різних середовищах та з різними типами даних. Їх можна налаштувати і навчити вирішувати конкретні завдання, що робить їх потужним інструментом в оцінці стану моря і руху судна.

З огляду на ці переваги, використання глибоких нейронних мереж дозволяє значно підвищити ефек-

тивність і точність оцінки стану моря і руху судна. Однак варто зазначити, що для навчання і настройки моделей потрібна достатня кількість даних, а також правильний вибір архітектури і методів під конкретне завдання (чи то завдання класифікації, чи завдання регресії).

Використання глибоких нейронних мереж в області оцінки стану моря продовжує активно розвиватися і пропонує кілька перспективних напрямків, наприклад:

1. Мультимодальна інтеграція даних: розробка методів інтеграції різних типів даних, таких як радіолокаційні зображення, оптичні зображення, мульти-сенсорні дані та інші, в єдину глибоку нейронну мережу. Це дасть можливість більш повно врахувати різні аспекти і особливості морського середовища при оцінці стану і руху судна.

2. Автоматичне виявлення та класифікація різних об'єктів у морському середовищі, таких як судна, хвилі, лід, риба та інші. Це може сприяти безпеці, навігації та охороні навколишнього середовища.

3. Покращене прогнозування та прийняття рішень: розробка методів глибинного навчання для прогнозування морських умов та руху суден на основі історичних даних, включаючи використання рекурентних нейронних мереж та моделей довгої короткострокової пам'яті (LSTM). Це може допомогти операторам приймати більш обґрунтовані рішення та оптимізувати офшорні операції.

4. Навчання на розріджених даних: розробка методів глибокого навчання, здатних ефективно працювати з обмеженими та розрідженими даними, що може бути важливим у контексті оцінки стану моря, де дані можуть бути недоступними або мати обмежену інформацію.

5. Аналіз часових рядів: розширення використання глибоких нейронних мереж для аналізу даних часових рядів, пов'язаних з оцінкою стану моря, таких як параметри руху суден, погодні умови, припливи та інші фактори. Це може допомогти в більш точному моделюванні та прогнозуванні стану морського середовища.

6. Навчання з підкріпленням: застосування методів навчання з підкріпленням у контексті оцінки стану моря, щоб моделі могли вчитися на зворотному зв'язку, який вони отримують, і реагувати на зміни в навколишньому середовищі та умовах.

Ці напрямки розвитку дозволять розширити використання глибоких нейронних мереж в області оцінки стану моря і руху судна, підвищити точність, надійність і ефективність таких систем. Однак вони також вимагають подальших досліджень, розробки та валідації моделей на різних наборах даних та умовах експлуатації. Одним з найбільш актуальних напрямків в даній предметній області є використання високоефективних щільно зв'язаних згорткових нейронних мереж.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досить значна кількість робіт у теперішній час присвячена вивченню проблем використання глибинного навчання для оцінки стану моря [1 - 8].

Так, у рамках спільного дослідницького проекту RetroLadung розробляються вагово-оптимізовані

комірочки з інтегрованими датчиками руху і системами підтримки прийняття рішень на основі даних (DSS). Однією з основних функцій DSS є оцінка стану моря на основі даних вимірювань з датчиків прискорення. Для виконання цього завдання створюється згорткова нейронна мережа (CNN), яка навчається на даних моделювання. У статті [1] представлені початкові етапи розвитку мережі, в якій розглядаються унімодальні морські хвилі з описом спектрів JONSWAP. При цьому виключається швидкість руху вперед. Інститут гідродинаміки і теорії суден (FDS) проводить випробування в модельному басейні, а отримані результати використовуються для перевірки прогнозів оцінки стану моря (SSE).

У статті [2] пропонується новий підхід до оцінки стану моря, який отримав назву SpectralNet. Він заснований на використанні спектрограм і глибокому навчанні. Дані руху космічного апарату перетворюються в спектрограми за допомогою короткочасного перетворення Фур'є. Потім спектрограми об'єднуються в нові зображення, які подаються в двовимірну згортувальну нейронну мережу для класифікації стану моря. Результати експериментів показують, що запропонований підхід забезпечує вищу точність класифікації, ніж інші методи, застосовані до необроблених даних часових рядів. Крім того, точність класифікації збільшується зі збільшенням кількості комбінованих датчиків. Аналіз чутливості показує, що масштабне співвідношення зображень має значний вплив на точність класифікації.

Для класифікації стану моря використовуються різні методи, але вони вимагають значних капітальних і експлуатаційних витрат, а також великих обчислювальних потужностей. У статті [3] запропонована нова модель класифікації стану моря на основі глибокого навчання з використанням зображень моря у візуальному діапазоні. Створено та протестовано набір даних зображень стану моря, що містить 100 800 зображень за допомогою сучасних класифікаційних моделей з глибоке навчання. Показано, що модель на основі змін у початковому блоці моделі GoogLeNet досягає точності класифікації 8, що перевищує точність інших моделей. Крім того, запропонована модель вимагає менше часу на навчання і має конкурентну класифікаційну швидкість.

В роботі [4] запропонований гібридний підхід до оцінки спектра хвиль на основі аналогії з хвильовим буєм. Використовується поєднання машинного навчання і фізичного методу з урахуванням наявних передавальних функцій. Отримано непараметричну оцінку спектра спрямованих хвиль за допомогою згорткової нейронної мережі. Розроблений метод успішно застосовується на даних, отриманих з контейнеровоза протягом двох років. Результати показують значне поліпшення в порівнянні з Первинна оцінка без обмежень.

У статті [5] також розглядається підхід, заснований на машинному навчанні, до оцінки стану моря за аналогією з хвильовим буєм. Використовуючи дані датчиків судна, був зроблений прогноз стану моря. У статті порівнюються моделі в часовій і частотній областях з урахуванням точності, надійності та обчислю-



вальних витрат. Глибокі нейронні мережі навчалися з урахуванням впливу різних параметрів, таких як частотна дискретизація і довжина вибірки. Початкова архітектура, адаптована під послідовні дані, показала кращу продуктивність. Використовувалося багатозадачне навчання, що призвело до кращої здатності до узагальнення та меншої невизначеності. В цілому частотно-доменний метод демонструє більш високу продуктивність і менші витрати на обчислювальне навчання.

Приклади статей, пов'язаних з використанням архітектури DenseNet в різних завданнях [9 - 11]:

1. Оригінальна стаття [9], в якій архітектура DenseNet була запропонована вперше, представлений докладний опис архітектури і результати експериментів на декількох наборах даних комп'ютерного зору.

2. Робота [10] представляє підхід на основі глибокого навчання для оцінки стану моря. Запропонована в роботі модель SNET використовує тісно пов'язані згорткові нейронні мережі, модулі уваги каналів і модуль уваги функції для оцінки висоти і напрямку хвиль, а також даних про рух судна. Метод показує конкурентні результати в порівнянні з іншими підходами і демонструє ефективність на реальних наборах даних.

Таким чином, дослідженням по використанню високоефективних щільно зв'язаних згорткових нейронних мереж для вирішення завдань оцінки стану моря на основі руху судна одночасно с точки зору завдань класифікації та регресії в даний час розглянуто не в повному обсязі.

**Метою статті** є розробка моделі глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна з використанням щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж для підвищення безпеки та ефективності, точності, залежності та динаміки оцінки стану моря для вирішення як завдань класифікації, так і завдань регресії.

## Викладення основного матеріалу дослідження

У даній статті представлена нова архітектура мережі, запропонована авторами, заснована на щільно пов'язаних згорткових нейронних мережах (DenseNet), спеціально адаптованих для аналізу даних руху суден для оцінки стану моря для вирішення як завдань класифікації, так і завдань регресії.

Методологія розробки цієї архітектури включає такі етапи (рис. 1):

1. Збір даних про рух судна, тобто інформації про різні параметри руху судна, такі як швидкість, кут курсу, прискорення, характеристики хвиль і т. д.

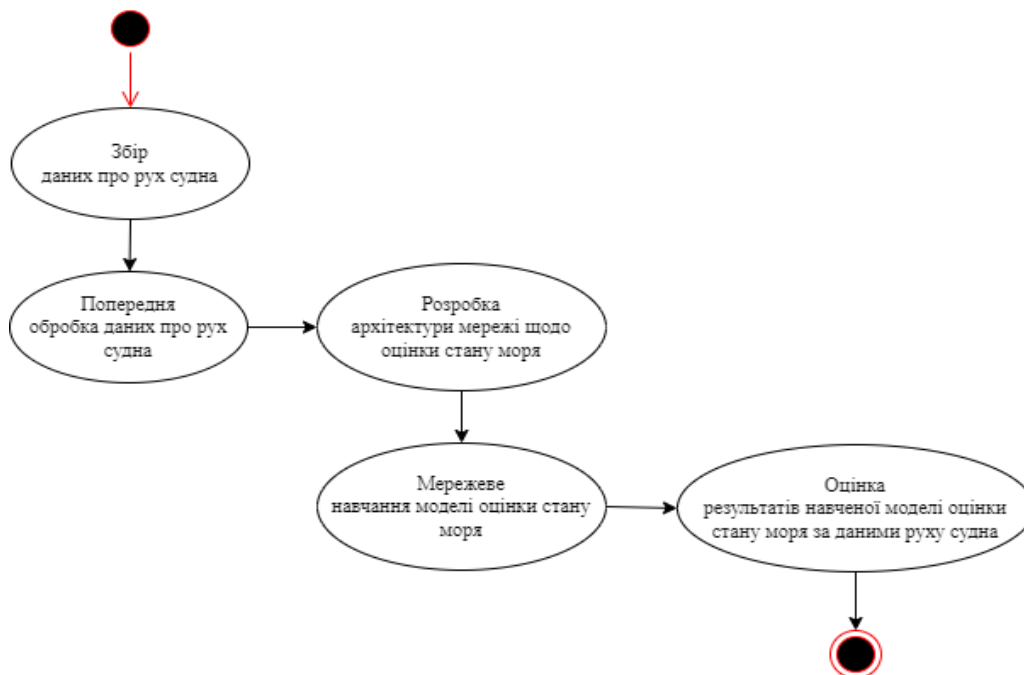
2. Попередня обробка даних про рух судна. На цьому етапі дані відфільтровані, стандартизовані або доведені до відповідного формату для подачі на вхід нейронної мережі.

3. Розробка архітектури мережі щодо оцінки стану моря. Запропоновано нову мережеву архітектуру, засновану на щільно пов'язаних згорткових нейронних мережах (DenseNet), з додаванням спеціальних шарів та модифікацій для кращого задоволення вимог щодо оцінки стану моря.

4. Мережеве навчання моделі оцінки стану моря. Архітектура мережі навчається на підготовлених даних про рух судна, використовуючи оптимізатори і функції втрат, підібрані відповідно до завдання оцінки стану моря.

5. Оцінка результатів навченої моделі оцінки стану моря за даними руху судна. Ефективність навченої моделі оцінюється за даними тестів. Метрики оцінки містять середню квадратичну похибку (MSE), коефіцієнт детермінації  $R^2$  тощо.

Збір даних про рух суден є важливою частиною процесу оцінки стану моря за допомогою глибоких нейронних мереж.



**Рис. 1.** Узагальнена структура методології розробки архітектури глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна

Дані про параметри руху судна (швидкість, кут курсу, прискорення, характеристики хвиль), є ключовими для аналізу і моделювання морського середовища

$$D = \langle S, H, A, X \rangle, \quad (1)$$

де  $S$  – швидкість. Вимірювання швидкості судна є одним з основних параметрів рушія. Для цього можуть використовуватися різні датчики і системи, такі як Acoustic Doppler Log (ADL), GPS (Global Positioning System), Inertial Measurement Unit (IMU) та ін. Ці датчики здатні визначати швидкість судна в різних напрямках і відстежувати її зміни в часі;

$H$  – кут курсу судна, який визначає напрямок, в якому воно рухається. Дані про кут курсу судна можна отримати за допомогою компасів, гіроскопів або GPS. Його знання важливо для визначення шляху і маршруту судна, а також для прогнозування можливих змін напрямку руху;

$A$  – прискорення. Вимірювання прискорення судна дозволяє визначити зміну швидкості в часі. Для цього можуть використовуватися бустери або IMU, які можуть виявляти зміни лінійного і кутового прискорення. Дані прискорення допомагають оцінити динаміку;

$X$  – характеристики хвиль, які визначаються відповідно до вимог, що визначені в роботах [7, 8, 10].

Попередня обробка даних відіграє важливу роль у використанні щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж для оцінки стану моря. Правильна обробка даних перед подачею на мережевий вхід дозволяє підвищити ефективність моделі і якість результатів. Алгоритм, який включає методи та підходи до попередньої обробки даних у цьому контексті, наведено на рис. 2:

1. Фільтрація даних і усунення шуму дозволяє отримати чисті та надійні вимірювання. Це може включати застосування фільтрів низьких або високих частот, а також таких методів, як фільтрація ковзного

середнього або медіана. Мета полягає в усуненні аномалій і шумів, які можуть спотворювати дані і впливати на точність оцінки стану моря.

2. Нормалізація і стандартизація. Після фільтрації дані можуть бути нормалізовані або стандартизовані, щоб привести їх до певного діапазону значень або середнього значення. Це дозволяє встановити однаковий масштаб даних і запобігає проблемам з різними амплітудами або варіацією даних.

3. Вирівнювання і сегментація. Залежно від призначення і завдання моделювання можна застосувати методи вирівнювання і сегментації даних. Наприклад, часові ряди даних про рух суден можуть бути вирівняні в часі або сегментовані на фіксовану тривалість, щоб забезпечити однорідність даних для навчання мережі.

4. Збільшення даних. Методи збільшення можуть бути застосовані для збільшення різноманітності та обсягу даних. Це може включати горизонтальне або вертикальне відображення даних, додавання випадкових шумів або спотворень, а також генерацію штучних даних на основі існуючих даних. Збільшення допомагає підвищити надійність моделі та здатність до узагальнення, коли недостатньо кількості та різноманітності даних.

5. Поділ на навчальні та тестові зразки. Для оцінки працездатності моделі дані можна розділити на навчальні та тестові вибірки. Навчальна вибірка використовується для навчання мережі, в той час як тестова вибірка дозволяє оцінити її точність і здатність узагальнювати на нові дані.

6. Балансування класів. Якщо дані мають дисбаланс класів (наприклад, різні стани моря можуть бути представлені нерівномірно), може знадобитися збалансувати класи, щоб запобігти зміщенню моделі в бік більш поширених класів. Цього можна досягти шляхом підвибірки, передискретизації або застосування зважування класу в навчанні.

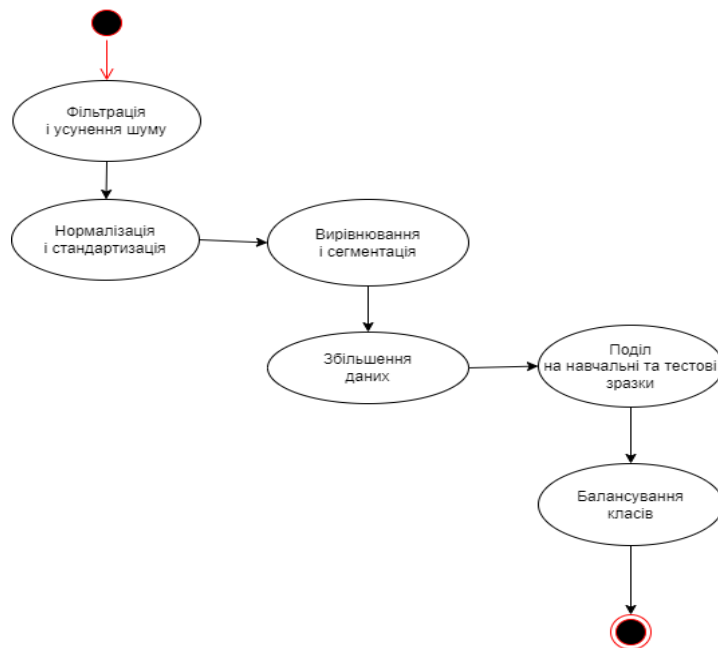


Рис. 2. Узагальнена структура алгоритму попередньої обробки даних глибокої нейронної мережі для оцінки стану моря на основі руху судна



При розробці мережевої архітектури оцінки стану моря з використанням щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж (DenseNet) автори можуть запропонувати нові модифікації або спеціальні шари для кращого задоволення вимог даної конкретної задачі. Розглянемо можливі модифікації, які можна внести в архітектуру мережі:

1. Додаткові згорткові шари. Додаткові згорткові шари можуть бути додані для поліпшення здатності мережі витягувати функції з даних про рух суден. Це допоможе покращити здатність моделі виявляти та виділяти важливі закономірності та закономірності в даних.

2. Об'єднання шарів. Включення шарів об'єднання може допомогти зменшити розмірність даних і стиснути інформацію, зберігаючи важливі характеристики. Це дозволяє підвищити ефективність і здатність узагальнення моделі, а також зменшити кількість параметрів та обчислювальну складність.

3. Щільне з'єднання шарів. Однією з особливостей DenseNet є щільне з'єднання шарів, де кожен шар має прямі зв'язки з кожним наступним шаром. Це сприяє кращій передачі інформації між шарами і покращує потік градієнтів при зворотному поширенні помилки. В архітектурі мережі оцінки стану моря цю властивість можна посилити додаванням додаткових прямих зв'язків або збільшенням щільності зв'язків між шарами.

4. Рекурентні шари. У разі, коли дані про рух судна є часовим рядом, рекурентні шари, такі як шари LSTM (Long Short-Term Memory), можуть бути включені в архітектуру мережі. Це дозволить моделі враховувати залежності і динаміку в даних, що може бути важливо для точної оцінки стану моря.

5. Адаптивна активація і нормалізація шарів. Увімкнення шарів адаптивної активації, таких як шари SELU (масштабовані експоненційні лінійні одиниці) або Mish, а також нормалізація шарів, таких як шари пакетної нормалізації, можуть допомогти прискорити навчання та покращити стабільність мережі. Це може бути особливо корисно при роботі з великими і складними наборами даних.

Унікальне поєднання цих модифікацій і шарів в архітектурі мережі дозволить поліпшити здатність моделі оцінювати стан моря на основі даних про рух суден. Таким чином, конкретні комбінації модифікацій і шарів в архітектурі мережі можуть змінюватися в залежності від конкретного завдання оцінки стану моря і характеристик наявних даних. Розглянемо варіант можливої унікальної комбінації модифікацій і шарів, які можна використовувати в архітектурі мережі для оцінки стану моря в загальному сенсі:

1. Рівень вхідних даних. Архітектура мережі може починатися з вхідного шару, який приймає дані про рух судна, такі як швидкість, кут курсу, прискорення, характеристики хвиль тощо. Математично вхідний шар можна представити таким чином:

$$I = [x_1, x_2, \dots, x_n] \quad (2)$$

де  $I$  – вектор введення (вхідний шар);

$x_1, x_2, \dots, x_n$  – векторні елементи, що представляють значення параметрів руху судна.

Таким чином, цей стандартний підхід описує рівень вхідних даних як вектор  $n$  елементів, де кожен елемент  $x_i$  являє собою один з параметрів руху судна, таких як швидкість, кут курсу, прискорення, характеристики хвиль.

2. Згорткові шари. Кілька згорткових шарів можуть бути використані для вилучення особливостей з входів руху судна. Кожен згортковий шар може мати різні фільтри та ядра згортки для виділення різних аспектів даних. Представимо згорткові шари в даному контексті наступним чином: нехай буде  $k$ -ий згортковий шар, позначимо його як  $C_k$ . Для кожного згорткового шару  $C_k$ , його вихід (активації)  $h_k$  розраховуються шляхом застосування операції згортки до попереднього шару або вхідних даних:

$$h_k = f(W_k * h_{k-1} + b_k), \quad (3)$$

де  $h_k$  – активація  $k$ -го згорткового шару;  $f(x)$  – функція активації, застосована до кожного шару;  $W_k$  – матриця ваг (згорткові ядра) для  $k$ -го згорткового шару;  $b_k$  – вектор зміщення (bias) для  $k$ -го згорткового шару;  $h_{k-1}$  – активації попереднього шару (входи або активації попереднього згорткового шару).

Операція згортки  $W_k * h_{k-1}$  являє собою підсумовування добутків фільтруючих елементів з відповідними вхідними даними елементів (або активацій попереднього шару). Потім застосовується функція активації  $f(x)$ , щоб отримати остаточні активації  $h_k$  цього згорткового шару.

Таким чином, згорткові шари дозволяють витягти і виділити з вхідних даних про рух судна, що важливо для оцінки стану моря.

3. Об'єднувальний шар. Після згорткових шарів можна додати шар об'єднання, щоб зменшити розмірність даних і зберегти важливі особливості. Наприклад, шар MaxPooling можна використовувати для вибору найбільш значущих значень у кожному вікні даних. Уявімо об'єднувальний шар в даному контексті таким чином: нехай буде  $k$ -ий об'єднуючий шар, позначимо його як  $P_k$ .

Для кожного шару пулу  $P_k$  вихід  $h_k$  обчислюються шляхом застосування операції пулу до попереднього згорткового шару або активацій

$$h_k = Pool(W_k * h_{k-1} + b_k) \quad (4)$$

де  $h_k$  – вихід (активації)  $k$ -го шару об'єднання; Pool – операція об'єднання, яка може бути, наприклад, операцією MaxPooling або операцією середнього об'єднання (AveragePooling);  $W_k$  – масштабна матриця (якщо використовується) для  $k$ -го шару об'єднання;  $b_k$  – вектор зміщення (зміщення) для  $k$ -го шару об'єднання;  $h_{k-1}$  – входи або активації попереднього згорткового шару.

Операція об'єднання дає змогу зменшити розмірність даних, вибравши найбільш значущі значення у вікні даних.

4. Щільне з'єднання шарів. Включення принципу щільного з'єднання шарів, характерного для DenseNet, дозволяє створювати прямі зв'язки між кожним поточним шаром і кожним наступним шаром. Це покращує потік градієнтів і полегшує обмін інформацією між шарами. Уявімо принцип щільного

з'єднання шарів в даному контексті таким чином: дайте  $K$  шари в архітектурі DenseNet позначимо як  $H_1, H_2, \dots, H_K$ . Кожен шар  $H_k$  отримує вхідні дані не тільки з попереднього шару  $H_{k-1}$ , але також з усіх попередніх шарів

$$H_k = [H_1, H_2, \dots, H_{k-1}] \oplus F(W_k * H_{k-1} + b_k) \quad (5)$$

де  $H_k$  – активації (вихід)  $k$ -го шару DenseNet;  $[H_1, H_2, \dots, H_{k-1}]$  – об'єднання активацій всіх попередніх шарів;  $\oplus$  – операція конкатенації;  $F(x)$  – функція активації, застосована до кожного шару;  $W_k$  – матриця ваг для  $k$ -го шару;  $b_k$  – вектор зміщення (зміщення) для  $k$ -го шару,  $H_{k-1}$  – активація попереднього шару (входи  $k$ -го шару).

Таким чином, принцип щільного з'єднання дозволяє кожному шару отримувати інформацію з усіх попередніх шарів, що сприяє більш повній передачі і використанню інформації всередині мережі.

5. Рекурентні шари. Якщо дані про рух суден представлені у вигляді часового ряду, можливо додати поточні шари, такі як шари LSTM (довга короткочасна пам'ять) або GRU (закрита рекурентна одиниця). Ці шари дозволяють враховувати залежності та динаміку у ваших даних. Шар закритого рекурентного блоку в цьому контексті діє таким чином: маємо  $k$ -ий шар GRU, позначимо його як  $GRU_k$ . Для кожного шару  $GRU_k$ , його вихід  $h_k$  обчислюються шляхом оновлення статусу (update gate)  $z_k$ , скинути стан (reset gate)  $r_k$  та обчислити новий латентний стан  $h_k$

$$z_k = \sigma(W_{z_k} * [h_{k-1}, x] + b_{z_k} r_k, \quad (6)$$

де  $\sigma$  – функція активації сигмовидної сигмоїди (наприклад, logistic sigmoid).

Операція оновлення статусу  $z_k$  контролює, яку інформацію слід оновлювати, а операція скидання стану  $r_k$  визначає, яку інформацію слід забути з попереднього стану  $h_{k-1}$ . Новий прихований стан  $h_k$  розраховується на основі оновленого стану і нових входів.

Таким чином, шар Gated Recurrent Unit (GRU) дозволяє моделювати залежності і динаміку в часових рядах даних про рух судна, що може стати в нагоді в завданні оцінки стану моря. GRU надає можливість запам'ятовувати інформацію на основі станів, дозволяючи враховувати контекст та історію в часових даних для більш точної оцінки морських умов.

6. Адаптивна активація та нормалізація шарів: В архітектурі мережі адаптивні рівні активації, такі як SELU (масштабовані експоненційні лінійні одиниці) або Mish, можуть бути використані для забезпечення більш плавної активації та більш стабільного навчання. Можна також ввімкнути шари нормалізації, такі як шари пакетної нормалізації, для стабілізації та нормалізації виводу шарів.

При навчанні мережі важливо вибрати оптимізатор, який буде мінімізувати функцію втрат й оновлювати ваги мережі на основі градієнтного спуску. Різні оптимізатори, такі як стохастичний градієнтний спуск (SGD), Adam або RMSprop, можуть використовуватися в залежності від специфіки завдання і вимог до навчання.

Також важливо вибрати відповідну функцію втрат, яка відображає мету завдання оцінки стану моря.

Наприклад, для задачі регресії функцією втрат може бути стандартна помилка (MSE), яка вимірює стандартне відхилення між прогнозованими та фактичними значеннями. Для задачі класифікації можна використовувати категоріальну перехресну ентропію, яка вимірює різницю між прогнозованим та істинним класами.

Весь процес навчання мережі складається з ітеративної оптимізації ваг за допомогою обраного оптимізатора і функції втрат. Мережа запускає навчальні дані через свої шари, порівнює прогнози з істинними значеннями та обчислює значення функції втрат. Потім градієнти функції втрат обчислюються і використовуються оптимізатором для оновлення ваги мережі. Цей процес повторюється протягом декількох епох до тих пір, поки не буде досягнуто конвергенції або певного умови зупинки.

Таким способом навчається архітектура мережі на основі заздалегідь підготовлених даних про рух судна, а підбір оптимізаторів і функцій втрат здійснюється відповідно до мети оцінки стану моря. Це дозволяє мережі ефективно витягувати інформацію з даних і вчитися на зворотному поширенні помилки, щоб досягти оптимальних показників при оцінці стану моря. Для оцінки моделі, яка оцінює стан моря на основі руху судна, особливо корисними можуть бути такі показники:

#### 1. Класифікація:

– точність: оцінка частки правильно класифікованих прикладів із загальної кількості прикладів. Ця метрика показує загальну здатність моделі правильно класифікувати різні морські умови;

– матриця точності і помилок: надає інформацію про кількість правильних і неправильних класифікацій для кожного стану моря. Дозволяє більш детально проаналізувати продуктивність моделі по кожному класу.

#### 2. Регресія:

– середня абсолютна похибка (MAE): оцінка середнього абсолютного відхилення між прогнозованими значеннями моделі та фактичними значеннями. Це дає можливість виміряти точність моделі при прогнозуванні безперервних значень параметрів руху судна;

– середня квадратична похибка (MSE): вимірює стандартне відхилення між прогнозованими значеннями та фактичними значеннями. MSE дозволяє більш чутливо реагувати на великі помилки, і це може бути корисно, коли важливо мінімізувати великі відхилення в прогнозах.

Важливо враховувати специфіку завдання і специфіку даних про рух судна при виборі метрик для оцінки моделі. Наприклад, якщо завдання оцінки стану моря вимагає високої точності при класифікації різних станів, то метрики, пов'язані з точністю і матрицею помилок, можуть бути найважливішими. З іншого боку, якщо завдання полягає в прогнозуванні безперервних значень параметрів руху судна, кращими можуть бути такі регресійні метрики, як MAE і MSE.

### Висновки

Таким чином результати побудови запропонованої глибокої нейромережевої моделі оцінки стану моря мають такі переваги:

1. Висока точність. Модель здатна досягти

високої точності в оцінці стану моря на основі даних про рух судна. Це дозволяє приймати більш достовірні рішення і прогнозувати можливі зміни морських умов.

2. Врахування залежностей і динаміки. Архітектура мережі на основі щільно пов'язаних згорткових нейронних мереж (DenseNet) дозволяє враховувати залежності і динаміку руху судна, що покращує

якість оцінки стану моря і робить модель більш адаптивною до умов, що змінюються.

3. Підвищення безпеки та ефективності. Використання такої моделі дає можливість підвищити безпеку і ефективність морських операцій. Більш точна оцінка стану моря допомагає в прийнятті обґрунтованих рішень, запобіганні можливих аварій і оптимізації використання ресурсів.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Reiner, Carl, Detlefsen, Ole, and Moustafa Abdel-Maksoud. "On the Development of an Onboard Sea State Estimator Based on Numerical Vessel Motion Data." Paper presented at the The 32nd International Ocean and Polar Engineering Conference, Shanghai, China, June 2022. URL: <https://onepetro.org/ISOPEIOPEC/proceedings-abstract/ISOPE22/All-ISOPE22/493898> (дата звернення: 28.04.2023).
2. X. Cheng, G. Li, R. Skulstad, H. Zhang and S. Chen, "SpectralSeaNet: Spectrogram and Convolutional Network-based Sea State Estimation," IECON 2020 The 46th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Singapore, 2020, pp. 5069-5074, doi: 10.1109/IECON43393.2020.9254890.
3. Umair, M.; Hashmani, M.A.; Hussain Rizvi, S.S.; Taib, H.; Abdullah, M.N.; Memon, M.M. A Novel Deep Learning Model for Sea State Classification Using Visual-Range Sea Images. *Symmetry* 2022, 14, 1487. <https://doi.org/10.3390/sym14071487>.
4. Ulrik D. Nielsen, Malte Mittendorf, Yanlin Shao, Gaute Storhaug, Wave spectrum estimation conditioned on machine learning-based output using the wave buoy analogy, *Marine Structures*, Volume 91, 2023, 103470, ISSN 0951-8339, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2023.103470>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095183392300103X>).
5. Malte Mittendorf, Ulrik Dam Nielsen, Harry B. Bingham, Gaute Storhaug, Sea state identification using machine learning—A comparative study based on in-service data from a container vessel, *Marine Structures*, Volume 85, 2022, 103274, ISSN 0951-8339, <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2022.103274>.
6. Nielsen U. D. Sea state estimation based on measurements of wave-induced ship responses. – Technical University of Denmark, 2018.
7. Nielsen U. D. A concise account of techniques available for shipboard sea state estimation // *Ocean Engineering*. – 2017. – Т. 129. – С. 352-362.
8. Takekuma K. On the Evaluation of Sea Spectra based on the Measured Ship Motions // *Західна суднобудівна асоціація*. – 1973. – №. 45. – С. 51-57.
9. Huang, G., Liu, Z., Van Der Maaten, L., & Weinberger, K. Q. (2017). Densely Connected Convolutional Networks. *Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*.
10. X. Cheng, G. Li, A. L. Ellefsen, S. Chen, H. P. Hildre and H. Zhang, "A Novel Densely Connected Convolutional Neural Network for Sea-State Estimation Using Ship Motion Data," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, no. 9, pp. 5984-5993, Sept. 2020, doi: 10.1109/TIM.2020.2967115.
11. Lai, Zhichen, et al. "Multiscale wavelet-driven graph convolutional network for blade icing detection of wind turbines." *IEEE Sensors Journal* 22.22 (2022): 21974-21985.

Received (Надійшла) 10.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

#### Development of a model of a deep neural network for assessing the state of the sea on the basis of the ship's motion

Iryna Hannoshyna

**Abstract.** The aim of the work is to develop a deep neural network model for estimating the state of the sea based on the movement of a ship using densely connected convolutional neural networks to improve the safety and efficiency, accuracy, dependence, and dynamics of the sea state estimation for solving classification problems and regression problems. As a result of building a model of a deep neural network for assessing the state of the sea based on the movement of a vessel, the following results were obtained: initially, a network architecture was developed based on densely connected convolutional neural networks (DenseNet) with a unique combination of modifications and layers. Such an architecture effectively considers the dependencies and dynamics of the vessel's movement, which leads to a more accurate assessment of the state of the sea; secondly, the network was trained on prepared vessel motion data using optimizers and loss functions selected in accordance with the task of assessing the state of the sea. The training process included tuning hyperparameters, optimizing weights, and evaluating model performance against test data; thirdly, the model was evaluated from the test data using appropriate metrics depending on the specific task of assessing the state of the sea. For example, the accuracy and error matrix were used for the classification task, and the mean absolute error (MAE) and root mean square error (MSE) were used for the regression task. The results of building a deep neural network model for estimating the state of the sea based on the movement of a vessel confirm its effectiveness and significance for research purposes. The application of such a model is important in the context of assessing the state of the sea. The high accuracy of the estimate helps to make more reliable decisions and predict possible changes in accordance with the sea conditions that are currently occurring in the movement of the vessel. Considering the dependencies and dynamics of the vessel's movement allows modeling and adapting to changing conditions, which increases its manufacturability and efficiency. The use of such a model helps to improve the safety and efficiency of offshore operations, optimize the use of resources, and prevent possible accidents. Thus, a deep neural network model developed to estimate the state of the sea based on the movement of a vessel is an effective tool for the safety and efficiency of navigation. Its use contributes to more accurate forecasts and informed decision-making, which is important for maritime operations and ensuring the safety of navigation in general.

**Keywords:** deep neural network, network model, sea state estimation, vessel motion, tightly coupled convolutional neural network.

О. І. Дубинець

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## МЕТОД ТЕСТУВАННЯ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ ГЛИБОКОГО НАВЧАННЯ ДЛЯ РОЗРАХУНКУ ШЛЯХУ СУДНА В РІЗНИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИТУАЦІЯХ

**Анотація.** Метою статті є розробка методу тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна для підвищення продуктивності відповідної числової моделі в різних навігаційних ситуаціях. Дослідження і розробка методів підвищення точності розрахунку мають велике значення для вирішення завдань мореплавання. Одним з підходів до підвищення точності чисел є використання нейронних мереж глибокого навчання. Нейронні мережі глибокого навчання здатні моделювати залежності з високою точністю і мають переваги в продуктивності порівняно з традиційними підходами. Однак розробка і тестування таких мереж в навігаційних завданнях вимагає додаткових досліджень, в першу чергу з точки зору врахування особливостей предметної області, а не загальновідомих підходів щодо тестування глибоких нейронних мереж в узагальненому сенсі. **Представлений метод** тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна в різних навігаційних ситуаціях заснований на попередньому використанні імітаційної моделі руху судна, яка дозволяє моделювати різні навігаційні ситуації. Отримано три класи навігаційних ситуацій, які можна спостерігати в реальних умовах експлуатації судна. Для моделювання регулярних хвиль використовуються припущення лінійної теорії морських хвиль. Глибока нейронна мережа навчається на даних, отриманих з імітаційної моделі, і використовується для прогнозування траєкторії руху судна. Точність нейронної мережі оцінюється шляхом порівняння її прогнозів з траєкторією руху судна, отриманої з імітаційної моделі. **Результати випробувань** показали, що нейронна мережа може точно прогнозувати траєкторію руху судна в різних навігаційних ситуаціях. Метод може бути використаний для оцінки точності нейронних мереж глибокого навчання для розрахунку шляху судна в різних навігаційних ситуаціях.

**Ключові слова:** розрахунок шляху судна, точність, нейронні мережі глибокого навчання, імітаційна модель, тестування, навігаційні ситуації.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Дослідження і розробка методів підвищення точності розрахунку мають велике значення для вирішення завдань мореплавання. Одним з таких завдань є отримання координат місцезнаходження судна в умовах, коли зовнішні вимірювання недоступні. Ще одне завдання – визначення місця розташування судна за допомогою різних датчиків. Точність розрахунку параметрів руху судна впливає на точність визначення його координат, отриманих за допомогою навігаційної системи.

Точність розрахунку можна підвищити двома основними шляхами: підвищенням точності датчиків і вдосконаленням алгоритмів обробки інформації. Використовувані у теперішній час алгоритми обробки інформації базуються на традиційних методах. Однак вони мають деякі недоліки і не завжди гарантують достатню точність.

До перспективних підходів відноситься використання нейронних мереж глибокого навчання, які здатні моделювати залежності з високою точністю і мають переваги у продуктивності. Нейронна мережа глибокого навчання – це тип алгоритму машинного навчання, який може вчитися на великих обсягах даних і робити прогнози. У цьому випадку нейронна мережа навчається на даних про минулий рух судна і використовується для прогнозування майбутнього руху судна. Однак розробка і тестування таких мереж у завданнях навігації вимагають додаткових досліджень. У першу чергу це стосується врахування особливостей предметної області, а не загальновідомих підходів щодо тестування глибоких нейронних мереж в узагальненому сенсі. Таким чином, розробка і тестування більш точних моделей розрахунку шляху

судна на основі нейронних мереж глибокого навчання є актуальним завданням.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** На даний час існує значна кількість досліджень щодо використання як традиційних підходів, так і глибоких нейронних мереж для вирішення різноманітних завдань розрахунку шляху як надводних, так і підводних суден [1 - 10]. Безпосередньо використання нейронних мереж глибокого навчання у відповідній предметній галузі розглядається в роботах [1 - 3].

Так, у статті [1] розглядаються підводні планери з плавучістю, які вважаються передовими платформами для масштабного освоєння океану. Однак на нього сильно впливають океанічні течії, і традиційні методи розрахунку шляху є ненадійними. Навігаційні методи недостатні для точного прогнозування власного положення, що викликає великі труднощі при виявленні підводних цілей. Для прогнозування положення підводних планерів автори запропонували навігаційний метод оцінювання, який базується на сучасній моделі прогнозування та гібридній нейронній мережі (гібрид згорткової нейронної мережі з довготривалою короткочасною пам'яттю). Аналіз результатів експерименту показав, що гібридна нейронна модель, навчена з використанням даних підводних планерних морських випробувань і змодельованих даних руху, може передбачити швидкість планера точніше, ніж навігація, розрахована за маршрутом з використанням традиційних підходів.

У статті [2] розглядаються питання автоматизації виявлення аномалій руху суден для служб безпеки морського та прибережного руху. Для вирішення цього завдання використовувалися методи глибокого навчання, зокрема, згорткові нейронні мережі (CNN). Сформовано три варіанти наборів даних, що містять

вибірки маршрутів суден відносно забороненої зони у вигляді зображення у градаціях сірого. 1458 згорткових нейронних мереж з різною структурою були навчені для пошуку найкращої структури для класифікації аномалій. Досліджено вплив різних параметрів мережевих структур на загальну точність класифікації. Для кращих мереж були вивчені коефіцієнти прогнозування класів. Запропоновано кращу згорткову нейронну мережу для виявлення аномалій руху судин. Запропонована CNN порівнюється з декількома базовими алгоритмами, навченими на одному наборі даних.

У роботі [3] розглянуто завдання відстеження траєкторії надводного судна з недостатнім приводом з модельними параметричними невизначеностями за наявності невідомих океанічних течій з вхідною насиченістю та обмеженими ресурсами передачі, гарантуючи при цьому відсутність зіткнення з найближчим судном відповідно до Міжнародних правил запобігання зіткненням суден на морі (МППЗС). Беручи до уваги практику МППЗС, у цьому документі пропонується стратегія вирішення проблеми уникнення зіткнень при наявності зустрічної ситуації. Виходячи з різних етапів ситуації зіткнення, пропонується метод функції потенційного відштовхування, заснований на переплануванні локального шляху таким чином, що потенційна сила, створювана алгоритмом прийняття рішень, безпосередньо впливає на початкову бажану траєкторію, відхиляючи власне судно для отримання інструкцій відповідно до обмежень МППЗС. Відновивши структуру відстеження шляху, у даній статті пропонується новий алгоритм навігаційного управління з уникненням зіткнень між судами. На навігаційному рівні пропонується заздалегідь визначена стратегія управління продуктивністю протягом кінцевого часу, з розгортанням нових асиметричних оболонок для прописування помилок відстеження шляху в межах визначених користувачем обмежень при одночасному зменшенні викидів перехідних речовин. Крім того, для збільшення ефективності в умовах невизначеності моделі та зовнішніх перешкод використовується метод нейронної мережі радіальної базисної функції (RBFNN). По-перше, пропонується спостерігач збурень нейронної мережі другого порядку. Потім на основі передбачуваних комплексних збурень розробляється адаптивний контролер з використанням механізму спрацьовування подій, а також підхід поперечних функцій і метод зворотного кроку. Показано, що за допомогою запропонованої методики всі сигнали в закритих системах напівглобально рівномірно обмежені, а помилки відстеження на виході сходяться до заданої як завгодно малої області за кінцевий час. Крім того, прямим підходом Ляпунова доводиться існування мінімального часу між подіями і таким чином уникається поведінка Зенона. Нарешті, проводяться експерименти для перевірки ефективності та характеристик запропонованої стратегії управління.

Але у розглянутих роботах не досягнута потрібна продуктивність відповідної числової моделі в різних навігаційних ситуаціях, що мають місце при русі судна.

**Метою статті** є розробка методу тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна для підвищення продуктивності відповідної числової моделі в різних навігаційних ситуаціях.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Метод тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна (рис. 1) використовується для перевірки його працездатності в різних навігаційних ситуаціях, які можуть мати місце в реальності.

Навігаційна обстановка (navigation situation (*NS*)) – це характеристики вітру і хвиль, які відносяться до конкретного судна в його поточному районі плавання. Вона містить у собі дані про кут курсу відносного вітру, його швидкість, а також кут курсу і висоту хвиль. Навігаційна обстановка визначається по відношенню до конкретного судна і впливає на його рух.

Гідрометеорологічна обстановка (hydro-meteorological situation (*HS*)) – це параметри вітру і хвилювання у певний момент часу. Сюди входять дані про швидкість справжнього вітру, висоту хвиль і напрямок їх поширення в конкретному районі навігації. Гідрометеорологічна обстановка існує незалежно від руху судна і характеризує стан морського середовища. Для судна з нерухомим кермом і гвинтом характеристики керуючого впливу (control action (*CA*)) містять швидкість гребного гвинта і кут нахилу керма. З іншого боку, *CA* і *HS* визначають обурення (disturbance (*D*)), такі як аеродинамічна сила, яка діє на судно із зовнішнього середовища. Можна зробити висновок, що ці параметри впливають на рух судна і його безпеку в поточних навігаційних умовах.

Таким чином, формально будемо вважати, що

$$NS = HS + CA = D. \quad (1)$$

Такий підхід дає можливість розробити класифікацію *NS* за характером поведінки в часі *CA* і *D*. При цьому можливі чотири варіанти *NS*:

- 1)  $CA = constant$ , тобто є постійними в часі, і  $D = constant$ ;
- 2)  $CA = constant$ , а  $D = variable$ , тобто змінна;
- 3)  $CA = variable$ , а  $D = constant$ ;
- 4)  $CA = variable$  і  $D = variable$ .

Перший варіант можна вважати стабільним: судно рухається за постійним курсом і швидкістю в умовах постійного вітру у спокійній воді. Параметри *HS* і *CA* не змінюються.

Другий варіант можна розглядати як циркуляційний. Судно циркулює при постійному вітру у спокійній воді. Параметри *HS* і *CA* залишаються постійними.

Третій варіант – приблизно стабільний. Деякі характеристики *HS* зберігаються, незважаючи на зміни *CA* й обурення (наприклад, в режимі рульового управління).

Четвертий варіант – змінний, коли зміна мети цілі керма і швидкість гвинта змінюються з плином

часу. Параметри  $HS$  також можуть змінюватися або залишатися постійними.

Розглянуті варіанти  $NS$  пропонується об'єднати в три класи (табл. 1).

Таблиця 1 – Характеристика класів  $NS$

№ класу	Ознаки $NS$	Правила моделювання $HS$
1	$D$ приблизно постійні, а $CA$ можуть або змінюватися, або ні (в залежності від налаштування автопілоту).	$HS$ константа. Судно тримається на заданому курсі при постійній швидкості гребного гвинта.
2	$CA$ в середньому постійні з плином часу, тоді як $D$ змінюються з часом.	$HS$ постійна або змінна. Задаються швидкість гвинта і кут нахилу керма, які залишаються незмінними під час плавання судна.
3	$CA$ змінюються, а $D$ змінюється з часом.	$HS$ постійна або змінна. Швидкість обертання гребного гвинта і кут нахилу керма змінюються з плином часу за певним законом.

Таким чином, отримують три класи  $NS$ , які можна спостерігати в реальних умовах експлуатації судна.

Для моделювання цих класів  $NS$  необхідно вирішити ряд питань, в тому числі використовувати автоматичну систему стабілізації судна при заданому курсі (в якості алгоритму автопілоту використовується ПІД-регулятор, коефіцієнти якого враховують швидкість  $V_x$ ) і використання датчиків випадкових чисел для моделювання  $HS$  (протягом усього рейсу його параметри залишаються незмінними в часі і просто вибираються за допомогою датчиків випадкових чисел рівномірного розподілу з інтервалів, зазначених в табл. 3).

Для моделювання регулярних хвиль використовуються припущення лінійної теорії морських хвиль.

Припустимо, що крутизна хвилі ( $h / \lambda$ ) не перевищує 0,2.

У цьому випадку справжній період хвиль формально визначається як  $\sqrt{2\pi a / g}$ , де  $g$  – прискорення за рахунок сили тяжіння.

Якщо  $HS$  змінні, то параметри вітру і хвиль вважаються змінними в часі  $t$  за виразом

$$x(t) = x_0 + A_1 \sin(2\pi t / \tau_1) + A_2 \sin(2\pi t / \tau_2) + A_3 \sin(2\pi t / \tau_3), \quad (2)$$

де  $x_0$  – середнє значення, випадковим чином обране з можливих значень відповідно до табл. 3;

$A_1, A_2, A_3, \tau_1, \tau_2, \tau_3$  – амплітуди і періоди першої, другої і третьої гармонік відповідно.

Перша гармоніка – це головна хвиля. Вона має найнижчу частоту і найбільшу амплітуду.

Всі інші гармоніки кратні гармонікам, тобто вони мають частоти, кратні частоті 1-ої гармоніки. Амплітуди інших гармонік менше амплітуди 1-ої гармоніки.

Друга гармоніка – це хвиля, яка має частоту, що у два рази перевищує частоту першої гармоніки. Вона має амплітуду, яка дорівнює половині амплітуди 1-ої гармоніки.

Другу гармоніку часто називають другою фундаментальною хвилею.

Третя гармоніка – це хвиля, яка має частоту, що у три рази перевищує частоту 1-ої гармоніки. Вона має амплітуду, яка дорівнює одній третині амплітуди 1-ої гармоніки.

Третю гармоніку часто називають третьою фундаментальною хвилею.

Межі розглянутих амплітуд  $A_1, A_2, A_3$  та періоди  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  наведені у табл. 2.

Одиниці виміру амплітуд приймаються так, як показано в табл. 3.

Таблиця 2 – Параметри гармонік величин, що характеризують  $HS$

Найменування	1-ша гармоніка		2-га гармоніка		3-тя гармоніка	
	$A_1$	$\tau_1$	$A_2$	$\tau_2$	$A_3$	$\tau_3$
$V_{tr}$	[0; 30]	2-10 год	[0;5]	10 хв – 1 год	[0;2]	10 с – 1 хв
$K_{tr}$	[0; 360]	1 год, 1000 і 30 с	[0;30]	1 год, 1000 і 30 с	[0;10]	10 хв – 1 год
$h$	[0; 5]	1 год	–	–	–	–
$K_w$	[0; 90]	1 год	–	–	–	–
$\lambda$	[30; 100]	1-10 год	–	–	–	–

Таблиця 3 – Параметри, що безпосередньо характеризують  $HS$

Параметр	Найменування	Одиниці виміру	Межі значень
Напрямок справжнього вітру	$K_{tr}$	градуси	[0; 360]
Справжня швидкість вітру	$V_{tr}$	м/с	[0; 30]
Напрямок збудження (звідки беруться хвилі)	$K_w$	градуси	[0; 360]
Довжина хвилі	$\lambda$	м	[10; 250]
Висота хвилі	$h$	м	[0; 10]

Для  $K_{tr}$  для першої і другої гармонік період  $\tau$  напрямку істинного вітру може відрізнятися від періоду відповідних гармонік для його швидкості (модуля) не більше ніж на 1 год, 1000 і 30 с відповідно.

Для  $h$  для першої гармоніки період  $\tau$  зміни висоти хвилі може відрізнятися від періоду зміни першої гармоніки істинної швидкості вітру на величину, що не перевищує по модулю 1 год.

Для  $K_w$  для першої гармоніки період  $\tau$  зміни напрямку збудження може відрізнятися від періоду зміни першої гармоніки напрямку справжнього вітру на величину, що не перевищує по модулю 1 год.

Моделювання  $NS$  третього класу передбачає, що кут нахилу керма і швидкість гвинта змінюються з часом відповідно до такого закону:

$$\delta(t) = 35^\circ \sin(2\pi t/\tau_\delta), n(t) = (n_{max}/2)(1 + \sin(2\pi t/\tau_n)), \quad (3)$$

де  $\delta(t)$  – період зміни кута нахилу керма;

$n(t)$  – період зміни швидкості гребного гвинта.

Найменші значення цих значень вибираються виходячи з обмежень силової установки і рульового комплексу.

Найвищі значення вдвічі перевищують час плавання в кожній ситуації.

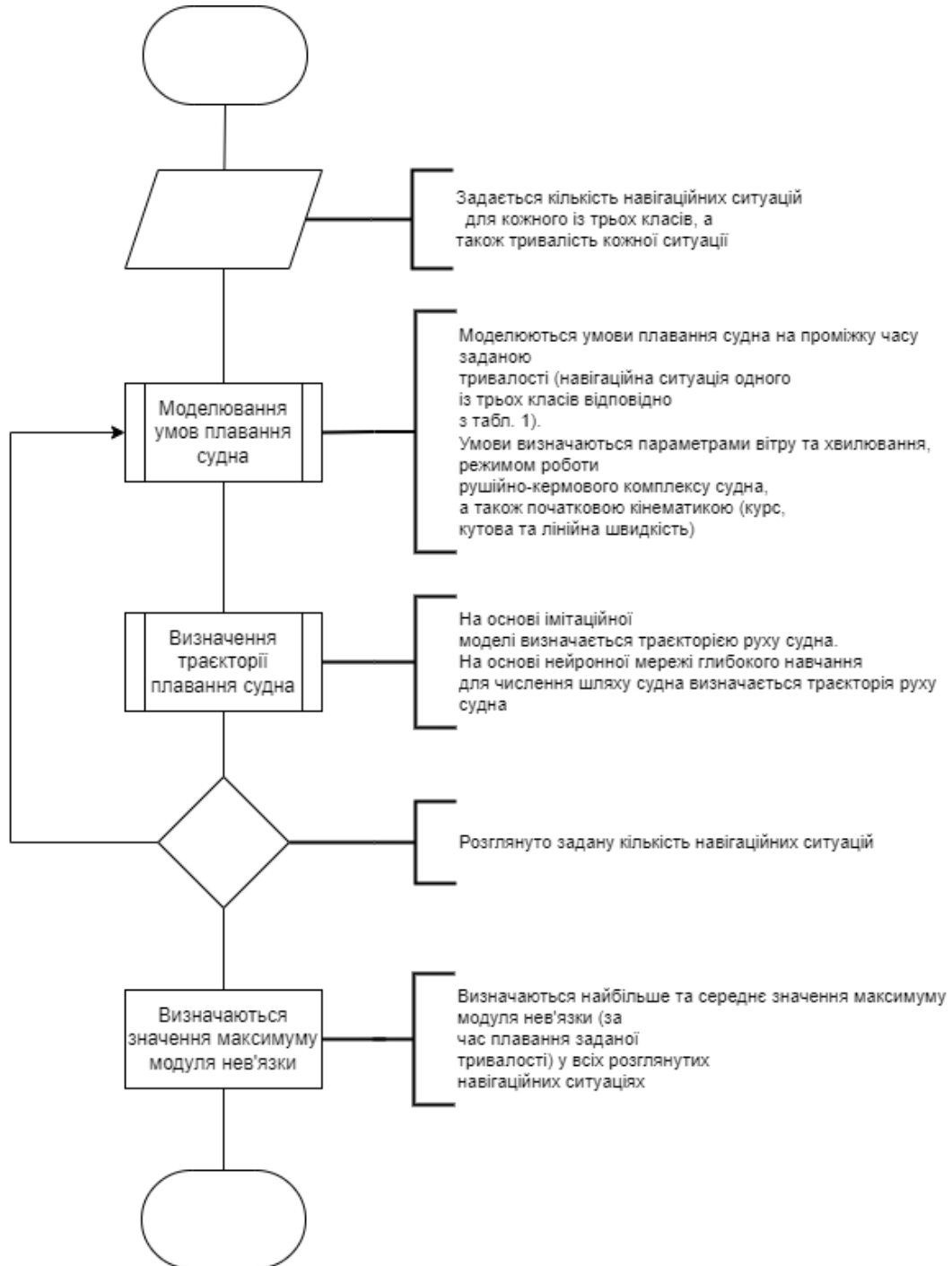


Рис. 1. Структура методу тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна

Іншими словами, найменші значення величин повинні бути такими, щоб силово-рульовий комплекс міг їх підтримувати. Найвищі значення величин повинні бути такими, щоб судно могло плавати вдвічі більше часу в кожній ситуації.

Узагальнена структура методу тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна наведена на рис. 1.

У цілому метод тестування дозволяє оцінити точність нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку шляху судна в різних навігаційних ситуаціях.

### Висновки

У даній статті представлений метод тестування нейронної мережі глибокого навчання для розрахунку

шляху судна в різних навігаційних ситуаціях. Метод заснований на попередньому використанні імітаційної моделі руху судна, яка дозволяє моделювати різні навігаційні ситуації.

Нейронна мережа навчається на даних, отриманих з імітаційної моделі, і використовується для прогнозування траєкторії руху судна. Точність нейронної мережі оцінюється шляхом порівняння її прогнозів з траєкторією руху судна, отриманого з імітаційної моделі.

Результати випробувань показали, що нейронна мережа може точно прогнозувати траєкторію руху судна в різних навігаційних ситуаціях.

Метод може бути використаний для оцінки точності нейронних мереж глибокого навчання для розрахунку шляху судна в різних навігаційних ситуаціях.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Baochun Qiu, Maofa Wang, Houwei Li, Li Ma, Xiuquan Li, Zefei Zhu, Fan Zhou, Development of hybrid neural network and current forecasting model based dead reckoning method for accurate prediction of underwater glider position, *Ocean Engineering*, Volume 285, Part 2, 2023.
2. Bartosz Czaplewski, Mariusz Dzwonkowski, A novel approach exploiting properties of convolutional neural networks for vessel movement anomaly detection and classification, *ISA Transactions*, Volume 119, 2022, Pages 1-16.
3. Jawhar Ghommam, Lamia Iftekhar, Maarouf Saad, Event-triggered path tracking control with obstacle avoidance for underactuated surface vessel compliant with COLREGs-constraints: Theory and experiments, *Mechatronics*, Volume 94, 2023.
4. Gwang-Hyeok Choi, Wonhee Lee, Tae-wan Kim, "Voyage optimization using dynamic programming with initial quadtree based route", *Journal of Computational Design and Engineering*, vol.10, no.3, pp.1185, 2023.
5. Hirotada Hashimoto, Yuuki Taniguchi, Michio Fujii, "A Case Study on Operational Measures for Avoiding Parametric Rolling", *Contemporary Ideas on Ship Stability*, vol.134, pp.307, 2023.
6. Ageliki Kytariolou, Nikos Themelis, "Ship routing optimisation based on forecasted weather data and considering safety criteria", *Journal of Navigation*, pp.1, 2023.
7. Michio Fujii, Hirotada Hashimoto, Yuuki Taniguchi, Eiichi Kobayashi, "Statistical validation of a voyage simulation model for ocean-going ships using satellite AIS data", *Journal of Marine Science and Technology*, 2019.
8. Chang, K. Y., Jan, G. E. and Parberry, I. (2003). A method for searching optimal routes with collision avoidance on raster charts. *The Journal of Navigation*, 56, 371–384.
9. Gkerekos, C. and Lazakis, I. (2020). A novel, data-driven heuristic framework for vessel weather routing. *Ocean Engineering*, 197, 106887.
10. Kobayashi E, Hashimoto H, Taniguchi Y, Yoneda S (2015) Advanced optimized weather routing for an ocean-going vessel. In: *Proceedings of the 2015 international association of institutes of navigation world congress*, Prague, pp 1–8.

Received (Надійшла) 17.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

### A method for testing a deep learning neural network to calculate the trajectory of a vessel in various navigation situations

O. Dubynets

**Abstract.** The purpose of the article is to develop a method for testing a deep learning neural network for calculating the ship's path to improve the performance of the corresponding numerical model in various navigation situations. Research and development of methods to improve calculation accuracy is of great importance for solving navigation problems. One of the approaches to improving the accuracy of numbers is the use of deep learning neural networks. Deep learning neural networks can model dependencies with high accuracy and have performance advantages over traditional approaches. However, the development and testing of such networks in navigation tasks requires additional research, primarily in terms of considering the specifics of the subject area, rather than well-known approaches to testing deep neural networks in a generalised sense. The presented method of testing a deep learning neural network for calculating the ship's path in various navigation situations is based on the preliminary use of a simulation model of ship motion, which allows simulating various navigation situations. Three classes of navigational situations are obtained that can be observed in real ship operation conditions. The assumptions of the linear theory of sea waves are used to model regular waves. A deep neural network is trained on data obtained from a simulation model and used to predict the ship's trajectory. The accuracy of the neural network is assessed by comparing its predictions with the ship's trajectory obtained from the simulation model. The test results showed that the neural network can accurately predict the ship's trajectory in various navigation situations. The method can be used to evaluate the accuracy of deep learning neural networks for calculating the ship's path in various navigation situations.

**Keywords:** ship path calculation, accuracy, deep learning neural networks, simulation model, testing, navigation situations.



О. В. Маранов

Державний університет інфраструктури та технологій, Київ, Україна

## ПРОГНОЗУВАННЯ ВІДМОВ СУДНОВИХ НАВІГАЦІЙНИХ СИСТЕМ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕТОДІВ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

**Анотація.** Метою статті є розробка методу використання випадкового лісу для прогнозування відмов суднових навігаційних систем з високим ступенем точності для підвищення безпеки на морі. Суднові навігаційні системи відіграють важливу роль у безпеці судноплавства. Вони надають капітанам суден інформацію про їх місцезнаходження, погоду та інші умови, які можуть вплинути на безпеку судна. Однак навігаційні системи суден також схильні до збоїв. Помилки в навігаційних системах можуть призвести до зіткнень, затоплення та інших небезпечних ситуацій. У статті запропоновано використовувати алгоритм випадкового лісу для прогнозування відмов суднових навігаційних систем. Алгоритм випадкового лісу – це техніка машинного навчання, яка може бути використана для побудови моделей, здатних передбачити ймовірність події. У даному випадку подією є вихід з ладу навігаційної системи. Алгоритм випадкового лісу працює шляхом побудови ряду дерев рішень. Кожне дерево рішень будується на підвбірці даних. Підвбірка даних здійснюється випадковим чином. Потім алгоритм об'єднує передбачення всіх дерев рішень для отримання остаточного прогнозу. У статті продемонстровано, що алгоритм випадкового лісу може бути використаний для прогнозування відмов суднових навігаційних систем з високим ступенем точності. Використовувався набір даних з 1 000 записів. Набір даних містив дані з датчиків, а також мітку, яка вказувала, чи була навігаційна система справною на той момент часу. Модель була навчена на 80% набору даних, а 20% набору даних було використано для перевірки точності моделі. Точність моделі на тестовому наборі склала 95%. Таким чином, результати показують, що алгоритм випадкового лісу може бути використаний для підвищення безпеки на морі. З його допомогою можна запобігти відмовам навігаційних систем суден, що може запобігти зіткненням, затопленням та іншим небезпечним ситуаціям.

**Ключові слова:** система навігації суден, алгоритм випадкового лісу, прогнозування відмов, безпека на морі, машинне навчання, точність, ефективність.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Навігаційні системи судна відіграють життєво важливу роль у безпечній та ефективній експлуатації судна. Вони надають капітану судна інформацію про місцезнаходження, курс і швидкість судна, а також навколишнє середовище. Це дозволяє капітану приймати правильні рішення про те, як керувати судном, щоб уникнути зіткнень, затоплення та інших небезпек. Однак навігаційні системи суден схильні до збоїв. Ці поломки можуть бути викликані різними причинами, такими як знос, неправильна експлуатація, зовнішні впливи. Коли навігаційна система виходить з ладу, це може призвести до серйозних наслідків, таких як втрата місця розташування судна, зіткнення з іншими об'єктами, затоплення.

Прогнозування відмов навігаційних систем суден – завдання, яке полягає в оцінці ймовірності відмови системи в майбутньому. Це робиться шляхом збору даних про минулу поведінку системи і використання цих даних для навчання моделі машинного навчання. Потім модель машинного навчання може бути використана для прогнозування ймовірності збою системи в майбутньому.

Прогнозування відмов навігаційних систем суден є важливим з кількох причин. По-перше, це може допомогти запобігти збоєм системи, що запобігає зіткненням, затопленням та іншим небезпечним ситуаціям. По-друге, це може допомогти при плануванні обслуговування системи, що дозволяє запланувати технічне обслуговування систем до їх виходу з ладу, що запобігає раптовим збоєм. По-третє, воно може допомогти в оцінці ризиків, пов'язаних з використанням навігаційних систем судна, дозволяючи приймати обґрунтовані рішення про те, як керувати судном.

Методи машинного навчання можуть бути використані для прогнозування відмов навігаційних систем суден з високою точністю. Це може допомогти запобігти збоєм системи, що в свою чергу запобігає зіткненням, затопленням та іншим небезпечним ситуаціям. Крім того, методи машинного навчання можуть використовуватися для планування обслуговування суднових навігаційних систем. Це дозволяє запланувати технічне обслуговування систем до виходу їх з ладу, що запобігає раптовим збоєм. Загалом, методи машинного навчання можуть бути використані для підвищення безпеки та надійності суднових навігаційних систем. Це може привести до зниження ризиків зіткнень, затоплення та інших небезпечних ситуацій.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Досить значна кількість робіт в даний час присвячена вивченню проблем використання глибинного навчання для прогнозування відмов радіоелектронних систем водних транспортних споруд [1 - 8].

Наприклад, в статті [1] розглядаються різні методи машинного навчання, які можуть бути використані для виявлення і діагностики несправностей двигуна в судноплавстві. У статті також представлені результати застосування цих методів до реального набору даних. У статті показано, що методи машинного навчання можуть використовуватися для виявлення несправностей двигуна на ранній стадії, що дозволяє вживати заходів щодо їх усунення до того, як вони призведуть до серйозних проблем. Крім того, для діагностики типу несправності можуть використовуватися машинні методи, що дозволяє вжити більш точних заходів щодо її усунення. Результати, представлені в статті, показують, що методи машинного навчання можуть бути використані для поліпшення діагностики несправностей двигунів у судноплавстві. Це може призвести до зниження витрат на

технічне обслуговування та ремонт, а також підвищення безпеки доставки.

У статті [2] порівнюється кілька типових контрольованих алгоритмів машинного навчання, наприклад, eXtreme Gradient Boosting (XGBoost), штучна нейронна мережа, метод опорних векторів, а також статистичні регресійні методи моделювання швидкості і потужності судна. Спочатку представлена загальна структура попередньої обробки даних. Різні моделі на основі машинного навчання навчаються як за експлуатаційними параметрами судна, так і за метеорологічними та океанічними умовами. На основі повномасштабних даних вимірювань, зібраних на двох типах вітрильних суден по всьому світу, порівнюються плюси і мінуси різних алгоритмів машинного навчання для моделювання високошвидкісних характеристик судна. Нарешті, модель XGBoost з найкращою продуктивністю вибирається для аналізу чутливості через кількість доступних даних про судно, розрахунковий період часу для кожної стаціонарної маршрутної точки (вибіркі даних), що використовується для навчання моделі, та оцінки їх впливу на онлайн-прогнозування ефективності.

Витрата палива (FOC) є основним компонентом витрат для операторів суден, на нього припадає понад 25% загальних експлуатаційних витрат. Точний прогноз FOC може допомогти операторам суден оптимізувати свої операції та зменшити споживання палива, що призведе до значної економії коштів. Дослідження [3] порівнює продуктивність різних моделей машинного навчання для прогнозування FOC. Використовується набір даних експлуатаційних даних судна, включаючи FOC, швидкість, навантаження та погодні умови. Моделі, які були розглянуті, включають дерева рішень, випадкові ліси, машини опорних векторів і нейронні мережі. Було виявлено, що модель випадкового лісу забезпечує найкращу точність прогнозу із середньою похибкою 1,5%. Інші моделі також показують хороші результати, із середніми похибками 2%, 2,5% і 3% для дерев рішень, підтримують векторні машини і нейронні мережі відповідно. Результати показують, що моделі машинного навчання можуть бути використані для прогнозування FOC з високою точністю. Це може бути використано операторами суден для оптимізації своїх операцій та зменшення споживання палива.

У підводних навігаційних системах інформація глобальної навігаційної супутникової системи (ГНСС) не може бути використана для навігації. Основним методом побудови підводної навігаційної системи автономних підводних апаратів (АНПА) є доплерівський лог (ДВЛ) з використанням стрічкової інерціальної навігаційної системи (SINS). Однак, оскільки DVL є приладом частотного доплерівського зсуву для вимірювання швидкості, на нього легко впливає зовнішнє середовище. У складному підводному середовищі вихід DVL легко забруднюється викидами або навіть переривається. У [4] запропонований новий інтегрований навігаційний алгоритм, заснований на моделі глибокого навчання для усунення несправностей DVL. Спочатку використовуйте RKF на основі алгоритму відстані Махаланобіса для усунення викидів, а потім навчіть модель нелінійної авторегресії екзогенного входу (NARX), коли DVL доступний. Коли DVL переривається, викорис-

туйте модель NARX, щоб передбачити вихід DVL і продовжити інтегровану навігацію. Перевірка ефективності запропонованої схеми НАРКС-РКФ проводилася на масиві даних, зібраних судновою експериментальною системою BINS/DVL. Для порівняння в експерименті також порівнюються різні методи. Результати експериментів показують, що NARX-RKF може ефективно прогнозувати вихід DVL і значно краще, ніж інші методи.

**Метою статті** є розробка методу використання випадкового лісу для прогнозування відмов навігаційних систем суден з високим ступенем точності для підвищення безпеки на морі.

### Викладення основного матеріалу дослідження

Виконаємо формальне визначення задачі прогнозування відмов навігаційних систем суден, записане у вигляді математичного виразу, заснованого на теорії множин:

1. Дано: набір даних  $D$ , що складається з ознак  $X$  та цільових змінних  $Y$ . Ознаки  $X$  є характеристиками навігаційної системи судна, які можуть бути використані для прогнозування відмови. Цільові змінні  $Y$  являють собою ймовірність виходу з ладу навігаційної системи судна.

2. Знайти: моделі  $f$ , які можуть передбачати цільові змінні  $Y$  для нових даних. Моделі  $f$  можуть бути представлені різними способами, такими як логістична регресія, дерева рішень або випадкові ліси. Вибір конкретного методу буде залежати від конкретних даних і завдання.

У задачах прогнозування відмов навігаційних систем суден використовуються різні дані з різних  $D$ . Деякі з найпоширеніших типів даних містять:

а) дані про стан системи: інформація про стан навігаційної системи (температура, тиск, струм та напруга);

б) дані про продуктивність системи: інформація про продуктивність навігаційної системи (точність місцезнаходження, час відгуку та рівень помилок);

в) дані про використання системи: інформація про використання навігаційної системи (тривалість роботи, частота використання та типи операцій).

На додаток до цих даних можуть використовуватися інші дані, наприклад про навколишнє середовище, погоду, обслуговування системи тощо.

Прогнозування відмов суднових навігаційних систем (NVS) є важливим завданням, яке може допомогти підвищити безпеку на морі. Існує багато різних методів машинного навчання, які можна використовувати для прогнозування збоїв NVS. Деякі з найбільш популярних методів мистять [9, 10]:

1. Дерева рішень – це тип алгоритму машинного навчання, який можна використовувати для прогнозування збоїв NVS. Алгоритм працює шляхом побудови дерева, в якому кожен вузол представляє особливість, а кожна гілка представляє рішення. Дерева рішень можуть бути використані для прогнозування ймовірності виходу системи з ладу на основі даних про її минулу поведінку.

2. Випадкові ліси – це ще один тип алгоритму машинного навчання, який можна використовувати

для прогнозування збоїв NVS. Випадкові ліси працюють, будуючи кілька дерев рішень і об'єднуючи їх результати. Це дозволяє випадковим лісам робити більш точні прогнози, ніж дерева рішень.

3. Логістична регресія – це статистичний метод, який можна використовувати для прогнозування ймовірності події. Метод може бути використаний для прогнозування ймовірності виходу системи з ладу на основі даних про її минулу поведінку.

4. Підтримка векторних машин (Vector Machine Support (SVM)) – це тип алгоритму машинного навчання, який можна використовувати для класифікації даних. SVM можуть використовуватися для класифікації даних про відмову NVS, що може допомогти передбачити збої.

5. Нейронні мережі – це тип алгоритму машинного навчання, який можна використовувати для моделювання складних відносин між входами та виходами. Нейронні мережі можуть бути використані для моделювання взаємозв'язку між даними про відмову NVS і ймовірністю відмови, що може допомогти в прогнозуванні збоїв.

Випадкові ліси мають ряд переваг перед іншими методами машинного навчання. По-перше, випадкові ліси стійкі до викидів. Це означає, що на них не сильно вплине наявність викидів у даних. По-друге, випадкові ліси рідше переобладнуються. Це означає, що вони не будуть занадто добре відповідати навчальним даним і зможуть добре підсумувати дані. По-третє, випадкові ліси можуть робити більш точні прогнози, ніж інші методи машинного навчання.

У результаті випадкові ліси розглядаються в даній роботі як кращий метод машинного навчання для прогнозування відмов навігаційних систем суден. Визначимо математичний вираз для результату вилучення і виділення ознак, які можуть бути корисні для прогнозування відмов судових навігаційних систем

$$M = \{T, P, C, V, LA, RT, ER, DO, FU, TOP\}, \quad (1)$$

де  $M$  – множина ознак, які були обрані для прогнозування відмов навігаційних систем суден;  $T$  – температура;  $P$  – тиск;  $C$  – струм;  $V$  – напруга;  $LA$  – точність визначення місцезнаходження;  $RT$  – час відгуку;  $ER$  – частота помилок;  $DO$  – тривалість роботи;  $FU$  – частота використання;  $TOP$  – види виконуваних операцій.

Ці особливості були відібрані на основі їх значення для прогнозування відмов навігаційних систем суден. Вони були обрані на основі аналізу даних попередніх відмов навігаційних систем суден, а також на основі експертної думки.

Методика побудови моделі прогнозування відмов навігаційних систем суден на основі випадкового лісу з використанням обраних ознак включає такі етапи (рис. 1):

1. Набір даних  $D$  ділиться на тренувальний набір  $D_{train}$  і тестовий набір  $D_{test}$ .

2. На тренувальному наборі  $D_{train}$  побудовано модель випадкового лісу.

3. Випадкова модель лісу використовується для прогнозування цільової змінної  $Y$  для тесту  $D_{test}$ .

4. Точність моделі оцінюється на тестовому наборі  $D_{test}$ .



Рис. 1. Узагальнена структура методу побудови моделі прогнозування відмов навігаційних систем суден на основі випадкового лісу

Модель випадкового лісу будується шляхом побудови дерев рішень на підвбірках навчальної множини  $D_{train}$ . Кожне дерево рішень будується на випадковій підвбірці ознак з множини  $M$ . Потім результати всіх дерев рішень об'єднуються, щоб отримати остаточний прогноз (рис. 2).

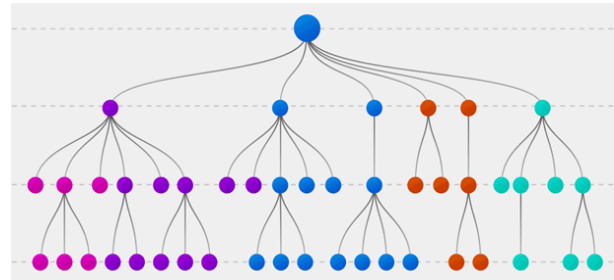


Рис. 2. Графічне представлення моделі випадкового лісу

Математична формула для оцінки точності випадкової моделі лісу на тестовій множині  $D_{test}$  виглядає так

$$Accuracy = \frac{1}{|D_{test}|} \sum_{x \in D_{test}} \mathbb{1}(y_x = \hat{y}_x) \quad (2)$$

де  $y_x$  – справжня цільова змінна для вибірки  $x$ ;

$\hat{y}_x$  – прогнозована цільова змінна для вибірки  $x$ ;

$\mathbb{1}(y_x = \hat{y}_x)$  – індикаторна функція, яка дорівнює 1, якщо  $(y_x = \hat{y}_x)$ , і 0 – в іншому випадку.

Точність моделі випадкового лісу може бути покращена шляхом збільшення кількості дерев у лісі, збільшення кількості ознак у кожному дереві та зменшення розміру підвбірок, на яких побудовані дерева.

Експериментальна установка складається з навігаційної системи судна і набору датчиків, які вимірюють різні параметри системи, такі як температура, тиск, струм і напруга. Набір датчиків встановлюється на судно і збирає дані за певний проміжок часу. Потім дані зберігаються в базі даних.

Вибірка даних складається з набору записів, кожен з яких представляє один момент часу. Кожен запис містить дані з датчиків, а також мітку, яка вказує, чи була навігаційна система справною в той момент часу. Вибірка даних збирається з бази даних і ділиться на навчальний набір і тестовий набір.

Навчальний набір використовується для навчання моделі машинного навчання, а тестовий мікс – для оцінки точності моделі.

Безпосередньо на практиці модель машинного навчання проходила навчання на наборі даних з 1 000 записів. Набір даних містив дані з датчиків, а також мітку, яка вказувала, чи була навігаційна система справною на той момент часу. Модель машинного навчання побудована з використанням алгоритму випадкового лісу та була навчена на 80% набору даних, а 20% набору даних було використано для перевірки точності моделі. Точність моделі на тестовому наборі склала 95%. Це означає, що модель правильно передбачила справність навігаційної системи в 95% випадків. Це означає, що модель може бути використана для прогнозування відмов навігаційних систем суден з високим ступенем точності. Модель може бути використана для підвищення безпеки на морі. З її допомогою можна запобігти відмовам навігаційних

систем суден, що може запобігти зіткненням, затопленням та іншим небезпечним ситуаціям.

### Висновки

Алгоритм випадкового лісу може бути ефективно використаний для прогнозування відмов судових навігаційних систем з високим ступенем точності. Модель може бути використана для підвищення безпеки на морі. Її використання дозволяє запобігти відмовам навігаційних систем суден. Наслідком такого підходу є зменшення ймовірності виникнення зіткнень, затоплень та інших небезпечних ситуацій.

Модель машинного навчання можна покращити, збільшивши розмір набору даних. Це дозволить моделі навчитися краще розпізнавати ознаки, які пов'язані з відмовами навігаційних систем суден. Модель машинного навчання також може бути покращена за допомогою більш складного алгоритму машинного навчання.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Tsaganos, G., Nikitakos, N., Dalaklis, D. et al. Machine learning algorithms in shipping: improving engine fault detection and diagnosis via ensemble methods. *WMU J Marit Affairs* 19, 51–72 (2020). <https://doi.org/10.1007/s13437-019-00192-w>.
2. Xiao Lang, Da Wu, Wengang Mao Comparison of supervised machine learning methods to predict ship propulsion power at sea, *Ocean Engineering*, Volume 245, 2022, 110387, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110387>.
3. Christos Gkerekos, Iraklis Lazakis, Gerasimos Theotokatos, Machine learning models for predicting ship main engine Fuel Oil Consumption: A comparative study, *Ocean Engineering*, Volume 188, 2019, 106282, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106282>.
4. D. Li, J. Xu, H. He and M. Wu, "An Underwater Integrated Navigation Algorithm to Deal With DVL Malfunctions Based on Deep Learning," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 82010-82020, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3083493.
5. Yiqing Yao, Xiang Xu, Xiaosu Xu, Itzik Klein, "Virtual Beam Aided SINS/DVL Tightly Coupled Integration Method with Partial DVL Measurements", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.72, no.1, pp.418-427, 2023.
6. Kim, Y.-R.; Jung, M.; Park, J.-B. Development of a Fuel Consumption Prediction Model Based on Machine Learning Using Ship In-Service Data. *J. Mar. Sci. Eng.* 2021, 9, 137. <https://doi.org/10.3390/jmse9020137>.
7. Zhu, J.; Li, A.; Qin, F.; Che, H.; Wang, J. A Novel Hybrid Method Based on Deep Learning for an Integrated Navigation System during DVL Signal Failure. *Electronics* 2022, 11, 2980. <https://doi.org/10.3390/electronics11192980>.
8. Yuchao Wang, Hui Wang, Bin Zhou, Huixuan Fu, Multi-dimensional prediction method based on Bi-LSTM for ship roll, *Ocean Engineering*, Volume 242, 2021, 110106, ISSN 0029-8018, <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2021.110106>. (<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S002980182101430X>).
9. Hastie, Trevor, Robert Tibshirani, and Jerome Friedman. *The Elements of Statistical Learning: Data Mining, Inference, and Prediction*. Springer-Verlag New York, 2009.
10. Bishop, Christopher M. *Pattern Recognition and Machine Learning*. Springer-Verlag New York, 2006.

Received (Надійшла) 10.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

### Prediction of failures of ship navigation systems using machine learning methods

O. Maranov

**Abstract.** The purpose of this article is to develop a method for using random forest to predict failures of ship navigation systems with a high degree of accuracy to improve safety at sea. Ship navigation systems play an important role in maritime safety. They provide ship captains with information about their location, weather, and other conditions that may affect the safety of the vessel. However, the navigation systems of ships are also prone to failures. Errors in navigation systems can lead to collisions, flooding and other dangerous situations. The article proposes to use the random forest algorithm to predict failures of ship navigation systems. A random forest algorithm is a machine learning technique that can be used to build models that can predict the probability of an event. In this case, the event is the failure of the navigation system. The random forest algorithm works by constructing a series of decision trees. Each decision tree is built on a subsample of data. Subsampling of data is done randomly. The algorithm then combines the predictions of all decision trees to produce the final prediction. The article demonstrated that the random forest algorithm can be used to predict failures of ship navigation systems with a high degree of accuracy. A dataset of 1000 records was used. The dataset contained data from the sensors, as well as a label that indicated whether the navigation system was healthy at that point in time. The model was trained on 80% of the dataset, and 20% of the dataset was used to test the accuracy of the model. The accuracy of the model on the test set was 95%. Thus, the results show that the random forest algorithm can be used to improve safety at sea. It can be used to prevent failures of ships' navigation systems, which can prevent collisions, flooding and other dangerous situations.

**Keywords:** vessel navigation system, random forest algorithm, failure prediction, maritime safety, machine learning, accuracy, efficiency.

Н. О. Євсіна, П. О. Качанов, М. В. Тарасенко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## СИНТЕЗ НЕЙРО-НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА З НАЛАШТУВАННЯМ ГЕНЕТИЧНИМ АЛГОРИТМОМ

**Анотація.** Метою статті є розгляд методики розробки нейро-нечіткого регулятора (ННР) з налаштуванням його параметрів генетичним алгоритмом (ГА). Отримані результати підтверджують працездатність методики та дозволяють зробити висновок про те, що нейро-нечіткий регулятор при відповідній налаштування забезпечує високу якість роботи системи керування, у тому числі і за наявності випадкових збурень на динамічний об'єкт. Запропонована у статті методика синтезу ННР протестована в умовах обмеженого обсягу вихідних даних навчальної вибірки, розмір якої не впливає на якість роботи алгоритму. Достатньо двох або трьох значень параметрів вибірки, щоб сформувати діапазони для меж термів нечітких змінних, а далі оптимальні значення підбираються ГА. У результаті розроблено алгоритм синтезу регулятора та генетичний алгоритм налаштування його параметрів.

**Ключові слова:** нечіткий регулятор, функція приналежності, дефазифікація, нейро-нечіткий регулятор, генетичний алгоритм.

### Вступ

Необхідність вирішення актуальних завдань автоматичного керування динамічними об'єктами при дії різноманітних випадкових збурень все частіше вимагає застосування інтелектуальних методів математичного моделювання, таких як нечітка логіка, генетичні алгоритми (ГА), нейронні мережі. Об'єднання нейронних мереж, ГА та нечітких алгоритмів дозволяє вирішувати завдання різної складності та невизначеності, але найважливіше – вони стають універсальним інструментом для обробки неточної, неповної чи нечіткої інформації [1].

Застосування інтелектуальних методів при побудові систем керування дозволяє суттєво знизити вплив невизначеності на якість систем керування, а також компенсувати брак апріорної інформації на етапі проектування систем [2]. У нечіткому керуванні кількість необхідних нечітких правил зростає експоненційно, і це явище відоме як прокляття розмірності або проблема вибуху комбінаторного правила. Тоді стає необхідним скорочення бази правил. Вважається, що кількість правил повинно бути зменшено так, що залишається лише мінімально необхідна кількість правил, які ще містять істотну інформацію щодо оригінальної бази. Хоча для цієї мети використовується кілька технік [3], таких як: булевий метод, нейронні мережі, метод розв'язки та методи кластеризації, але жодна з них не є повністю задовільною. Це завдання можна вирішити за допомогою нового методу синтезу нечіткого керування.

### Аналіз літератури та огляд існуючих рішень.

Розробка системи керування включає в себе багато питань, таких як стабільність системи, якість перехідного та сталого стану тощо. Кожна проблема значною мірою залежить від структури та параметрів системи керування.

Крім того, під час проектування необхідно переконатися, що конфлікти між критеріями якості

адекватно вирішені [4]. Відсутність систематичних методів вибору значень для багатьох параметрів регулятора є основною перешкодою для задоволення вимог керування.

Щоб вирішити ці проблеми за допомогою генетичних алгоритмів, кодують структуру та параметри контролера в хромосомну послідовність і визначають функцію відповідності як функцію вимог до якості [5].

Відповідно задачу проектування можна перетворити на задачу мінімізації цільової функції за параметрами регулятора [6].

Оскільки генетичні алгоритми використовують лише функцію відповідності в процесі оптимізації, вони можуть виконувати цей пошук. Інноваційне поєднання існуючих методів керування з генетичними алгоритмами може створити потужний інструмент для вирішення реальних проблем керування, як показано у [7–11].

Генетичний алгоритм (ГА) є предметно незалежним інструментом глобальної оптимізації, ефективність якого добре відома і для вирішення завдань параметричного налаштування нейронних мереж (НМ).

Використання ГА при синтезі нейронного регулятора (НР) передбачає, що кожному варіанту параметрів НР відповідає своя хромосома. Для оцінки відносної придатності  $i$ -ї хромосоми необхідно знати, який перехідний процес  $X_i(t)$  їй відповідає. При звичайному розмірі популяції в сотні і тисячі хромосом потрібна дуже велика кількість експериментів, що робить необхідним використання імітаційної моделі об'єкта. При цьому виникає дві задачі:

1) імітаційна модель має бути досить швидкою, інакше брак обчислювальних ресурсів дискредитує використання ГА;

2) при розрахунку відносної придатності хромосом слід враховувати неминучу неповну невідповідність імітаційної моделі та об'єкта.

Такі задачі взаємопов'язані, тому що, чим точніше опис об'єкта, тим менша швидкодія моделі і навпаки. Проблема неповної відповідності об'єкта та моделі виникатиме, природно, і при керуванні в реальному масштабі часу.

Засновник теорії нечітких множин Л. Заде, підкреслював, що вимоги до точності опису об'єкта керування можуть бути знижені за рахунок підвищення інтелектуальності системи керування. Нечіткі регулятори є прикладом такого підходу. Однак генетичне навчання класичних нечітких регуляторів пов'язане з деякими проблемами, яких немає при навчанні НР.

Враховуючи зроблені зауваження, цілком природним є перехід від НР до нейро-нечіткого регулятора (ННР).

У ННР один нейрон використовується для подання одного нечіткого правила. Якщо використовувати для представлення термів функцію Гауса, то правило можна подати як нейрон з  $n$  входами. НМ для реалізації ННР має бути двошаровою, завдання другого шару полягає у виконанні функції дефаззифікації – обчислення спільної дії всіх правил.

Основна перевага використання ННР по відношенню до НР полягає в тому, що ННР зберігає такі корисні властивості нечіткого регулятора як природну адаптивність і слабку чутливість до перешкод.

**Метою статті** є розгляд методу розробки нейро-нечіткого регулятора з налаштуванням його параметрів за допомогою ГА.

### **Алгоритм синтезу математичної моделі нейро-нечіткого регулятора з налаштуванням генетичного алгоритму**

*Крок 1.* Побудова математичної моделі об'єкта керування та вирішення задачі синтезу регулятора класичним методом. Попередньо необхідно вибрати структуру регулятора (П-, ПІ-, ПІД-регулятори та ін.), а далі розрахувати чи підібрати його коефіцієнти.

*Крок 2.* Проведення тестування побудованої системи (крок 1) у діапазоні можливих режимів роботи та підтвердження стійкості. Отримання навчальної вибірки виконання процедури синтезу нечіткого регулятора.

*Крок 3.* Ухвалення рішення про структуру нечіткого регулятора (у найпростішому випадку це буде структура один вхід – один вихід). Здійснення вибору лінгвістичного опису для вхідного

(вхідних) та вихідний змінних нечіткого регулятора (фаззифікація [3]). У блоці «фаззифікація» міститься нечіткий опис вхідного та вихідного параметра у вигляді терм-множини лінгвістичних змінних. Кількість термів визначається експертом виходячи з особливостей розв'язання задачі.

*Крок 4.* На підставі даних навчальної вибірки складаються схеми логічних висновків у нечіткій базі правил відповідно до лінгвістичного опису на кроці 3.

*Крок 5.* Вибір виду дефаззифікації результату

нечіткого висновку. Найбільш часто

використовується метод центру тяжкості [3].

*Крок 6.* Проведення тестування системи з НР. Надається висновок про стійкість.

*Крок 7.* Розробка ГА для налаштування параметрів нечіткого регулятора у рамках стандартного процесу отримання оптимального рішення [3]:

- 1) формування початкової популяції;
- 2) поява поточної популяції;
- 3) робота генетичних операторів;
- 4) поява нових хромосом (перехід до кроку 2);
- 5) перевірка умови зупинки;
- 6) зупинка еволюції;
- 7) оптимальне рішення.

Формування початкової популяції виконується на кроці 3 – межі термів вхідних та вихідних змінних.

*Крок 8.* Проведення тестування ГА налаштування параметрів нечіткого регулятора (кордонів термів). Для цього вибирається тестове керування  $u(t)$  на вході системи та виконується налаштування параметрів НР відповідно до встановлених на кроці 6 значень меж у заданих діапазонах їх варіацій. Результат тестування має показати коректність роботи ГА, тобто послідовне наближення до раціонального рішення - набору параметрів НР.

*Крок 9.* Налаштування параметрів нечіткого регулятора за допомогою ГА для заданого виду вхідної дії  $u(t)$ .

*Крок 10.* Введення в нечіткий регулятор одного формального нейрона, що дозволяє при побудові результату результуючого задавати вагу кожного правила. Внаслідок цього з'являється структура нейро-нечіткого регулятора.

*Крок 11.* Тестування нейро-нечіткого регулятора при одиничних вагах правил. Якщо результати тестування збігаються з результатом кроку 9, то підбираються в інтервалі від 0 до 1 таким чином, щоб за критерієм (2) результат роботи системи керування для заданого виду вхідного впливу  $u(t)$  виявився кращим, ніж на кроці 9, або робиться висновок про неможливість подальшого покращення якості роботи системи керування.

### **Розв'язання задачі синтезу математичної моделі нейро-нечіткого регулятора з налаштуванням генетичного алгоритму**

В процесі визначення оптимальних параметрів і структури нечіткого регулятора, що забезпечує мінімальне значення критерію якості, проаналізована схема найпоширенішого нечіткого дискретного регулятора, в якому є два входи (рис. 1): помилка керування  $e(k)$  та її зміна

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

або швидкість

$$\dot{\Delta} e(k) = \Delta e(k) / \Delta t$$

та один вихід  $u(k)$  – керування в моменти часу

$$k\Delta t, k = 1, 2, \dots, N,$$

де  $\Delta t$  – шаг дискретизації.

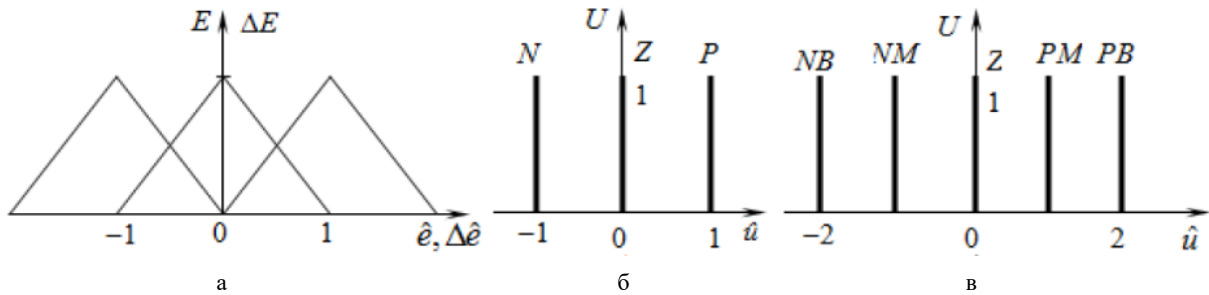


Рис. 1. Трикутна (а) і синглетонові (б), (в) функції приналежності

Дійсні значення входів  $e, \Delta e$  за допомогою коефіцієнтів  $K_e, K_{\Delta e}$ , перетворюються в нормалізовані  $\hat{e}, \Delta \hat{e} \in [-1, 1]$ . Центральним елементом нечіткого

регулятора (рис. 2) є нечіткий оператор  $\tilde{f}_{\text{пд}}$ , що виконує операції фаззифікації, нечіткого виводу і дефаззифікація містить базу правил (1) або (2).

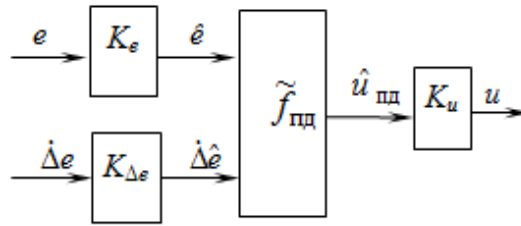


Рис. 2. Схема нечіткого ПД - регулятора

Коефіцієнти  $K_e, K_{\Delta e}$  і  $K_u$  нечіткого ПД-регулятора не можуть бути однозначно визначені. Отже, для нечіткого ПД-регулятора потрібно вирішувати задачу оптимізації, а саме завдання вибору значень зазначених коефіцієнтів, що мінімізують критерій якості перехідного процесу при виконанні обмежень.

При визначенні оптимальних параметрів і структури нечіткого ПД-регулятора знаходяться параметри лінійного ПД-регулятора, наступним кроком є приведення нечіткого ПД-регулятора до лінійного та визначення його коефіцієнтів.

У процесах моделювання та оптимізації використані два типи нечітких регуляторів.

Нечіткий регулятор ПД2 піддається оптимізації в тому випадку, коли оптимізація нечіткого регулятора ПД1 не забезпечує необхідної якості перехідного процесу.

Нечіткий оператор містить 4 або 9 правил, отриманих при заміні  $\Delta \hat{u}_{\text{пд}}$  на  $\hat{u}_{\text{пд}}$ :

- $R_{\text{пд}}^1$ : якщо  $\hat{e} \in N, \Delta \hat{e} \in N$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in N$ ;
- $R_{\text{пд}}^2$ : якщо  $\hat{e} \in N, \Delta \hat{e} \in P$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in Z$ ;
- $R_{\text{пд}}^3$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in N$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in Z$ ;
- $R_{\text{пд}}^4$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in P$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in P$ ;
- $R_{\text{пд}}^5$ : якщо  $\hat{e} \in N, \Delta \hat{e} \in N$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in NB$ ;
- $R_{\text{пд}}^6$ : якщо  $\hat{e} \in N, \Delta \hat{e} \in Z$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in NM$ ;
- $R_{\text{пд}}^7$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in P$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in ZE$ ;
- $R_{\text{пд}}^8$ : якщо  $\hat{e} \in Z, \Delta \hat{e} \in N$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in NM$ ;
- $R_{\text{пд}}^9$ : якщо  $\hat{e} \in Z, \Delta \hat{e} \in Z$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in ZE$ ;
- $R_{\text{пд}}^{10}$ : якщо  $\hat{e} \in Z, \Delta \hat{e} \in P$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in PM$ ;
- $R_{\text{пд}}^{11}$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in N$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in ZE$ ;
- $R_{\text{пд}}^{12}$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in Z$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in PM$ ;
- $R_{\text{пд}}^{13}$ : якщо  $\hat{e} \in P, \Delta \hat{e} \in P$ , тоді  $\hat{u}_{\text{пд}} \in PB$ .

База правил, що надана в (1) та (2), має такі позначення:

- N - негативне,
- Z - нульове,
- P - позитивне,
- NB - велике негативне,
- NM - середнє негативне,
- ZE - близьке до нульового,
- PM - середнє позитивне,
- PB - велике позитивне.

При оптимізації коефіцієнтів нечіткого ПД1-регулятора середня-модульна помилка не ставала нижче 28.4%.

Для її зниження було побудовано модель з нечітким ПД2-регулятором за правилами (2).

У ході моделювання системи керування найкраща реакція на одиничний стрибок була отримана при

$$K_e = 0,8, K_{\Delta e} = 1,784, K_u = 1,576,$$

зі середньо-модульною помилкою 14,2%.

На останньому кроці алгоритму система нечіткого керування представляється у формі багатошарової нейронної мережі з чотирма шарами.

Кількість елементів першого шару визначається кількістю входних елементів і правил і дорівнює добутку кількості входних змінних на кількість нечітких правил.

К онфігурація зв'язків другого шару відповідає основі правил, а мультиплікатори – блоку виведення.

Третій та четвертий шари являють собою реалізацію блоку дефаззифікації у термінах нечіткого керування.

Отримана схема є багатошаровою мережею, що заснована на нечіткому виведенні. Тому її можна



навчати так само, як і звичайну нейронну мережу, якщо використовувати узагальнений алгоритм зворотного розповсюдження помилки [12]. Для цього необхідна навчальна вибірка у вигляді пар: вхідний вектор – еталонний вихідний сигнал, яка може бути отримана під час спостереження за реальною роботою системи.

### Висновки

Застосування генетичних алгоритмів у поєднанні з теорією нечітких множин та теорією нейронних мереж для систем керування показують перспективність такого підходу.

Імітаційне моделювання показало, що регулятор на основі нечіткої логіки має ряд переваг перед

класичними регуляторами, дозволяючи враховувати обмеження, що важко або неможливо формалізувати.

Використання конструкції системи нечіткого регулювання та нейро-мережевої моделі дозволяє додати такі властивості як, адаптивність та навчальність, що забезпечується за допомогою еволюційного підходу.

В умовах відсутності вихідних даних (без навчальної вибірки) розроблений генетичний алгоритм також зможе виконати своє завдання, тільки діапазони для значень меж термів потрібно задавати ширшими, без прив'язки до значень навчальної вибірки, а число кроків рахунку генетичного алгоритму збільшиться у сотні разів.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Siddique N.H. Computational intelligence: synergies of fuzzy logic, neural networks, and evolutionary computing / N. H. Siddique. – Chichester, West Sussex, United Kingdom: John Wiley & Sons Inc., 2013. – 517 p., ISBN: 9781118337844.
2. Hall, M.A. (2012) Cumulative multi-niching genetic algorithm for multimodal function optimization. *International Journal of Advanced Research in Artificial Intelligence*, vol. 1, no. 9, pp. 6–13. DOI: 10.14569/IJARAI.2012.010902.
3. Bounemour A., Chemachema M., Essounbouli N. New approach of robust DirectAdaptive Control of a class of SISO Nonlinear Systems, in 15th international conference on Sciences and Techniques of Automatic control & computer engineering - STA'2014, 2014: Hammamet, Tunisia. p.725-730. DOI: 10.1109/sta.2014.7086723.
4. Filasov' a A., Hladk' y V., Krokavec D. Nonlinear System  $H_{\infty}$  Fuzzy Control within Takagi-Sugeno Framework, in International Conference on Process Control (PC) June 18–21, 2013, Štrbské Pleso, Slovakia. 2013. p. 13-18. DOI:10.1109/pc.2013.6581375.
5. PhamThi Ly, Bui Quoc Khanh Using Genetic Algorithm to Optimize Controllers of Thermal Load System in Thermal Power Plant Published: April 26th, 2022. DOI: 10.5772/intechopen.103915.
6. Harpreet Singh, Madan M. Gupta, Thomas Meitzler, et al., —Real-Life Applications of Fuzzy Logic, *Advances in Fuzzy Systems*, vol. 2013, Article ID 581879, 3 pages, 2013. DOI: 10.1155/2013/581879.
7. Aceves-Lopes A. A simplified version of Mamdani's fuzzy controller: the natural logi controller. *IEEE Transactions on fuzzy systems*, 2006. 14(1): p. 16-30. DOI: 10.1109/TFUZZ.2005.861603.
8. Ion Iancu (2012). A Mamdani Type Fuzzy Logic Controller, *Fuzzy Logic - Controls, Concepts, Theories and Applications*, Prof. Elmer Dadios (Ed.), ISBN: 978-953-51-0396-7.
9. Oleksenko O., Khudov H., Petrenko K., Horobets Yu., KoliandaV, Kuchuk N., Konstantinov A., Kireienko V., Serdiuk O., Yuzova I. and Solomonenko Yu. (2021), “The Development of the Method of Radar Observation System Construction of the Airspace on the Basis of Genetic Algorithm”, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, Vol. 11, Is. 8, pp. 23-30, doi: [https://doi.org/10.46338/ijetae0821\\_04](https://doi.org/10.46338/ijetae0821_04).
10. B. Dun, O. Zakovorotnyi, and N. Kuchuk, “Generating currency exchange rate data based on Quant-Gan model”, *Advanced Information Systems*, vol. 7, no. 2, pp. 68–74, Jun. 2023. doi: 10.20998/2522-9052.2023.2.10.
11. Ковриго Ю.М. Fuzzy-регулятор для керування інерційними технологічними параметрами котлоагрегату ТЕС / Ю.М. Ковриго, О.С.Бунке, П.В. Новіков / *Nauka i Studia NR 8 (169) 2017 – с. 76-84.*
12. B. Kopychak, L. Kasha. Genetic algorithm application for synthesis and analysis of electromechanical systems. *Energy Eng. Control Syst.*, 2018, Vol. 4, No. 2, pp. 73 – 78. DOI: 10.23939/jeecs2018.02.073

Received (Надійшла) 26.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

### Synthesis of neuro-fuzzy regulator with adjustment by genetic algorithm

Natalia Yevsina, Petro Kachanov, Mykola Tarasenko

**Abstract.** The purpose of the article is to consider the method of developing a neuro-fuzzy regulator with the adjustment of its parameters by a genetic algorithm. The obtained results confirm the workability of the technique and allow us to conclude that the neuro-fuzzy regulator, with appropriate settings, ensures high quality of the control system, including in the presence of random disturbances to a dynamic object. The method of neuro-fuzzy regulator synthesis proposed in the article was tested under the conditions of a limited volume of initial data (the volume of the training sample), the size of which does not affect the quality of the algorithm. Two or three values of the sampling parameters are enough to form the ranges for the boundaries of the terms of the fuzzy variables, and then the optimal values are selected by genetic algorithm. **As a result**, an algorithm for the synthesis of the regulator and a genetic algorithm for adjusting its parameters were developed.

**Keywords:** fuzzy controller, membership function, defuzzification, neuro-fuzzy regulator, genetic algorithm.

М. Й. Заполовський, М. В. Мезенцев, О. І. Баленко, М. В. Оліфір

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ОПТИМІЗАЦІЙНА МОДЕЛЬ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ ДИЗЕЛЬ-ПОЇЗДА ТА ЇЇ ДОСЛІДЖЕННЯ

**Анотація.** Розглянуті підходи до побудови систем керування тяговим асинхронним електроприводом дизель-поїздів. Проведено аналіз математичних моделей та вибір методу синтезу управління системи керування електроприводом дизель-поїзда. В основу оптимізаційної математичної моделі електроприводу покладено алгоритм методу векторного керування. Математична модель електроприводу включає в себе модель тягового двигуна, яка представлена в двофазній ортогональній системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора та математичну модель руху дизель-поїзда. Для синтезу управління запропоновано використання методу варіаційного числення шляхом рішення загальної задачі Лагранжа. Для знаходження невизначених множників Лагранжа запропоновані методики подолання цього недоліку даного методу. Шляхом моделювання отримано види управління у вигляді аналітичних співвідношень як складових рішення диференціального рівняння - однорідного і вимушеного рішень. Проведено дослідження запропонованої моделі як з точки зору її адекватності, так і її можливості застосування для цілей синтезу управління. Результати досліджень надано у вигляді графіків процесів характерних фазових змінних та таблиць.

**Ключові слова:** система керування, асинхронний електропривод, дизель-поїзд, алгоритми векторного керування, математична модель, закони управління, синтез управління, методи оптимізації, задача Лагранжа, невизначені множники Лагранжа, дослідження.

### Вступ

Залізничний транспорт є одним із основних видів транспорту України. Його технічний рівень визначає економічну ефективність перевезень. Оновлення залізничного транспорту передбачає вирішення питань підвищення його надійності, економічності, ефективності і довговічності [1]. Основу локомотивів залізничного транспорту, в тому числі і дизель-поїздів, складає тяговий електропривод.

Як слідує із [2 – 7] перспективним видом тягового електроприводу залізничного транспорту, в тому числі дизель-поїздів, є електропривод змінного струму з використанням тягових асинхронних двигунів (ТАД) і системою векторного керування.

Особливе місце при створенні такого виду електроприводу належить питанням розроблення систем керування електроприводу дизель-поїзда та комплексним дослідженням їх ефективності з точки зору експлуатаційних затрат, особливо економії енергоресурсів та створенні систем керування (синтезу управління), які забезпечують цей процес. Синтез керувань, як правило, здійснюється на основі математичних моделей об'єкту, що досліджується, та відповідних методів оптимізації.

Для технологічних процесів, котрі потребують забезпечення високих динамічних показників якості в перехідних режимах та підтримання потрібної швидкості обертання ротора ТАД, а значить і швидкості руху дизель-поїзда, використовують векторну систему керування електроприводом.

Різні варіанти векторного керування застосовані на електровозах BR185.2 (Німеччина), AVE.S102 (Іспанія), Re484 (Швейцарія), TRAXX (Бельгія); тепловозах SD80MAC (США), Di6, ME10 (Німеччина), Dr16 (Фінляндія) та інших [1 – 5].

Основна ідея векторної системи керування асинхронним двигуном полягає в реалізації розділь-

ного керування потокозчепленням та електромагнітним моментом. Використаємо цю ідею і для синтезу системи керування електроприводом з асинхронним двигуном за умови оптимізації енергетичних витрат в процесі розгону дизель-поїзда, як об'єкта керування.

**Постановка задачі і аналіз відомих публікацій.** За умови, якщо об'єкт керування описується системою диференціальних рівнянь другого порядку, то для синтезу системи керування можливо застосувати методи варіаційного числення, зокрема рішення загальної задачі Лагранжа або принцип максимуму.

Для об'єктів керування більш високих порядків можливо використати, зокрема, метод аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи.

Однак, із аналізу методів варіаційного числення слідує, що при синтезі управління виникають питання щодо знаходження деяких функцій, які складають структуру допоміжного функціоналу. Це потребує розроблення підходів та моделей для їх визначення.

Із [6, 7] відомо, що при рішенні загальної задачі Лагранжа використовується допоміжний функціонал вигляду:

$$J = \int_{t_0}^T [G + \sum_{j=1}^n \lambda_j(t) \phi_j(t)] dt,$$

де  $G$  – функціонал, який мінімізується;  $\lambda_j(t)$  – невизначені множники Лагранжа;  $\phi_j(t)$  – диференціальні рівняння, що описують систему. Управління знаходяться шляхом рішення рівнянь Ейлера, використовуючи допоміжний функціонал.

В методі принципу максимуму допоміжний функціонал має вигляд:

$$H = \sum_{j=1}^n \Psi_j(t) f_j(x_j, U_j),$$

де  $\Psi_j(t)$  – допоміжна функція;  $f_j(x_j, U_j)$  – функції, що описують математичну модель системи;  $x_j$  – фазові координати;  $U_j$  – управління.

В загальному плані

$$\dot{x}_j = f_j(x_j, U_j).$$

Як при рішенні загальної задачі Лагранжа, так і при знаходженні управлінь за допомогою принципу максимуму, основні труднощі виникають для визначення  $\lambda_j(t)$  і  $\Psi_j(t)$ , які, як правило, знаходяться із рішення системи диференціальних рівнянь, де невідомим є початкові умови.

Ця проблема має місце і при рішенні задачі синтезу за допомогою методу аналітичного конструювання регуляторів за критерієм узагальненої роботи.

Питання визначення  $\lambda_j(t)$  при синтезі управлінь шляхом рішення загальної задачі Лагранжа знаходяться в сукупності з розробкою математичної моделі об'єкту керування.

Визначення поведінки  $\lambda_j(t)$  можливо через відомі значення управлінь. Як правило управління являються функціями від  $\lambda_j(t)$  та фазових координат, то можемо вирішити зворотню задачу знаходження поведінки  $\lambda_j(t)$  за допомогою моделювання через відомі функції управлінь.

**Метою роботи** є створення оптимізаційної моделі, що дозволить проводити розроблення системи керування електроприводу дизель-поїзда з використанням методу варіаційного числення шляхом рішення загальної задачі Лагранжа за умови забезпечення заданої якості керування в плані оптимізації енергетичних витрат в процесі його розгону до заданої швидкості за певний час (темпу розгону), а також проведення досліджень та отримання якісних характеристик роботи систем управління в процесі моделювання з використанням пакету MATLAB.

### Основна частина

Для розроблення оптимізаційної математичної моделі електроприводу дизель-поїзда використано алгоритм векторного управління асинхронним електроприводом з ТАД, математична модель якого представлена в синхронній системі координат. На відміну від законів формування управлінь – підтримки постійних (заданих) значень потоку і моменту ТАД, як це традиційно використовується в задачах проектування при застосуванні алгоритму векторного управління, в моделі, яка пропонується, знаходяться управління, які мінімізують енергетичні витрати.

Для дослідження синтезованої системи керування використовується математична модель ТАД в синхронній системі координат, яка реалізована заходами пакету MATLAB. Для розрахунку коефіціє-

нтів моделей використано наступні значення параметрів об'єкта керування (дизель-поїзда).

Складеність дизель-поїзда: головних вагонів – 2; причіпних вагонів – 1.

Діаметр колеса по крузі катання – 950 (мм).

Передатне відношення тягового редуктора ( $i$ ) – 3.69.

Маса порожнього спорядженого вагона: головного дизельного – 70130 кг; причіпного – 40000 кг.

Маса головного вантаженого вагона: при розрахунковому завантаженні – 76030 кг; при номінальному завантаженні – 80000 кг; при максимальному завантаженні – 82000 кг.

Маса причіпного вантаженого вагона: при розрахунковому завантаженні – 54250 кг; при номінальному завантаженні – 59530 кг; при максимальному завантаженні – 63520 кг.

Прискорення вантаженого дизель-поїзда (середнє до швидкості 25 км/год) – 0.5 м/с<sup>2</sup>.

Конструктивна швидкість – 130 км/год.

Параметри тягового електродвигуна АД-906У1:

– максимальна лінійна напруга – 1150 В;

– електромагнітний момент (максимальний) – 4800 Нм;

– фазний пусковий струм (по першій гармонійній), не більш 300 А;

– частота обертання ротора (максимальна) – 2800 хв<sup>-1</sup>;

Параметри схеми заміщення АД 906У1 при  $f_1=50$ , Гц;

– індуктивність розсіювання статора ( $L_{\sigma_s}$ ) – 1,611\*10<sup>-3</sup> Гн;

– індуктивність розсіювання ротора ( $L_{\sigma_r}$ ) – 1,099\*10<sup>-3</sup> Гн;

– активний опір обмотки статора – 0,0831 Ом;

– активний опір обмотки ротора – 0,0676 Ом;

– індуктивність контуру, що намагнічує ( $L_m$ ) – 0.9172\*10<sup>-3</sup> Гн.

Математична модель ТАД в синхронній системі координат представлена рівняннями електричних кіл статора і ротора в системі координат, що обертається з швидкістю  $\omega_s$  і приведена у вигляді системи диференціальних рівнянь (1):

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{d\Psi_{s1}}{dt} = U_{s1} - a_s \Psi_{s1} + a_s k_R \Psi_{r1} + \Psi_{s2} \omega_s, \\ \frac{d\Psi_{s2}}{dt} = U_{s2} - a_s \Psi_{s2} + a_s k_R \Psi_{r2} + \Psi_{s1} \omega_s, \\ \frac{d\Psi_{r1}}{dt} = -a_r \Psi_{r1} + a_r k_s \Psi_{s1} + (\omega_s - \omega) \Psi_{r2}, \\ \frac{d\Psi_{r2}}{dt} = -a_r \Psi_{r2} + a_r k_s \Psi_{s2} - (\omega_s - \omega) \Psi_{r1}, \\ M = \frac{3}{2} p \frac{k_R}{\sigma L_S} (\Psi_{r1} \Psi_{s2} - \Psi_{s1} \Psi_{r2}), \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J} (M - M_c). \end{array} \right. \quad (1)$$

Тут:  $\omega_s$  – кутова частота напруги живлення статора ТАД при  $p = 1$ ;  $\omega$  – кутова швидкість рото-

ра;  $\Psi_{i1}$ ,  $\Psi_{s2}$ ,  $\Psi_{r1}$ ,  $\Psi_{r2}$ ,  $U_{s1}$ ,  $U_{s2}$  – відповідно проекції векторів потоків статора і ротора та напруги живлення на осі координат;  $k_s$  і  $k_r$  – коефіцієнти електромагнітного зв'язку відповідно статора та ротора;

$$L_s = L_m + L_{\sigma s}, \quad L_r = L_m + L_{\sigma r}, \quad a_r = \frac{L_m}{L_s}, \quad k_s = \frac{L_m}{L_s},$$

$$k_r = \frac{L_m}{L_r}, \quad \sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}, \quad T_s = \frac{L_s}{r_1}, \quad T_r = \frac{L_r}{r_2}, \quad a_s = \frac{1}{\sigma T_s},$$

$$a_r = \frac{1}{\sigma T_r}; \quad L_r, L_m, L_s, r_1, r_2 - \text{параметри схеми}$$

заміщення ТАД;  $T_s$  і  $T_r$  – відповідно електромагнітна постійна часу статора та ротора;  $\delta$  – повний коефіцієнт розсіювання;  $p$  – постійний коефіцієнт ТАД (число пар полюсів);  $J$  – момент інерції. Чисельні значення параметрів схеми заміщення ТАД:  $L_s = 0,093331$ ;  $L_r = 0,092819$ ;  $k_r = 0,98816$ ;  $k_s = 0,98274$ ;  $T_s = 1,123117$ ;  $T_r = 1,3730621$ ;  $\delta = 0,028896$ ;  $a_s = 30,813233$ ;  $a_r = 25,204152$ .

Змінні по осям  $U_{s1}$  і  $U_{s2}$  визначаються рівняннями (для випадку синусоїдального вигляду напруги на статорі ТАД):

$$U_{s1} = U_M \cos[(\omega_s - \omega_K)t + \phi_K];$$

$$U_{s2} = U_M \sin[(\omega_s - \omega_K)t + \phi_K],$$

де  $U_M$  – амплітуда першої гармоніки фазної напруги на статорі ТАД;  $\omega_K$  – кутова швидкість обертання осей координат;  $\phi_K$  – початкова фаза напруги живлення.

У випадку синхронного обертання осей  $\omega_s = \omega_K$  і початкова фаза  $\phi_K = 0$ , то функції задання напруги – це постійне значення напруги живлення величиною  $U_M$  по осі  $S_1$  і нульове по осі  $S_2$ .

Систему рівнянь (1) можливо записати відносно проекцій векторів струмів, якщо врахувати, що:

$$I_{s1} = (a_s \Psi_{s1} - a_s k_R \Psi_{r1}) / R_S; \quad (2)$$

$$I_{s2} = (a_s \Psi_{s2} - a_s k_R \Psi_{r2}) / R_S; \quad (3)$$

$$I_{r1} = (a_r \Psi_{r1} + a_r k_s \Psi_{s1}) / R_R; \quad (4)$$

$$I_{r2} = (a_r \Psi_{r2} - a_r k_s \Psi_{s2}) / R_R. \quad (5)$$

Використовуючи рівняння (2) – (5), які описують проекції струмів через відповідні проекції потоків, систему рівнянь (1) можливо представити в наступному вигляді:

$$\frac{d\Psi_{s1}}{dt} = \Psi_{s2} \omega_k - R_S I_{s1} - U_{s1}; \quad (6)$$

$$\frac{d\Psi_{s2}}{dt} = -\Psi_{s1} \omega_k - R_S I_{s2} - U_{s2}; \quad (7)$$

$$\frac{d\Psi_{r1}}{dt} = (\omega_k - p\omega) \Psi_{r2} - R_R I_{r1}; \quad (8)$$

$$\frac{d\Psi_{r2}}{dt} = -(\omega_k - p\omega) \Psi_{r1} - R_R I_{r2}, \quad (9)$$

де  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$ ,  $I_{r1}$ ,  $I_{r2}$  – відповідно проекції векторів струмів обмоток статора і ротора;  $R_S$ ,  $R_R$  – активні опори обмоток статора і ротора.

Рівняння для електромагнітного моменту:

$$M = \frac{3}{2} p \frac{k_R}{\sigma L_S} (\Psi_{r1} \Psi_{s2} - \Psi_{s1} \Psi_{r2}). \quad (10)$$

Процес розроблення оптимізаційної моделі з використанням ідеї алгоритму векторного керування полягає в наступному. Якщо допустити, що швидкість обертання координат співпадає із швидкістю вектору потоку ротора  $\omega_k = \omega_\Psi$ , то вектор потоку  $\Psi_r$  буде на осі 1 (рівняння 8) своїм модулем  $\Psi_{rm}$ , а його проекція на вісь 2 (рівняння 5) дорівнює нулю, тобто вектор потокозчеплення ротора буде мати тільки дійсну складову.

Рівняння за умови, що  $\omega_k = \omega_\Psi$ , приймуть наступний вигляд:

$$\frac{d\Psi_{s1}}{dt} = \Psi_{s2} \omega_\Psi - R_S I_{s1} - U_{s1} \quad (11)$$

$$\frac{d\Psi_{s2}}{dt} = -\Psi_{s1} \omega_\Psi - R_S I_{s2} - U_{s2}; \quad (12)$$

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} = -R_R I_{r1}; \quad (13)$$

$$(\omega_\Psi - p\omega) \Psi_{rm} + R_R I_{r2} = 0; \quad (14)$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}. \quad (15)$$

Використовуючи рівняння зв'язку

$$\Psi_r = I_r L_r + I_s L_m; \quad \Psi_s = I_s L_s + I_r L_m, \quad (16)$$

отримаємо:

$$I_r = \frac{1}{L_r} \Psi_r - I_s \frac{L_m}{L_r};$$

$$\Psi_s = I_s L_s + \frac{L_m}{L_r} \Psi_r - I_s \frac{L_m^2}{L_r};$$

$$\Psi_s = I_s L_s' + K_r \Psi_r, \quad (17)$$

$$\text{де} \quad L_s' = L_s - \frac{L_m^2}{L_r}; \quad K_r = \frac{L_m}{L_r}.$$

З урахуванням формул (17) рівняння ТАД приймуть вигляд:

$$\frac{dI_{s1}}{dt} L_s' + K_r \frac{d\Psi_{r1}}{dt} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi + R_S I_{s1} + U_{s1} = 0; \quad (18)$$

$$\frac{dI_{s2}}{dt} L_s' + I_{s1} L_s' \omega_\Psi + K_r \Psi_{rm} + R_S I_{s2} + U_{s2} = 0; \quad (19)$$

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - I_{s1} \frac{L_m R_r}{L_r} = 0; \quad (20)$$

$$\beta \Psi_{rm} - \frac{R_r L_m}{L_r} I_{s2} = 0, \quad (21)$$

де

$$\beta = \omega_p - p\omega.$$

$$M_d = \frac{mpK_r}{2} \Psi_{rm} I_{s2}. \quad (22)$$

В результаті перетворень отримали систему рівнянь, що дозволяє формування електромагнітного моменту ТАД, який є визначальним в системі керування для приведення дизель-поїзда до його руху. Це сукупність рівнянь (20) – (22), яка визначає модуль потокозчеплення і електромагнітний момент, що залежать від управлінь, в якості яких є струми  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$  (проекції вектору струму статорної обмотки ТАД). Крім цього струми  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$  є визначальними для взаємного зв'язку з фазними напругами  $U_{s1}$  і  $U_{s2}$ . Таким чином отримали математичну модель електроприводу, яка дозволяє виділити управління (струми  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ ) – це рівняння (20) і (22) і окремо модель для формування напруги живлення ТАД в залежності від управлінь (рівняння (18) і (19)). В кінцевому випадку управління – це значення амплітуди і частоти напруги живлення ТАД. Частота напруги живлення визначається на основі рівняння (21) (визначається рівнянням (20) і струмом  $I_{s2}$ ) і швидкості обертання ротора.

В процесі синтезу управлінь розглядається задача мінімізації енергетичних витрат в процесі розгону дизель-поїзда до заданої швидкості. Для цього використано рівняння швидкості руху  $V$ .

За відсутності боксування швидкість руху пропорційна кутовій швидкості обертання ротора двигуна  $\omega$ . Рівняння руху має вигляд:

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{p}{J_T} (M_T - M_o), \quad (23)$$

де  $M_T$  – тяговий момент дизель-поїзда;  $J_T$  – момент інерції дизель-поїзда;  $M_o$  – момент опору руху;  $J_T = mR_k^2$ ;  $m$  – маса дизель-поїзда;  $R_k$  – радіус колеса.

Тяговий момент дизель-поїзда (утворюють чотири двигуни ТАД):

$$M_T = 4 * M_d * i,$$

де  $i$  – передавальне число редуктора.

Момент опору руху згідно правил тягових розрахунків:

$$M_o = R_K W_0 G_H = 9.8 R_K (1.1 + 0.12V) * m. \quad (24)$$

При розрахунковому завантаженні:

$$M_o = 1334.0 + 2.25 \omega. \quad (25)$$

Оскільки тяговий момент формується на виході редуктора, то і швидкість обертання ротора  $\omega_p$  в математичній моделі повинна враховуватися на виході редуктора в залежності від передавального числа редуктора.

У результаті рівняння руху має вигляд:

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_p}{dt} &= \frac{pi}{J_T} (4M_d i - 1334.3 - 2.25\omega_p) = \\ &= 0.0028M_d - 0.00043\omega_p - 0.254. \end{aligned} \quad (26)$$

На рис. 1 – рис. 4 приведені процеси, які характеризують адекватність моделі та динаміку розгону дизель-ПОЇЗДА в продовж часу ( $t = 60$  с) в процесі дослідження за умови використання математичної моделі ТАД в синхронній системі координат при відомому законі керування  $U/f = \text{const}$  і розрахунковій величині завантаження дизель-поїзда. При цьому фазний струм (рис.1) становив на рівні 250 (А), електромагнітний момент (рис. 2) – 2600 (Нм), ковзання частоти напруги живлення  $\beta$  (рис. 3) – 10 ( $\text{с}^{-1}$ ), модуль потокозчеплення (рис. 4) – 2.2 (В). В процесі розгону дизель-поїзда за час  $t = 60$  с при законі управління  $U/f = 14$  (В/Гц) досягнута швидкість руху  $V = 63$  (км/год) з прискоренням  $0.3$  ( $\text{м}/\text{с}^2$ ) і величина пройденого шляху становила 497 (м). Ці показники в повній мірі відповідають технічним розрахунковим характеристикам дизель-поїзда, що приведені раніше в даній роботі і дають можливість стверджувати про адекватність моделі і проведення з її допомогою дослідження управлінь в замкнутій системі керування електроприводу на основі ТАД.

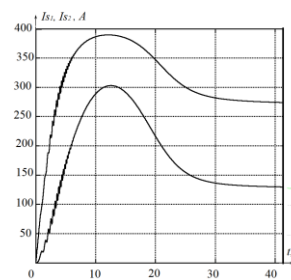


Рис. 1. Графік зміни фазного струму ТАД

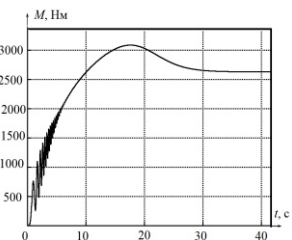


Рис. 2. Графік зміни моменту

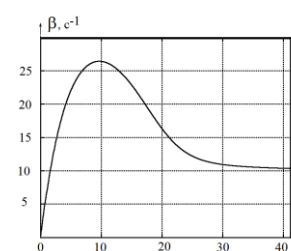


Рис. 3. Графік ковзання частоти напруги живлення

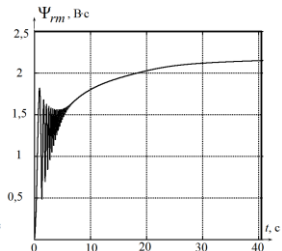


Рис. 4. Графік потокозчеплення

Наступним етапом розроблення оптимізаційної моделі системи керування – це синтез управлінь і їх дослідження. Як слідує із рівняння (26), визначальними змінними для оптимізації процесу розгону дизель-поїзда є електромагнітний момент ТАД, який описується рівнянням (22) та швидкістю обертання ротора (рівняння (26)). В свою чергу електромагнітний момент ТАД визначається через складову струму  $I_{s2}$  та модуль вектору потоку  $\Psi_{rm}$ , який

можемо вирахувати за допомогою рівняння (20) в залежності від складової струму  $I_{s1}$ . Тоді в якості управлінь  $U_1$  і  $U_2$  можемо вибрати складові струму  $I_{s1}$  та  $I_{s2}$ . Тобто  $U_1 = I_{s1}$ ;  $U_2 = I_{s2}$ . В результаті математична модель об'єкту управління має вигляд:

$$\frac{d\Psi_{rm}}{dt} + \frac{R_r}{L_r} \Psi_{rm} - U_1 \frac{L_m R_r}{L_r} = 0; \quad (27)$$

$$\frac{d\omega_p}{dt} + 0.00043 \omega_p + 0.254 - 0.0125 \Psi_{rm} U_2 = 0. \quad (28)$$

Із врахуванням значень електричних параметрів схеми заміщення ТАД математична модель електродвигуна представляється у вигляді:

$$\dot{X}_1 + a_1 X_1 - a_2 U_1 = 0; \quad (29)$$

$$\dot{X}_2 + a_3 X_2 + a_4 - a_5 X_1 U_2 = 0, \quad (30)$$

де  $\dot{X}_1 = \frac{d\Psi_{rm}}{dt}$ ;  $\dot{X}_2 = \frac{d\omega_p}{dt}$ ;  $X_1 = \Psi_{rm}$ ;  $X_2 = \omega_p$ ;

$$a_1 = \frac{R_r}{L_r}; \quad a_2 = \frac{L_m R_r}{L_r}.$$

З урахуванням параметрів схеми заміщення ТАД:

$$a_1 = 0.728; \quad a_2 = 0.067; \quad a_3 = 0.00043; \\ a_4 = 0.254; \quad a_5 = 0.0125.$$

Оскільки об'єкт керування описується системою нелінійних диференціальних рівнянь другого порядку, де фазовими координатами виступають модуль вектору потокозчеплення ротора тягового двигуна електроприводу та швидкість руху дизель-поїзда, то для знаходження управлінь  $U_1$  і  $U_2$  може бути застосовано метод варіаційного числення шляхом рішення загальної задачі Лагранжа.

Критерій якості (мінімізація енергетичних витрат), як того потребує метод оптимізації, задано у вигляді квадратичного функціоналу.

Фізично управління  $U_1$ ,  $U_2$  – це проекції  $I_{s1}$ ,  $I_{s2}$  вектору струму статорної обмотки двигуна на відповідні осі координат.

Функціонал, який мінімізує енергетичні витрати, задається у вигляді:

$$J = \int_{t_0}^T (U_1^2 + U_2^2) dt.$$

Допоміжний функціонал, що включає невизначені множники Лагранжа, записується як:

$$H = (U_1^2 + U_2^2) + \lambda_1 (\dot{X}_1 + a_1 X_1 - a_2 U_1) + \\ + \lambda_2 (\dot{X}_2 + a_3 X_2 + a_4 - a_5 X_1 U_2). \quad (31)$$

Використовуючи рівняння Ейлера, управління  $U_1$  і  $U_2$  знаходяться як:

$$U_1 = a_2 \lambda_1 / 2; \quad (32)$$

$$U_2 = a_5 \lambda_2 X_1 / 2, \quad (33)$$

де  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  – невизначені множники Лагранжа, які знаходяться із системи диференціальних рівнянь:

$$\dot{\lambda}_1 - a_1 \lambda_1 + (a_5 \lambda_2)^2 X_1 / 2 = 0; \quad (34)$$

$$\dot{\lambda}_2 - a_3 \lambda_2 = 0. \quad (35)$$

Аналіз можливого виду функції  $\lambda_1$  шляхом рішення рівняння (29) – це сукупність експоненціальних функцій зі своїми постійними інтегрування, які можливо визначити при заданих початкових умовах відповідного диференційного рівняння (в нашому випадку рівняння (29)) – як рішення однорідного рівняння і функції вимушеного рішення рівняння (29), яке визначається видом функції  $X_1$  (модулем потокозчеплення).

В результаті управління  $U_1$  будемо відшукувати в множині суми експоненціальних функцій (складових рішення однорідного рівняння) і складової вимушеного рішення – видом функції  $X_1$ .

Аналіз можливого виду функції  $\lambda_2$  шляхом рішення рівняння (30) – це сукупність експоненціальних функцій зі своїми постійними інтегрування, які знаходяться із початкових умов диференційного рівняння (30). Тут маємо тільки складову рішення однорідного рівняння (30).

В результаті управління  $U_2$  будемо відшукувати в множині добутку експоненціальних функцій (складових рішення однорідного рівняння) і функції  $X_1$ .

Таким чином управління  $U_1$  і  $U_2$  мають аналогічну структуру. Загальний вид управлінь – це сукупність експоненціальних функцій, які визначаються шляхом рішення відповідного однорідного рівняння, що дає змогу визначити час дії цієї складової, і складової функції  $X_1$ . Це надає нам підстави задати загальну структуру (вигляд) управлінь, не визначаючи шляхом рішення диференціальних рівнянь (29) і (30) функцій  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ .

Для вирішення задачі знаходження управлінь пропонується наступний підхід.

Використовуючи математичну модель ТАД, наприклад, в синхронній системі координат, можливо визначити поведінку проекції модуля вектору струму статорної обмотки двигуна згідно відомого закону керування.

Для апробації даного підходу використано закон керування  $U/f = \text{const}$  при певному темпі розгону (набору частоти напруги живлення ТАД).

Так, при дослідженні за умови, що  $U/f = 15$  В/Гц при темпі набору частоти 1,1 Гц/с, проекції вектору струму на осі координат мають вид, який приведено на рис. 1.

Цей перехідний процес, для кожного із струмів, можливо представити шляхом рішення диференціального рівняння другого порядку:

$$\ddot{y} + b\dot{y} + cy = A,$$

де  $b$ ,  $c$ ,  $A$  – постійні коефіцієнти.

Результати рішення цього рівняння можливо використовувати як вигляди управлінь  $U_1$  і  $U_2$  в залежності від коефіцієнтів  $b$ ,  $c$  і функції  $A$ .

За умови, що

$$y_1 = I_{s1}, \quad y_2 = I_{s2},$$

отримаємо рішення на основі рівнянь:

$$\ddot{y}_1 + b_1 \dot{y}_1 + c_1 y_1 = A_1; \quad (36)$$

$$\ddot{y}_2 + b_2 \dot{y}_2 + c_2 y_2 = A_2. \quad (37)$$

Рішення диференціального рівняння (36):

$$y_1(t) = C_1 e^{k_1 t} + C_2 e^{k_2 t} + y_B,$$

де  $y_B$  – вимушена складова рішення диференціального рівняння. В даному випадку вимушена складова знаходиться як (при  $A = \text{const}$ ):

$$y_B = A_1 / c_1.$$

В результаті рішення рівнянь (36) і (37) має вигляд:

$$y_1(t) = e^{-b_3 t} (C_1 e^{-j b_4 t} + C_2 e^{j b_4 t}) + b_5;$$

$$y_2(t) = e^{-b_3 t} (C_1 e^{-j b_4 t} + C_2 e^{j b_4 t}) + b_6,$$

де  $b_3 = b_1 / 2$ ;  $b_4 = \sqrt{(b_3^2 - 4c)}$ ;  $b_5 = A_1 / c_1$ ;

$$b_6 = A_2 / c_2; \quad b_1 = b_2 = 0.5.$$

В процесі дослідження отримано:  $b_1 = b_2 = 0.5$ ,  $c_1 = c_2 = 0.2$ ;  $c_1, c_2$  – постійні інтегрування, які визначають характер складової рішення однорідного рівняння.

Складові  $b_5$  і  $b_6$  визначають вимушене рішення. За допомогою цих складових задається амплітудне значення управлінь.

В загальному вигляді рішення рівняння (36) визначається як:

$$y_1(t) = b_5 (e^{-b_3 t} \sin(b_4 t) + 1). \quad (38)$$

Аналогічно і для (37).

На рис. 5 і рис. 6 приведено графіки реалізації функції відповідно до рівняння (38) для різних значень складових диференціальних рівнянь (36) і (37).

На рис. 5:

$$y = ((\sin((2 * \pi * t / T_1))) * (D_1 * \exp(-0.25 * t))) + D_2;$$

$$D_1 = D_2 = 100; \quad T_1 = 40.$$

На рис. 6:

$$y = ((\sin((2 * \pi * t / T_1))) * (D_1 * \exp(-0.25 * t))) + D_2;$$

$$D_1 = 300; \quad D_2 = 100; \quad T_1 = 40.$$

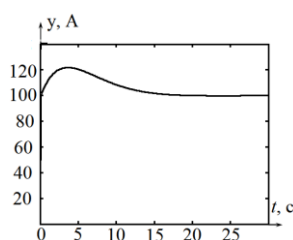


Рис. 5. Графік функції  $y(t)$  варіант 1

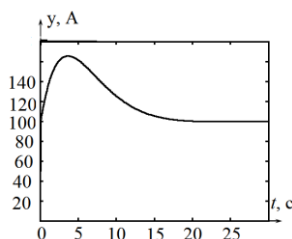


Рис. 6. Графік функції  $y(t)$  варіант 2

Значення  $T_1$  визначає період гармонічної функції складової рішення однорідного диференціального рівняння.

Значення  $D_1$  і  $D_2$  визначають вимушені складові рішення диференціальних рівнянь (36), (37) і знаходяться в процесі моделювання за ознакою мінімізації вибраного критерію оптимізації (в нашому випадку мінімізації енергетичних витрат).

Таке представлення управлінь  $U_1$  і  $U_2$  дає можливість проведення оцінки впливу параметрів складових керувань на хід процесу розгону дизель-поїзда.

Оскільки згідно рівняння (38) форма завдання управлінь визначається сумою складових однорідного і вимушеного рішень диференціального рівняння, то результат рішення можливо представити у вигляді:

$$y(t) = B_1 e^{-bt} \sin(\omega t) + B_2 \quad (39)$$

де  $B_1$ ,  $B_2$ ,  $b$  – константи.

При цьому за допомогою  $B_1$  можливо задавати амплітудне значення завдання управління,  $B_2$  – значення вимушеної складової,  $b$  – швидкість затухання (визначається з рішення диференціального рівняння).

Крім того при дослідженні можливо задавати і час перехідного процесу однорідної складової, який визначається частотою  $\omega$  (формула (39)). При програмній реалізації виду сигналу завдання – це представлення однорідної складової як:

$$x = \sin(2\pi / T t),$$

де  $T$  – величина можливого періоду протікання перехідного процесу відповідно до складової рішення однорідного рівняння (30).

В нашому випадку при дослідженнях було  $T = 40$  с.

При дослідженні системи керування управління  $U_1$  і  $U_2$  формувались шляхом рішення диференціальних рівнянь (31) і (32).

Знаходження  $\lambda_1$ ,  $\lambda_2$  можливо також і через відомі значення законів управлінь, оскільки закони зміни струмів (управлінь) відповідають і законам зміни множників Лагранжа за умови постійного значення модуля потокозчеплення ротора.

Це дає змогу при такому представленні виділити складові рішення диференціального рівняння (однорідного і вимушеного), а значить і початкові умови для системи диференціальних рівнянь, які описують динаміку поведінки невизначених множників Лагранжа  $\lambda_1$  і  $\lambda_2$ .

З іншої сторони закони управління  $U_1$  і  $U_2$  – це проєкції  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$  модуля вектору струму на осі координат, використання яких дозволяє визначенню складових модуля вектору напруги живлення  $U_{s1}$  і  $U_{s2}$  згідно рівнянь (18) і (19). Використання рівняння (21) дає змогу визначити частоту напруги живлення ТАД.



Таким чином, використовуючи можливі зміни проекцій модуля вектору струму згідно рівнянь (31), (32), знаходимо складові модуля вектору напруги живлення ТАД.

Управління, з регулюванням напруги живлення, вимагає формування ортогональних складових вектору напруги ( $U_M$  – амплітуда першої гармоніки фазної напруги на статорі ТАД) відповідно до моделі згідно диференційних рівнянь (11) і (12) та її частоти.

Формування складових вектору напруги живлення ТАД виконується з використанням формул (18), (19) за умови стабілізації потоку:

$$U_{s1} = R_s I_{s1} - I_{s2} L_s' \omega_\Psi; \quad (40)$$

$$U_{s2} = R_s I_{s2} + \omega_s \Psi_{rm} \left( \frac{L_s'}{L_m} + K_r \right). \quad (41)$$

Формування частоти  $\omega_s$  – з (21):

$$\omega_s = A_3 (\beta + p\omega), \quad (42)$$

де  $\beta = \frac{R_r L_m}{L_r \Psi_{rm}} I_{s2}$ ,  $A_3$  – коефіцієнт, за допомогою якого при моделюванні можливо задавати темп набору частоти живлення ТАД.

Сформовані значення частоти напруги живлення і модуль вектору напруги живлення ТАД використовуються як вхідні функції управлінь в математичній моделі електроприводу дизель-поїзда на основі рівнянь (2) – (6), (21).

Адекватність комп'ютерних моделей на основі системи рівнянь (2) – (6) та математичної моделі з використанням алгоритму векторного керування рівнянь (18) – (22) підтверджується результатами моделювання при використанні закону управління  $U/f = \text{const}$  та порівнянні значень характерних змінних (швидкості, прискорення, тягового моменту, фазних струмів та ін.) з розрахунковими при певному завантаженні дизель-поїзда.

Крім того на рис. 7 приведено у вигляді графіків характер процесів зміни електромагнітного моменту  $M_d$ .

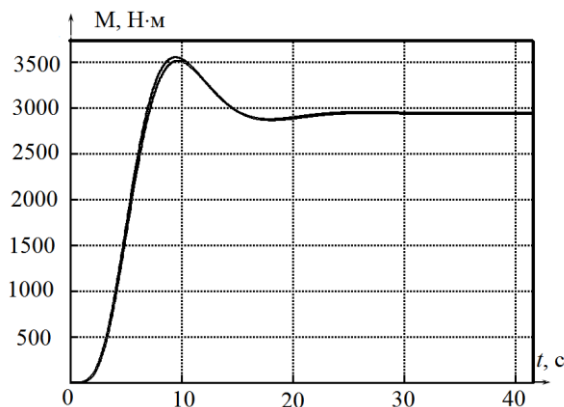


Рис. 7. Графік зміни електромагнітного моменту при дослідженні за допомогою математичних моделей в синхронній системі координат і використанні алгоритму векторного керування

Характер процесів зміни електромагнітного моменту  $M_d$  (являється узагальненою характеристикою), формується на основі співвідношення (6) повної (основної) моделі ТАД і співвідношення (18) математичної моделі на основі алгоритму векторного керування.

Графіки практично співпадають, що дає можливість судити про адекватність моделей.

В процесі досліджень характер протікання процесів визначались відповідно до технічних умов за можливою величиною прискорення під час розгону (максимальне прискорення до швидкості 25 км/год становить  $0.5 \text{ м/с}^2$ ). При цьому час розгону  $t = 60 \text{ с}$  і кінцева швидкість дизель-поїзда  $V = 60 \text{ км/год}$ .

В табл. 1 і 2 приведено значення вимушених складових задання управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$  згідно виразів (31) і (32), які використані в процесі досліджень.

При цьому  $T1 = 40$ .

В табл. 2 приведено результати досліджень системи керування за умови використання відповідних управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$  в процесі розгону дизель-поїзда в продовж часу, рівному 60 с. Швидкість при цьому не обмежувалась. Порівняння результатів ефективності закону управління оцінювалась значенням величини затраченої енергії на один метр пройденого шляху (P/S). Крім оцінювались отримані значення характерних змінних моделі (швидкість (V), модуль вектору потоку ( $\Psi_{rm}$ ), ковзання ( $\beta$ ), струми ( $I_{s1}, I_{s2}$ ), електромагнітний момент ( $M_d$ ), отриманий закон керування (U/f). Згідно такої оцінки (величини затраченої енергії на один метр пройденого шляху) оптимальним варіантом є закон керування (згідно завдання 7), де  $I_{s1} = 20 \text{ А}$ ,  $I_{s2} = 210 \text{ А}$ . При цьому закон керування в кінцевий момент часу  $U/f = 14 \text{ (В/Гц)}$ , що не заперечує з відомими результатами натурних досліджень реального об'єкту керування.

В табл. 3 і 4 приведено результати аналогічних досліджень за умови задання управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ , які забезпечують розгін дизель-поїзда до швидкості  $V = 60 \text{ км/год}$  та врахування можливого амплітудного значення напруги живлення ТАД.

Згідно технічних умов на ТАД, лінійна напруга живлення  $U_l$  становить 1150 В. Амплітудне значення фазної напруги  $U_f$  буде становити 940 В, що досягається в кінцевий момент часу ( $t = 60 \text{ с}$ ). Значення величини цієї напруги в табл. 4 відповідає варіанту «б» завдання управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ . При цьому на моделі отримано значення характерних процесів розгону (їх значення, які установились):

- швидкість дизель-поїзда – 60 км/год;
- пройдений шлях – 467 м.;
- модуль вектору потоку – 2.2 (В);
- проекції модуля вектору току статора на відповідні осі координат – 124 А і 268 А;
- електромагнітний момент ТАД – 2621 Н·м;
- використана потужність –  $0.778 \cdot 10^7 \text{ (Вт)}$ ;
- закон розгону  $U/f = 14$ .

Таблиця 1 – Варіанти завдання управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ 

Управління	1	2	3	4	5	6	7
$I_{s1}$ (А)	20.0	19.0	20.0	21.0	22.0	22.0	20.0
$I_{s2}$ (А)	220.0	220.0	230.0	220.0	220.0	230.0	210.0

Таблиця 2 – Результати досліджень (темп набору частоти напруги живлення ТАД:  $A_3 = 1$ )

№ п/п	V, км/год	S, м	$\Psi_{rm}$ , В	$\beta$ , с <sup>-1</sup>	$I_{s1}$ , А	$I_{s2}$ , А	$M_d$ , Нм	P, Вт·с*10 <sup>7</sup>	P/S * 10 <sup>3</sup>
1	66.1	513.7	2.36	9.08	120.0	272.5	2883.0	0.919	17.87
2	62.0	481.8	2.25	9.51	121.8	268.6	2706.0	0.820	17.23
3	68.5	533.2	2.37	9.45	127.4	281.5	2982.0	0.991	18.58
4	70.3	545.9	2.48	8.70	118.9	276.0	3060.0	1.028	18.83
5	74.5	578.4	2.59	8.35	117.7	279.2	3240.0	1.135	19.60
6	77.3	600.3	2.59	8.70	124.5	288.7	3355.0	1.225	20.40
7	63.6	493.9	2.36	8.71	113.2	263.3	2780.0	0.848	17.15

Таблиця 3 – Варіанти завдання управлінь  $I_{s1}$  і  $I_{s2}$ 

Управління	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$I_{s1}$ (А)	18.0	19.0	20.0	21.0	22.0	23.0	24.0	25.0	26.0	30.0
$I_{s2}$ (А)	420	380	348	321	298	278	261	244	231	186

Таблиця 4 – Результати досліджень (V = 60 км/год)

№ п/п	V, км/год	S, м	$\Psi_{rm}$ , В	$\beta$ , с <sup>-1</sup>	$I_{s1}$ , А	$I_{s2}$ , А	$M_d$ , Н·м	P, Вт·с*10 <sup>7</sup>	U/f, В/Гц
1	60.09	474.0	1.83	18.14	235.5	319.0	2570	0.948	11.90
2	60.06	471.9	1.88	15.09	202.8	309.3	2582	0.892	12.25
3	60.1	470.7	1.95	13.79	177.1	300.0	2598	0.853	12.65
4	60.1	469.5	2.02	12.24	156.0	289.0	2608	0.823	13.10
5	69.01	467.7	2.1	10.94	138.0	278.5	2615	0.797	13.57
6	59.99	466.7	2.19	9.87	124.5	268.5	2621	0.778	14.07
7	60.08	466.6	2.26	8.98	113.5	259.2	2631	0.766	14.58
8	59.99	465.3	2.35	8.20	103.7	250.0	2632	0.751	15.1
9	60.1	465.6	2.44	7.54	96.0	241.7	2641	0.744	15.64
10	58.5	461.7	2.50	5.10	65.0	184.2	2000	0.699	15.0

В процесі досліджень за умови мінімізації енергетичних витрат визначаємо закон керування у вигляді

$$U/f = \text{var}$$

на періоду дії складової рішення однорідного рівняння  $Y_0$ , де

$$Y_0 = \sin(2 \cdot \pi \cdot t / T_1) \cdot (D_1 \cdot \exp(-0.25 \cdot t));$$

$$U/f = \text{const} -$$

в подальшому в процесі розгону, що визначається вимушеною складовою.

## Висновки

1. Розглянуті підходи до побудови систем керування тяговим асинхронним електроприводом дизель-поїздів.

Проведений аналіз методів використання систем керування електроприводом з точки зору їх ефективності. Встановлено, що в зв'язку з тим, що найбільш оптимальною з точки зору забезпечення динамічних показників та швидкодії є векторна система керування, то алгоритм методу векторного керування може бути покладено в основу розробки

оптимізаційної математичної моделі електроприводу дизель-поїзда.

2. Проведено аналіз математичних моделей електроприводу з ТАД та розроблення математичної моделі системи управління тяговим електроприводом з векторним керуванням. Отримано математичну модель руху дизель-поїзда за умови ступеня завантаженості в процесі його розгону до заданої швидкості, яку можливо використати для здійснення синтезу управління системи керування.

3. Наведена система диференціальних рівнянь, яка включає в себе математичну модель ТАД в двофазній ортогональній системі координат, орієнтованій за вектором потокозчеплення ротора, та математичну модель руху дизель-поїзда, які надають математичний опис, необхідний для виконання синтезу управління електроприводу змінного струму з використанням сучасних методів оптимізації.

4. Виходячи із структури математичної моделі системи керування для синтезу управління запропоновано використання методу варіаційного числення шляхом рішення загальної задачі Лагранжа. В якості функціонала, що оптимізується, розглядається квадратичний функціонал, який задовольняє вимоги мінімізації енергетичних витрат в процесі розгону дизель-поїзда.

5. У зв'язку з тим, що синтез управлінь за допомогою рішення загальної задачі Лагранжа передбачає знаходження невизначених множників Лагранжа (в загальному плані часових функцій) на основі рішення систем диференціальних рівнянь, в яких невідомі початкові умови, запропоновані методики подолання цього недоліку даного методу.

6. Шляхом моделювання отримано види управління за умови використання відомого закону керування  $U/f = \text{const}$ , що дало змогу знайти аналітичні співвідношення у вигляді типових складових рішення диференціального рівняння, як рішення однорідного і вимушеного рівнянь і, використовуючи змінні (параметри) співвідношень, знаходити управління шляхом моделювання, які задовольняють вимогам мінімізації енергетичних витрат.

7. Проведено дослідження запропонованої моделі як з точки зору її адекватності, так і її можливості застосування для цілей синтезу управління, що забезпечують мінімізацію енергетичних витрат. Результати досліджень надано у вигляді графіків процесів характерних фазових змінних та таблиць, в яких наведені числові значення характерних змінних системи керування в залежності від структури сигналів управління.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басов, Г.Г. Развитие электричного моторвагонного рухомого складу. Ч.2. / Г.Г. Басов, С.І. Яцько. – Харків: «Апекс+», 2005. – 248 с.
2. Blaschke, F. The principle of field orientation as applied to the new transvector closed loop control system for rotating field machines / F. Blaschke // Siemens Review. – 1972. – Vol. 34. – P. 217-220.
3. Yatsko, S. Comprehensive approach to modeling dynamic processes in the system of underground rail electric traction / S. Yatsko, B. Sytnik, Y. Vashchenko, A. Sidorenko, B. Liubarskyi, I. Veretennikov, M. Glebova // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2019. – № 1/9 (97). – P. 48-57.
4. Толочко, О.І. Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу: навчальний посібник / О.І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с.
5. Шеремет О. І. Синтез автоматизованих електромеханічних систем на базі дискретного часового еквайзера / О. І. Шеремет // Вісник національного технічного університету «ХПІ». Збірник наукових праць. Серія: Проблеми автоматизованого електроприводу. Теорія і практика. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2013. – №36 (1009). – С. 110–111.
6. Заполовський М.Й. Синтез управлінь для оптимізації динамічних процесів електроприводу змінного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скорodelов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 4(50). Полтава. 2018. С. 38-41.
7. Заполовський М.Й. Математична модель для синтезу управлінь електроприводом змінного струму / М.Й. Заполовський, В.В. Скорodelов, М.В. Мезенцев // Системи управління, навігації та зв'язку. – Випуск 5(57). Полтава. 2019. С. 16-21.

Received (Надійшла) 23.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

#### Optimization model of traction asynchronous electric drive diesel train and its research

M. Zapolovskyi, M. Mezentsev, O. Balenko, M. Olifir

**Abstract.** Approaches to the construction of control systems for the traction asynchronous electric drive of diesel trains are considered. The analysis of mathematical models and the selection of the method of synthesis of the controls of the electric drive control system of the diesel train were carried out. The optimization mathematical model of the electric drive is based on the algorithm of the vector control method. The mathematical model of the electric drive includes a model of the traction motor, which is presented in a two-phase orthogonal coordinate system, oriented along the vector of the rotor flux coupling, and a mathematical model of the movement of a diesel train. For the synthesis of controls, it is proposed to use the method of variational calculus by solving the general Lagrange problem. Techniques for overcoming this shortcoming of this method are proposed for finding undetermined Lagrange multipliers. By means of modeling, the types of controls in the form of analytical ratios are obtained as components of the solution of the differential equation - homogeneous and forced solutions. The study of the proposed model was carried out both from the point of view of its adequacy and its applicability for the purposes of the synthesis of management. The research results are presented in the form of graphs of processes of characteristic phase variables and tables.

**Keywords:** control system, asynchronous electric drive, diesel train, vector control algorithms, mathematical model, control laws, control synthesis, optimization methods, Lagrange problem, uncertain Lagrange multipliers, research.

В. І. Носков, С. Ю. Гавриленко, В. В. Скороделов, М. В. Гейко

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ПОКАЗНИКІВ ТЯГОВИХ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧ АВТОНОМНИХ ЛОКОМОТИВІВ

**Анотація.** Одним з основних чинників, які визначають якість роботи автономного локомотива є тягова електропередача (ТЕП), для оцінки якої використовуються показники її роботи у режимах тяги та електричного гальмування. Як правило, оцінка тягової електропередачі проводиться за такими показниками, як установлена та тривала потужність електрообладнання, коефіцієнт корисної дії та ін. В даній статті запропоновано та обґрунтовано метод якісної оцінки тягової електропередачі з використанням інтегрального показника потужності. Оцінку динамічних показників тягової електропередачі пропонується виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

**Ключові слова:** тягова електропередача, інтегральний показник потужності, комп'ютерна модель.

### Вступ

Тягова електропередача (ТЕП) здійснює передачу потужності дизеля до рушійних колес і належить до основних складових, які визначають якість роботи локомотива. При цьому має виконуватися низка вимог, пов'язаних з реалізацією тягового зусилля, яке обмежено зчепленням колеса з рейками, повна передача потужності дизель-генератора на осі локомотива в заданому діапазоні швидкостей руху, забезпечення роботи дизеля за економічними характеристиками в статичних і динамічних режимах. Комплексна оцінка ТЕП відіграє важливу роль при створенні локомотивів та їх експлуатації.

**Аналіз літератури.** Оцінка якості роботи автономного локомотива вимагає вибору та обґрунтування відповідного критерію або цільової функції. У загальному випадку таким критерієм є мінімум витрати палива [1–5]. Аналіз виразу, що визначає цей критерій, показує його пряму залежність від таких факторів, як ефективність роботи дизеля, ККД ТЕП, витрати енергії на власні потреби та ін.

При створенні та експлуатації автономних локомотивів виникає низка питань, пов'язаних з оцінкою основних факторів, що впливають на їх якісні показники.

Існують різні методи досліджень тягової електропередачі у статичних і динамічних режимах роботи, але не всі вони дають достатньо об'єктивну та наочну інформацію про характеристики тягової електропередачі, а математичні моделі, що їх описують, досить складні.

В даній статті пропонується проводити якісну оцінку тягової електропередачі в режимах тяги та гальмування з використанням інтегрального показника потужності, а оцінку динамічних властивостей тягової електропередачі виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

### Основна частина

У загальному випадку в якості критерію для оцінки якості роботи локомотива використовується цільова функція мінімуму витрати палива:

$$W = B \rightarrow \min, \quad (1)$$

де  $B$  – витрати палива.

Визначення експлуатаційних витрат палива локомотивом виконується по формулі, яка відносить його сумарні витрати до тягової роботи локомотива на колесі:

$$W = q_n = \frac{\sum_{i=1}^n b_{ei} \cdot P_{di} \cdot t_i}{\sum_{i=1}^n P_{ki} \cdot t_i} \rightarrow \min, \quad (2)$$

де  $q_n$  – питома витрата палива в заданому режимі,  
 $P_{di}$  – потужність дизеля на  $i$ -й позиції контролера машиніста (КМ),

$b_{ei}$  – питома витрата палива при реалізації  $P_{di}$  на  $i$ -й позиції КМ,

$t_i$  – час роботи на  $i$ -й позиції контролера машиніста,

$P_{ki}$  – потужність, що реалізується на колесі:

$$P_{ki} = P_{di} - P_{en} - P_m \cdot \eta_{en}, \quad (3)$$

де  $P_{en}$  – потужність, що відбирається на власні потреби локомотива,

$P_T$  – потужність дизеля, яка віддається на тягу,

$\eta_{en}$  – ККД електропередачі, включаючи тяговий редуктор [6, 7].

Тягова електропередача відноситься до основних факторів, що впливають на якість роботи локомотива.

При перетворенні механічної енергії дизеля на механічну енергію руху локомотива повинен виконуватися ряд вимог, пов'язаних з реалізацією тягового зусилля, обмеженого зчепленням колес з рейками; повної передачі потужності дизель-генератора в заданому діапазоні швидкостей руху; забезпечення роботи дизеля за економічними характеристиками в статичних і динамічних режимах.

На рис. 1 приведена структурна схема ТЕП моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02. Тяговий генератор, який обертається від дизеля, через випрямну установку і автономні інвертори напруги (АН1, АН2) живить асинхронні тягові двигуни (АТД1, АТД2).

Від тягового генератора та перетворювачів частоти власних потреб (ПЧВП) живляться допоміжні споживачі енергії.

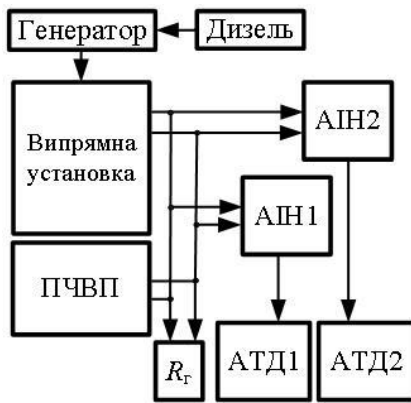


Рис. 1. Структурна схема ТЕР моторного вагона дизель-поїзда ДЕЛ-02

При електричному гальмуванні АТД працюють у режимі генераторів і через АПН1, АПН2 навантажуються на гальмовий резистор  $R_r$  [8].

Гранична тягова характеристика локомотиву  $F = f(V)$  (рис. 2) містить область пуску (1) і область постійної потужності (2). Тягове зусилля в області пуску обмежується допустимим значенням зчеплення колеса з рейкою [9, 10].

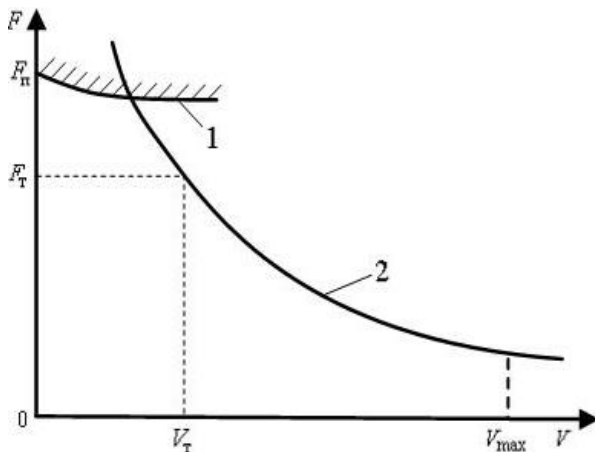


Рис. 2. Гранична тягова характеристика ( $F_n$  – пускова тяга,  $F_r$  і  $V_r$  – тривала тяга і швидкість відповідно (для ТЕР з колекторними двигунами),  $V_{max}$  – максимальна швидкість руху локомотива)

Для ТЕР із колекторними тяговими двигунами (КТД) послідовного збудження коефіцієнт зчеплення  $\psi$  визначається за виразом:

$$\psi = 0,25 + \frac{8}{100 + V}. \quad (4)$$

Тягове зусилля при цьому буде:

$$F = \psi \cdot G, \quad (5)$$

де  $G$  – маса поїзда.

Для ТЕР з АТД коефіцієнт зчеплення у зоні пуску в 1,3 рази вищий, ніж з КТД, що зумовлено особливостями електромеханічної характеристики двигуна. Область постійної потужності має початок від області пуску та кінець на максимальній швидкості локомотива.

Тягове зусилля у цій області визначається за виразом:

$$F = P_0 / V. \quad (6)$$

Необхідно зазначити, що розширення швидкісного діапазону за рахунок зниження потужності ТЕР неприпустимо.

Аналогічним чином представляється характеристика локомотива в режимі електричного гальмування, коли механічна енергія руху дизель-поїзда через ТЕР гаситься на гальмових резисторах.

При цьому можливе її використання для живлення допоміжних навантажень і опалення пасажирських вагонів.

Гранична гальмівна характеристика локомотива  $B = f(V)$  наведена на рис. 3 [9, 10].

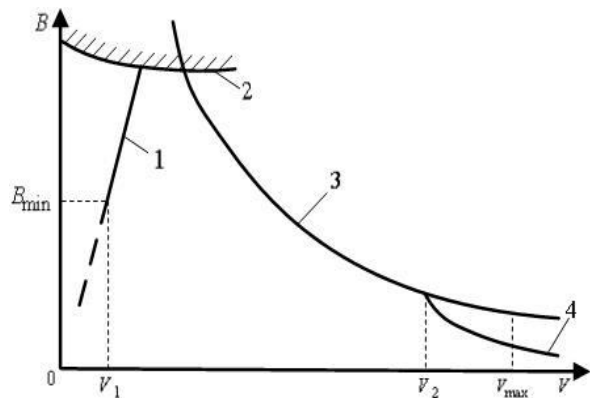


Рис. 3. Гранична гальмівна характеристика локомотива ( $B_{min}$  – мінімальне гальмівне електричне зусилля)

Гальмівна характеристика (рис. 3) має кілька ділянок, які визначаються параметрами ТЕР:

- область обмеження магнітного потоку тягових двигунів (1);
- область обмеження гальмівного зусилля в умовах зчеплення коліс з рейками (2);
- область обмеження гальмівної потужності (3);
- область обмеження комутації для КТД (4), для якої зазвичай виконується рівняння:

$$V_2 = (0,7 \dots 0,8) \cdot V_{max}. \quad (7)$$

При зростанні швидкості локомотива гальмівна потужність  $P_r$  зменшується відповідно з наступним виразом:

$$P_r / V = const. \quad (8)$$

При зниженні швидкості локомотива приблизно до 5-10 км/год електричне гальмо стає неефективним і відбувається перехід на пневматичне (зупинкове) гальмування.

Одним із показників, який використовується при порівнянні ТЕР, є встановлена потужність електроустановки, яка оцінюється як відношення добутку значень пускової тяги на максимальну швидкість локомотива до потужності дизеля, що використовується для тяги.

Оскільки пускові тягові зусилля локомотива визначають струми в елементах тягової електропере-

дачі, а максимальна швидкість визначає напругу, цей показник певною мірою характеризує електричну потужність, закладену в електроустаткування.

Зв'язок між параметрами ТЕП та характеристиками локомотива виконується через: механічну частину приводу, передавальне число редуктора, діаметр колеса.

Другим показником для порівняння ТЕП є тривала потужність електрообладнання, яка оцінюється як відношення добутку значень тривалої тяги на максимальну швидкість до потужності дизеля. Цей показник характеризує область, у якій локомотив може працювати тривалий час.

В даній роботі пропонується проводити оцінку тягової електропередачі локомотивів за інтегральним показником потужності  $K_p$ , який враховує коефіцієнт корисної дії тягової електропередачі і механічної частини приводу, тягові та швидкісні характеристики локомотива, і є відношенням площі тягової характеристики до потужності дизеля:

$$K_p = \frac{1}{P_0} \int_{V=0}^{V_{\max}} F dV. \quad (9)$$

Для порівняльної оцінки ТЕП в режимі електричного гальмування можна використовувати вираз, в якому замість тягової використовується гальмівна характеристика:

$$K_p = \frac{1}{P_0} \int_{V=0}^{V_{\max}} B dt. \quad (10)$$

Запропонованим методом оцінювання було проведено порівняння тягової електропередачі локомотивів з різними двигунами і виявлено, що в режимі тяги інтегральний показник з АТД вище на 15 %, а в режимі електричного гальмування вище на 40 %, ніж з КТД.

Для якісної оцінки динамічних властивостей тягової електропередачі локомотивів були виконані дослідження на комп'ютерній моделі динаміки руху дизель-поїзда ДЕЛ-02 з різними типами тягових приводів.

Як відомо, математична модель руху дизель-поїзда описується рівнянням виду:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_m - M_c, \quad (11)$$

де  $J$  – момент інерції ( $J = G \cdot R_k^2$ ),

$R_k$  – радіус колеса,

$\omega$  – кутова швидкість ( $\omega = V/R_k$ ),

$M_t$  – момент тяги,

$M_c$  – момент опору руху,

$V$  – швидкість руху дизель-поїзда.

Швидкість дизель-поїзда з урахуванням одиниць вимірювання, що використовуються в даному випадку, визначається співвідношенням:

$$V = 3,6 \cdot \omega \cdot R_k. \quad (12)$$

Для розробки комп'ютерної моделі були використані рівняння (11 – 12).

Визначення моменту тяги  $M_t$  у процесі руху поїзда здійснюється відповідно до рівнянь:

$$M_m = F(V) \cdot R_k, \quad (13)$$

$$F_{\max} = 9,81 \cdot G \cdot (102 \cdot (1 + \gamma) \cdot a_{\max} + W_0), \quad (14)$$

де  $F(V)$  – тягова характеристика ТЕП,

$F_{\max}$  – максимальне зусилля при розгоні,

$(1 + \gamma)$  – коефіцієнт інерції мас, що обертаються ( $\gamma = 0,1$ ),

$a_{\max}$  – максимальне прискорення поїзда,

$W_0$  – коефіцієнт опору руху (при розгоні  $W_0 = 1,1$ ).

Визначення моменту опору руху  $M_c$  у процесі руху поїзда здійснюється відповідно до таких рівнянь:

$$M_c = 9,81 \cdot i \cdot R_k \cdot W_0 \cdot G, \quad (15)$$

$$W_0 = 1,1 + 0,012 \cdot V + 0,00025 \cdot V^2, \quad (16)$$

де  $i$  – коефіцієнт ухилу колії (для горизонтальної ділянки  $i = 1$ ).

Згідно з виразами (11 – 16) розроблено комп'ютерну модель для обчислення швидкості поїзда в залежності від параметрів ТЕП та умов руху, яка складається з блоків обчислення моменту тяги і моменту опору руху, блоку обчислення коефіцієнтів і блоку інтегрування (рис. 4).

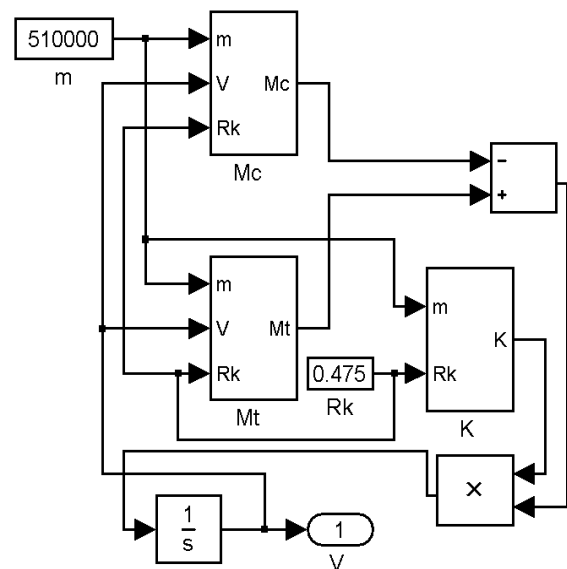
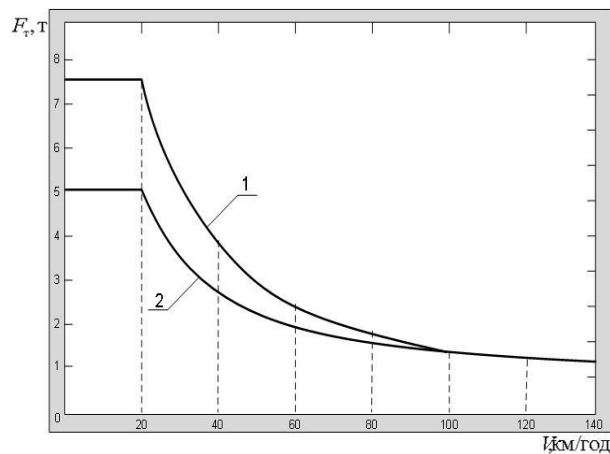


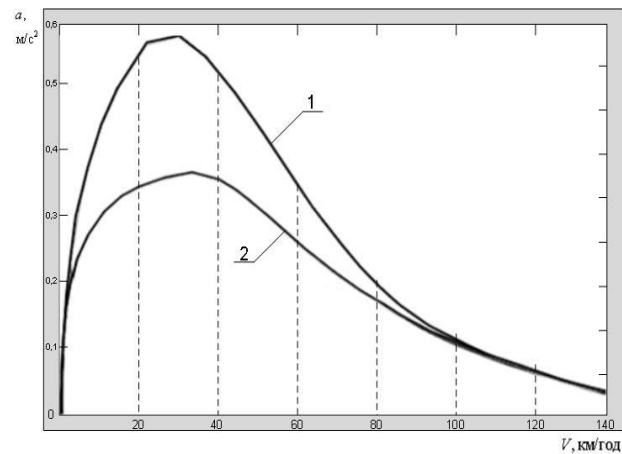
Рис. 4. Комп'ютерна модель для обчислення швидкості руху дизель-поїзда

На рис. 5 приведені порівняльні тягові характеристики, які отримані розрахунковим шляхом при використанні дизель-генератора фірми MTU потужністю 550 кВт і максимальною напругою генератора після прямої установки 1500 В для різних типів ТЕП. На розробленій комп'ютерній моделі були проведені дослідження динамічних характеристик дизель-поїзда ДЕЛ-02 з різними типами ТЕП.

На рис. 6 наведені характеристики прискорення  $a = f(V)$  дизель-поїзда.



**Рис. 5.** Тягові характеристики дизель-поїзда з різними типами ТЕП (1 – з використанням АТД, 2 – з використанням КТД)



**Рис. 6.** Залежність прискорення дизель-поїзда від його швидкості при використанні АТД (1) і КТД (2)

### Висновки

За результатами досліджень для комплексної оцінки ТЕП запропоновано та обґрунтовано використання інтегрального показника потужності. Оцінку динамічних показників ТЕП запропоновано виконувати на розробленій комп'ютерній моделі.

Наведений метод оцінки тягової електропередачі з асинхронним тяговим двигуном і колекторним тяговим двигуном був використаний при дослідженні дизель-поїзда ДЕЛ-02.

Отримані результати показали перевагу показників асинхронного приводу у порівнянні з колекторним.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Притула М.Г. Розроблення алгоритмів формування енергооптимальних режимів руху поїздів / М.Г. Притула, О.А. Пасечник // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 6 (78). – 2018. – С. 82 – 100.
2. Логвінова Н.О. Зменшення експлуатаційних витрат за допомогою енергооптимального руху поїздів / Н.О. Логвінова, Д.О. Босий, О.М. Полях // Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. – Вип. 42. – 2012. – С. 110 – 113.
3. Кислий Д.М. Визначення енергозаощаджуючих режимів ведення поїздів / Д.М. Кислий // Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту. – № 1 (61). – 2016. – С. 71 – 84.
4. Мозолевич Г.Я. Енергоефективне керування поїздопотоком як засіб удосконалення перевізного процесу / Г.Я. Мозолевич, А.В. Троян // Транспортні системи та технології перевезень. Збірник наукових праць ДНУЗТ ім. акад. В. Лазаряна. – Вип. 10. – 2015. – С. 80 – 87.
5. Сулим А.О. Дослідження факторів та оцінка рівня їх впливу на показник питомих витрат електроенергії рухомого складу / А.О. Сулим, О.О. Мельник, О.В. Бялобржеський, А.І. Ломонос // Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. – № 4 (268). – 2021. – С. 118 – 127.
6. Брагін М.І. Аналіз праць вчених по визначенню техніко-економічних показників тягових транспортних засобів / М.І. Брагін, М.В. Володарець, А.П. Фалендиш // Вісник східноукраїнського національного університету ім. В. Даля. – № 3 (233). – 2017. – С. 31 – 35.
7. Коссов Є.С. Удосконалення режимів роботи силових енергетичних систем тепловозів. Монографія / Є.С. Коссов, Є.М. Шапран, В.В. Фурман // Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля. – 2006. – 280 с.
8. Носков В.І. Перевірка і налаштування параметрів тягового електроприводу у стаціонарних режимах / В.І. Носков, В.С. Блиндюк, В.В. Скороделов, Г.В. Гейко // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка». – вип. 3 (65). – 2021. – С. 56 – 59.
9. Далека В.Х. Основи електричної тяги: навч. посібник / В.Х. Далека, П.М. Пушков, В.П. Андрійченко, Ю.В. Мінесва // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків: ХНАМГ. – 2012. – 312 с.
10. Тартаковський Е.Д. Теорія та конструкція локомотивів. Ч.2. Вибір та розрахунок основних вузлів локомотивів: Навч. посібник / Е.Д. Тартаковський, А.Ф. Агулов, А.П. Фалендиш // Харків: УкрДАЗТ. – 2009. – 150 с.

Received (Надійшла) 30.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

### Development of a method for assessing the indicators of traction power transmissions of autonomous locomotives

Valentin Noskov, Svitlana Gavrylenko, Volodymyr Skorodielov, Maksym Heiko

**Abstract.** One of the main factors determining the quality of autonomous locomotive operation is traction power transmission (TPT), which is assessed using indicators of its operation in traction and electric braking modes. As a rule, the assessment of TPT is carried out according to such indicators as the installed and continuous power of electrical equipment, efficiency, etc. This article proposes and substantiates a method for qualitative assessment of TPT using an integrated power indicator. It is proposed to evaluate the dynamic characteristics of TPT using the developed computer model.

**Keywords:** traction power transmission, integrated power index, computer model.



P. Pavlenko<sup>1</sup>, Ye. Samborskyi<sup>1</sup>, H. Krykhovetskyi<sup>2</sup>, I. Samborskyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>National Aviation University, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup>Institute of Special Communication and Information Protection National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine

## CONTROL MODEL OF A GROUP OF MANEUVERABLE UNMANNED AERIAL VEHICLES TAKING INTO ACCOUNT THEIR FLIGHT SAFETY

**Abstract.** The article deals with the urgent scientific problem of creating an algorithmic support for an automated situational control system for group maneuverable unmanned aerial vehicles, taking into account the possibility of improving their flight safety. To realize this possibility, the authors proposed a non-linear flight model of group formation. This is the basis for the synthesis of nonlinear control laws for these aircraft. The difference of the proposed approach is taking into account the influence of changes in the speed and direction of wind flows on the laws governing the movement of aircraft in a group. Promising areas of research are considered, namely: the application of the results obtained to justify the requirements for the design characteristics of control systems and their algorithmic support in terms of not only improving their flight safety in group formations, but also ensuring the specified performance indicators for a wide range of possible flight tasks by a group of maneuverable aircraft.

**Keywords:** mobile unmanned aerial vehicles, control system, control law, aircraft group, information channel, flight safety, group flight, wind effects, control laws, model flight safety.

### Introduction

Today, the dominant advantage of using modern unmanned aerial vehicles (UAVs) as part of groups is a significant increase in the probability and effectiveness of flight tasks, while the disadvantage is the impossibility of ensuring the necessary level of flight safety during intensive maneuvering under the influence of the state of the atmosphere and especially variations in speeds and directions wind currents. A promising approach to overcoming this shortcoming is the appropriate organization of the process of managing the simultaneous use of a large number of UAVs in a group flight. The term "group flight" reflects the process of simultaneous, compatible, coordinated, synergistic (organizationally interconnected) functioning of several aircraft (which as a rule have different flight and technical characteristics load functional purpose equipment configuration etc.) with a clearly defined purpose flight task. Current flight tasks, the effectiveness of which increases significantly with the group use of UAVs, today include: surveillance with the accumulation or operational real-time transmission of the necessary information about ground and air objects; search and detection of objects, constant monitoring of them with the necessary and possible information and energy or other effects on their functioning; transportation of oversized cargo; performance of aviation and chemical works; fire extinguishing; carrying out special monitoring; retransmission, switching, routing and transformation of departmental radio communication signals; solutions of applied scientific tasks on the study of the earth's surface; patrolling etc. The implementation of the appropriate management organization for the simultaneous use of a large number of UAVs in a group flight with the provision of a given level of flight safety during intensive maneuvering under the influence of atmospheric conditions is proposed to be ensured

through the creation of algorithms for the operation of the control system of these moving objects. Today appropriate automated control systems for the group use of UAVs (complexes of mobile aviation systems) are being developed, but it is advisable to pay more attention to the issue of increasing the level of flight safety during intensive maneuvering under the influence of the state of the atmosphere, and especially variations in the speed and direction of wind flows. Therefore this scientific article is devoted to the solution of this relevant applied task.

### Analysis of recent research and publications

A significant amount of scientific research, the results of which are reflected in well-known publications, is devoted to the modeling of management processes in complex, dynamic, large organizational systems, which undoubtedly include groups of aerial vehicles and especially unmanned ones. It is appropriate to focus attention on the latest achievements of scientists in this field and analyze the results of their research, which are reflected in their published scientific works. In [1] describes an approach to planning the flight path of "unmanned aerial vehicles" and presents a model of a group of aerial vehicles, which shows the possibility of modeling movement along trajectories approximated by arcs of constant and variable curvature, as well as Pythagorean Hodographs. The advantages and disadvantages of modeling the movement of UAVs and the conditions for applying the specified approaches to the approximation of trajectories are shown. The article [2] analyzed the existing approaches and features of UAV control, described its mathematical model, and proposed a number of different approaches to controlling such aerial vehicles. The main ideas, terms of use, advantages and disadvantages of the proposed approaches are illustrated and discussed. The structural schemes of the UAV as a control object using aerobatic,

navigation and automatic control methods are considered, the architectural components of these schemes are described. The article [3] examines the existing methods of evaluating the effectiveness of the use of unmanned aircraft systems and proposes an improved methodology for evaluating the effectiveness of the use of formations of unmanned aircraft systems under the conditions of unauthorized influence of various factors not only directly on the devices themselves during their flight tasks, but also on groups of unmanned aircraft complexes. It is indicated that since the UAV control process is stochastic, it is suggested to use probabilistic indicators to evaluate the efficiency of the use of units of these aerial vehicles, namely: the probability of successful completion of flight tasks, the guaranteed probability of completing tasks, the probability of completing a number of tasks from their total number, the average guaranteed result, mathematical expectation of the number of successfully completed flight missions by UAV complexes. In scientific works [4-6] the authors comprehensively considered the features and specifics of group use of UAVs. A probabilistic method of justifying the choice of a control system for a group of unmanned aerial vehicles is proposed which is based on Markov probabilistic models of changes in discrete states in continuous time. The possibility of differentiating the intensities of event flows depending on the states is taken into account. The difference between the results obtained by the authors in these works is the consideration of the widest possible range of possible application circumstances: the only requirement for the functioning of the "UAV group - object of application" system is to ensure compliance of the random flow of events with Markov conditions. The article [7] presents the approaches and results of the study of effective online planning of UAV logistics in emergency situations. These studies are based on the use of optimization algorithms. The paper [8] proposes approaches to the synthesis of the UAV control and monitoring subsystem, and the article [9] describes a secure voice control system for this aerial object. Scientific works [10-12] are devoted to the construction of mathematical models of the movement of UAVs as dynamic objects, taking into account the characteristic features of actions and tactical and technical capabilities of the aircraft for the synthesis of the control system with support for decision-making regarding the planning of optimal UAV routes.

Thus, the analysis of the results obtained in recent studies shows that scientists are now paying considerable attention to the problems of organizing the control of UAVs and the synthesis of control systems for these structures. But in the known works, the approaches to ensuring the safety of flights of groups of UAVs, whose control systems provide for the possibility of compensating for wind effects on maneuvering such aerial vehicles, are not sufficiently covered.

The purpose of the article is to solve the task of synthesizing the laws of control of groups of unmanned maneuverable aerial vehicles (UMAVs) taking into

account turbulent phenomena in the atmosphere, the implementation of which in algorithmic and software systems for automated control of "drones" and support for decision-making on piloting will increase the safety of the flights of these aerial vehicles.

### Presenting main material

In nonlinear models, which sufficiently fully and accurately describe the flight processes of UMAVs in group application and which have recently been increasingly used for the synthesis of situational nonlinear laws of control of these complex dynamically dispersed objects, it is advisable to take into account such a situational factor as variations in atmospheric processes [1]. As the in-depth and comprehensive analysis of the experience of using groups of unmanned aerial vehicles shows the influence of variations in the air environment causes significant, but not always predictable changes in the aerodynamic forces and moments of aircraft. This significantly changes the effectiveness of managing these air assets, and especially in group use. At the same time the main emphasis should be placed not only on the performance of the flight task by the formation of unmanned maneuverable aircraft but also on ensuring their flight safety in a group [2-7].

It is known that a large number of factors influence the dynamics of atmospheric processes. It is proposed to take into account the most significant of them for conducting research, namely: the geographical location of the flight area of groups UMAVs, the type of the Earth's surface, the flight height of aircraft, the season, time of day, air temperature variations [8, 9]. Therefore, the air environment is a complex nonlinear object, for which it is problematic and not always possible to synthesize an adequate and accurate model of atmospheric processes when organizing the management of UMAVs in a group [5, 6, 10]. The conducted studies show that possible turbulent phenomena in the atmosphere can be represented by appropriate nonlinear mathematical models. Among them, according to the authors, the greatest interest for achieving the goal of a systematic synthesis of situational control systems for groups of unmanned aerial vehicles is represented by mathematical models in which it is sufficient to take into account variations in atmospheric turbulence affecting the profiles of wind flows. As you know, they are especially characteristic of fast-moving air currents near the Earth's surface [1].

The study of the reaction of the group UMAVs in a group to the fast-moving situational factors of atmospheric turbulence variations was based on the theory of statistical dynamics. For a complete, accurate and adequate description of possible management situations, in which the influence of the existing factors of atmospheric turbulence is taken into account, models of the UMAVs in a group are used in the form of nonlinear equations that describe, in addition to the dynamic states in flight of these aerial objects, also the power plants of aircraft and their servo drives. This made it possible to synthesize the functioning algorithms of the synergistic control systems of the

UMAVs in a group. Their implementation will ensure the self-organization of situational control by taking into account the specific features of various variants of the flight task for the UAVs [11, 12].

When solving this problem, one of the possible approaches to assessing the impact of air turbulence is proposed. We will use the obtained results to describe the general laws and determine the necessary requirements for the synthesis of situational control systems of the UAVs. When conducting analytical studies we will assume that the air environment is homogeneous and isotropic. Then, for all points of the airspace in which the flight of the UAVs group is predicted to be implemented such characteristics as mathematical expectation dispersion and density of the distribution of the random component of the wind speed will be the same.

It is known that the variations of the longitudinal component of the speed change of the UAVs taking into account the influence of a homogeneous isotropic medium along the trajectory  $L$  of the movement of this aircraft, should be represented by the spectral density

$$S_1(\omega) = \frac{2\delta_u^2 LV^{-1}}{1 + \omega^2 LV^{-2}}, \quad (1)$$

where  $\delta_u^2$  – dispersion of the velocity of the longitudinal component of the wind;  $V$  – UAVs flight speed;  $\omega$  – the frequency of the components of a random signal, adequate to the change in wind speed, which can take a value  $\omega = [0, \infty]$ ;  $L$  – the distance traveled by the aircraft.

The vertical  $u_y$  and horizontal  $u_x$  components of changes in the speed of a UAVs taking into account the effects of intense variations in atmospheric turbulence (normal to the vector of the UAVs flight path and lying in its structural plane of symmetry and in the plane of its wing) are determined by the spectral density from the expression

$$S_2(\omega) = \delta_u^2 LV^{-1} \left( \frac{1 + 3\omega^2 L^2 V^{-2}}{(1 + \omega^2 L^2 V^{-2})^2} \right). \quad (2)$$

To describe the dependence of the dispersion  $D_{ij}$  of signals  $X_i$  (which identify the UAVs group as a complex dynamic nonlinear system) on the spectral density  $S_0$  of the “white noise” type acting on the  $j$  input of this system and the corresponding integral quadratic estimate of the impulses of these signals, we will use a classical statistical dynamics mathematical model

$$D_{ij} = S_0 I_{ij}. \quad (3)$$

In order to use expression (3) in the synthesis of the laws of situational synergistic control, it is proposed to create models that describe the shaping filters for the transformation of control signals with the spectral densities described by expressions (1) and (2). Next, to simplify analytical studies, we make a model of a dynamic system containing nonlinear equations of a

joint flight of UAVs in a group of two aircraft. In this model, we will include equations that describe the influence of the processes in the signal-forming filter for a given wind disturbance and predicted control of the UAV. To simplify the analytical modeling, the assumption is made that the processes of controlling unmanned aircraft are stable. This will make it possible to determine the integral quadratic estimates  $I_{ij}$  of the processes in the control systems of the UAVs group when conducting an analytical study.

Amplitude-phase characteristics  $W_1(j\omega)$  and  $W_2(j\omega)$  shaping filters of signal processing in control systems of the UAVs which adequately correspond to the spectral densities  $S_1(\omega)$  and  $S_2(\omega)$  are described by functions of the form

$$S_i(\omega) = (W_i(j\omega))^2 S_x(\omega), \quad (4)$$

where  $S_x(\omega)$  – spectral density of the input signal of the shaping filter.

Taking into account (4) and accepting  $S_x(\omega) = 1$ , we find dependencies for determining the amplitude-phase characteristics of the shaping filters of signal processing in the control systems of the UAVs

$$|W_1(j\omega)|^2 = S_1(\omega), \quad |W_2(j\omega)|^2 = S_2(\omega). \quad (5)$$

Then the differential equation describing the state of the first signal processing filter will have the form

$$\dot{u}_x = -VL^{-1}u_x + \delta_u \sqrt{2VL^{-1}}\xi, \quad (6)$$

and the second filter

$$\begin{vmatrix} \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 & -V^2L^{-2} \\ 1 & -2VL^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \delta_u (VL^{-1})^{3/2} \\ \delta_u (3VL^{-1})^{1/2} \end{vmatrix} |\xi|. \quad (7)$$

where  $Y_2 = u_y$ ,  $Y_1 = 2V(LV_2)^{-1} + \dot{Y}_2 - \delta_u (3VL^{-1})^{1/2}$ .

The output signal for the second filter, which must be transmitted to the input of models of control objects of wind action signals  $u_y$  is  $Y_2$ . The input signal of both filters as well as in extended models of control objects is a signal which we denote by  $\xi$ .

First, it is advisable to present the flight model of the UAVs group in general

$$\dot{X} = AX + Gu, \quad (8)$$

where  $X$  – the state vector of the UAVs which consists of the parameters of their autonomous flight and the parameters of the coordinates of the relative position of the aircraft during group movement;

$A$  – matrix of coefficients which describes the UAVs as a complex object of management;

$G$  – the matrix of the efficiency coefficients of the influence of control signals on the implementation of aircraft maneuvering processes;  $u$  – the vector of control signals of the UAVs.

In equation (8) we present the matrix  $A$  and  $G$  in this form

$$A = \begin{vmatrix} A_{11} & 0 & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 \\ A_{31} & A_{31} & A_{31} \end{vmatrix}, \quad G = \begin{vmatrix} G_1 & 0 \\ 0 & G_2 \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (9)$$

Taking (9) into account, equation (8) will be represented by two systems of equations. The first of them will look like

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= A_{11}X_1 + G_1u_1, \\ \dot{X}_2 &= A_{22}X_2 + G_2u_2, \\ \dot{Y}_{om} &= A_{31}X_1 + A_{32}X_2 + A_{33}Y_{om}. \end{aligned} \quad (10)$$

In the system of equations (10) the following is indicated:

$X_1, X_2$  –  $n$ - measurement vectors that reflect the state of autonomous movement of the first and second UAVs, respectively;

$Y_{om}$  –  $\mu$ -measurement vector of the coordinates of the relative position of the UAVs;

$u_1, u_2$  –  $r$ -dimensional vectors of variations of control influences;

$A_{11} \dots A_{33}$  – matrices of coefficients of internal connections in the UAVs model;

$G_1, G_2$  – matrices of UAVs control efficiency coefficients which are included in the block matrices of the form (9) for the mathematical model (10).

The second system of equations in addition to the mathematical model (10) is represented by equations of the form

$$\begin{aligned} X_{C1} &= A_{11}X_{C1} + G_1u_1; \\ X_{C2} &= A_{22}X_{C2} + G_2u_2. \end{aligned} \quad (11)$$

It consists of isolated equations of motion of a single UAV from the group.

To compile a complete mathematical model of the UAVs flight using (10) and (11) we decompose the expressions that describe the dependence of the elements of the matrices included in these equations on the flight parameters. For example, let's consider the most typical flight situations of the use of a group of UAVs namely the mode of longitudinal movement and simultaneous turning in the horizontal plane. In longitudinal motion, the vectors of their state, which correspond to the equations of autonomous motion, are represented by matrices of the form

$$\begin{aligned} X_1 &= [\bar{n}_1 \ V_1 \ \theta_1 \ \omega_{z1} \ v_1]^T, \\ X_2 &= [\bar{n}_2 \ V_2 \ \theta_2 \ \omega_{z2} \ v_2]^T. \end{aligned} \quad (12)$$

The control vectors of the UAVs in the group will be presented in the form

$$u_1 = [\delta_{1\delta\theta}\varphi_1], \quad u_2 = [\delta_{2\delta\theta}\varphi_2]. \quad (13)$$

In expressions (12) and (13) the symbols  $\bar{n}_1$  and  $\bar{n}_2$  indicate increases in the relative frequency of rotation of

the rotors of the UAVs engines, which are equivalent to the increase in their thrust,  $\delta_{1\delta\theta}, \delta_{2\delta\theta}$  – deviation from the balancing positions of the engine control bodies,  $\varphi_1, \varphi_2$  – deviation from the balancing positions of the UAVs stabilizers. The rest of the designations in model (12) and (13) meet the requirements accepted in the aerodynamics of aircraft [13, 14].

Identical in structure matrices, which are included in model (10) are proposed to be presented in the form

$$A_{11} = \begin{vmatrix} a_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & 0 & a_{25} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 & a_{35} \\ 0 & a_{42} & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{vmatrix}, \quad (14)$$

$$G_1 = \begin{vmatrix} g_{11} & 0 \\ 0 & g_{22} \\ 0 & g_{32} \\ 0 & g_{42} \\ 0 & 0 \end{vmatrix}. \quad (15)$$

The elements of the matrices (14) and (15) are determined by numerically differentiating the complete nonlinear equations of the flight of the UAVs by the elements of its state vector under their flight parameters. These parameters correspond to variations in the current values of the aircraft balancing process.

We emphasize that wind speed variations are taken into account in models (12), (14) and (15) in the second column of the matrices  $A_{11}$  and  $A_{22}$ .

Let's introduce vectors to take these influences into account, marking them as  $\chi_{v1}, \chi_{v2}$ . At the same time, the influence of the vertical component of wind speed is described in the mathematical model by the fifth column.

The possibility of describing this action is based on the fact that the equations that describe the movement of the UAVs are drawn up in the velocity coordinate system. At the same time the angle of attack of the aircraft is determined from the equation

$$\alpha = v - \theta + \alpha_g,$$

where  $\alpha_g = u_y V^{-1}$ .

Equation (10) which describes the joint movement of UAVs taking into account the processes of managing their state, as well as signals that are adequate for variations  $u_x$ , can be presented in the form

$$\begin{aligned} \begin{vmatrix} \dot{X}_1 \\ \dot{X}_2 \\ \dot{Y}_{om} \end{vmatrix} &= \begin{vmatrix} D_{11} & 0 & 0 \\ -G_2K_{21} & D_{22} & -G_2K_{23} \\ A_{31} & A_{32} & 0 \end{vmatrix} \times \\ &\times \begin{vmatrix} X_1 \\ X_2 \\ Y_{om} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} \chi_{V1} & \chi_{v1} \\ \chi_{V2} & \chi_{v2} \\ 0 & 0 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} u_x \\ u_y \\ V \end{vmatrix}, \end{aligned} \quad (16)$$

where  $D_{11} = A_{11} - G_{11}K_{11}$ ,  $D_{22} = A_{22} - G_{22}K_{22}$  – dimension matrices  $n \times n$  of models of controlled autonomous movement of the UAVs. It is appropriate to present the model (16) in the form

$$\dot{Z} = DZ + \chi_V u_x + \chi_v \frac{1}{V} u_y, \quad (17)$$

where  $Z = [X_1^T \ X_2^T \ Y_{om}^T]^T$  – vector of the state of the closed control system of the UAVs dimension  $2n + \mu$ ;

$\chi_V = [\chi_{V1}^T \ \chi_{V2}^T \ 0]^T$  i  $\chi_v = [\chi_{v1}^T \ \chi_{v2}^T \ 0]^T$  – vectors of aircraft control coefficients taking into account wind speed components  $u_x$  i  $u_y$ ;  $D$  – matrix of coefficients of the closed control system of the UAVs.

In order to take into account the influence of a random signal on the flight of the UAV control model, which is adequate to the variations of wind disturbances, we transform (16) and (17) into the first extended model of the form

$$\begin{vmatrix} \dot{Z} \\ u_x \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D & \chi_V & Z \\ 0 & -VL^{-1} & u_x \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ g\phi \end{vmatrix} |\xi|, \quad (18)$$

where  $g\phi = \sigma_u \sqrt{2VL^{-1}}$  – coefficient of effectiveness of the influence of a “white noise” type signal. We will evaluate the results of the action of a random wind disturbance signal taking into account (16) and (17) on the basis of the second extended model, namely:

$$\begin{vmatrix} \dot{Z} \\ \dot{Y}_1 \\ \dot{Y}_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} D & 0 & \chi_V V^{-1} \\ 0 & 0 & -V^2 L^2 \\ 0 & 1 & -2VL^{-1} \end{vmatrix} \begin{vmatrix} Z \\ Y_1 \\ Y_2 \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 \\ g\phi \\ g\phi \end{vmatrix} |\xi|, \quad (19)$$

where  $g\phi = \left[ \sigma_u (VL^{-1})^{3/2} \ \sigma_u (3VL^{-1}) \right]^T$  – vector of coefficients characterizing the effectiveness of the influence of a “normalized white noise” type signal. For ease of simplification in relation to conducting analytical studies, let's present equations (18) and (19) in the form

$$\dot{Z}_n = D_n Z_n + g_n \xi. \quad (20)$$

When calculating the values of  $I_{ij}$ , included in expression (3), it is suggested to use the following approaches.

The first of them is that in equation (19) the action of the signal  $\xi = \delta(t)$  is replaced by a non-zero initial condition  $Z_n(t_0) = g_n$  and grades are determined  $I_{ij} = \int_0^\infty Z_{ni}^2 dt$  along the trajectory of free movement of the system (19).

To calculate the value  $I_{ij}$ , a matrix with a single non-zero element is specified  $B_i$ , the location of which corresponds to the location of the coordinates  $Z_{ni}$  in the vector  $Z_n$ . After that the matrix equation is solved

$$P_1 D_n + D_n^T P_i = -B_i. \quad (21)$$

Then the value of the estimate  $I_{ij}$  is determined from the dependence

$$I_{ij} = Z_n^T(t_0) P_i Z_n(t_0). \quad (22)$$

In the general case, equation (21) must be solved  $2n + \mu$  once. At the same time, at each step of the solution, new values  $B_i$  of matrix elements are set.

The second (simplified) approach to the solution of this problem, which consists in the fact that instead of equation (21), we will solve equations of the form

$$\bar{P} D_n^T + D_n \bar{P} = -Z_n(t_0) Z_n^T(t_0). \quad (23)$$

Then the score we are looking for is determined from the expression

$$I_{ij} = B_i \otimes \bar{P}. \quad (24)$$

Let's consider the fairness of such an approach. Substitute the expression for determining the matrix  $B_i$  from (21) into (23) and obtain

$$I_{ij} = -(P_1 D_n + D_n^T P_i) \otimes \bar{P}. \quad (25)$$

After transformation (24) we obtain the following equation

$$I_{ij} = -(\bar{P} D_n^T + D_n \bar{P}) \otimes P_i = Z_n(t_0) Z_n^T(t_0). \quad (26)$$

The conducted analytical studies confirm that it is enough to solve equation (23) once to determine the elements of the matrix  $\bar{P}$ . In this matrix, its first diagonal elements  $2n$  are equal to the value  $I_{ij}$ , ( $j = 1, 2, \dots, 2n$ ).

Thus, the proposed and considered approach allows to algorithmically take into account the influence of such situational aspects of the dynamic state of the air environment as the turbulence of atmospheric flows in the situational control systems of groups of unmanned aerial vehicles.

## Conclusions

The conducted analytical studies of the peculiarities of the group use of UAVs under the influence of atmospheric variations allow us to draw the following conclusions. Thus, a necessary condition for improving the safety of group piloting of aircraft is taking into account variations in the speed and direction of wind flows (with the possibility of their adaptive compensation) in the functioning algorithms of the situational synergistic automated control system for the group use of unmanned aerial vehicles. To fulfill this requirement, nonlinear mathematical models of the flight of a group of unmanned aircraft are proposed. Based on these models, the possibility of compensating wind flow variations is taken into account during the synthesis of the laws of control of the maneuvering of the UAVs.

Thus, it makes it possible to form a priori the requirements for the structure of the algorithmic and software of automated control systems for the group use of unmanned aerial vehicles, to specify technical tasks for conducting research and development works on the creation of situational control systems, to form potential opportunities for the use of non-linear models for the study of complex processes of group use of UAVs and organization of management of this use.

According to the authors of the article, it is promising to use the obtained results to justify the optimal functionality of the group's devices, the requirements for the design characteristics of the flight information sensors of UAVs from the point of view of increasing not only the safety of their flights in group formations, but also a significant increase in the efficiency of performing a wide range of possible flight tasks.

## REFERENCES

1. Romaniuk L.A., Chykhira I.V. (2020) Aerodynamic model of a group of unmanned aerial vehicles in space with obstacles. *"Computer-integrated technologies: education, science, production"*. 2020. 38. 59–66. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2020-38-10. [in Ukrainian].
2. Ivanenko Yu.V., Liashenko O.S., Filimonchuk T.V. (2023) Overview of methods of controlling unmanned aerial vehicles. *Collection of scientific works of the PNTU "Control, navigation and communication systems"*. Т.1 (71). 26–30. DOI: 10.26906/SUNZ.2023.1.026. [in Ukrainian].
3. Yefremov O.V., Horbenko V.M., Korshets O.A. (2018) Methodology for evaluating the effectiveness of the use of units of unmanned aviation complexes. *Collection of scientific works of the KhNUAF named after Ivan Kozhedub*. 4 (58). 30–36. DOI: 10.30748/zhups.2018.58.04. [in Ukrainian].
4. Bondarenko Yu.L., Dupelych S.O., Horbach V.Ya. (2019) An improved mathematical model for planning the flight routes of reconnaissance unmanned aerial vehicles of the tactical class. *Bulletin of ZhSTU*. 1 (83). 206–213. DOI: 10.26642/th-2019-1(83)-206-213. [in Ukrainian].
5. Artiushyn L.M., Kononov O.A., Shmorhun Yu.V. (2019) Basic conditions for decision-making regarding the creation of an automated control system for the group use of unmanned aerial vehicles. *National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky "Modern information technologies in the field of security and defense"*. 2 (35). С. 49–54. DOI: 10.33099/2311-7249/2019-35-2-49-54. [in Ukrainian].
6. Artiushyn L.M., Kononov O.A., Herasymenko V.V., Nausenko B.Yu. (2022) The method of choosing an option for the implementation of group use of unmanned aerial vehicles. *National University of Defense of Ukraine named after Ivan Chernyakhovsky "Modern information technologies in the field of security and defense"*. 2 (44). 10–20. DOI: 10.33099/2311-7249/2022-44-2-10-20. [in Ukrainian].
7. D. Liu, S.Li (2018) Research on efficient online planning of emergency logistics path based on doublelayer ant colony optimization algorithm. *International Journal of Computers and Applications*. 33. 1–7.
8. Sineglazov V.M., Tsoba A.O. (2022) Control and monitoring subsystem of an unmanned aerial vehicle. *National Aviation University "Electronics and Control System"*. № 3 (73). 47–53. DOI: 10.18372/1990-5548.73.17012. [in English].
9. Lavrynenko O.Y., Konakhovych G.F., Bakhtiarov D.I. (2020) Protected voice control system of unmanned aerial vehicle. *National Aviation University "Electronics and Control System"*. 1 № 63, 92–98. DOI: 10.18372/1990-5548.63.14529.
10. Berezhnyi A.O., Kachalova V.V., Rozhkov M.I. (2019) Modeling the movement of dynamic objects in the decision-making support system for planning the routes of unmanned aerial vehicles. *Collection of scientific works of the KhNUAF named after Ivan Kozhedub. "Information processing systems"*. 4 (159). 44–49. DOI: 10.30748/soi.2019.159.05. [in Ukrainian].
11. Yershov V.V., Izvalov O.V., Nedilko S.M., Nedilko V.M. (2020) The concept of systematic control of the flight of unmanned aerial vehicles. *"Computer-integrated technologies: education, science, production"*. 40. 23–30. DOI: 10.36910/6775-2524-0560-2020-40-04. [in Ukrainian].
12. Подорожняк А.О., Волощков Ye..A., Шевцова O.S. (2018) Study of the control system of unmanned aerial vehicles. *NTU KhPI "Modern information systems"*. Т.2. № 3. 97–101. DOI: 10.20988/2522-9052.2018.3.16. [in Ukrainian].
13. Aerodynamics for engineering students [Text] /E.L. Houghton, P.W. Carpenter, Steven H. Collicott, Daniel T. Valentine. 6th ed. USA: Elsevier Ltd, 2016. 714 [in English].
14. Samborskyi I.I., Mashkov O.A., Kononov O.A. (2018) Problems of implementing joint use of promising unmanned aircraft complexes. *"Arsenal XXI"*, 1 (2). 36–41. [in Ukrainian].

Received (Надійшла) 22.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

#### Модель управління групою безпілотних маневрених літальних апаратів із урахуванням їх безпеки польотів

П. М. Павленко, Є. І. Самборський, Г. Я. Криховецький, І. І. Самборський

**Анотація.** У статті розглядається актуальне наукове завдання щодо створення алгоритмічного забезпечення автоматизованої ситуаційної системи управління груповим застосуванням маневрених безпілотних літальних апаратів із урахуванням можливості підвищення безпеки їх польотів. Для реалізації цієї можливості авторами запропонована нелінійна модель польоту групового формування. Вона є підґрунтям синтезу нелінійних законів управління цими повітряними засобами. Відмінністю запропонованого підходу є врахування впливу варіацій швидкостей і напрямів вітрових потоків у законах управління рухом літальних апаратів у групі. Розглянуті перспективні напрями досліджень, а саме: застосування отриманих результатів для обґрунтування вимог до конструктивних характеристик систем управління і їх алгоритмічного забезпечення із погляду не лише на підвищення їх безпеки польотів у групових формуваннях, але і забезпечення заданих показників ефективності виконання широкого спектру можливих польотних завдань групою маневрених літальних апаратів.

**Ключові слова:** мобільні безпілотні літальні апарати, система управління, закон управління, група літальних апаратів, інформаційний канал, безпека польотів, груповий політ, вітрові впливи, закони управління, модель, безпека польотів.

О. Г. Дрючко, О. В. Шефер, Б. Р. Боряк, М. К. Бороздін, В. М. Галай, Р. В. Захарченко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## РОЗРОБКА МОДУЛЕЙ ТЕРМОРЕГУЛЮВАННЯ ДЛЯ ЗОННОЇ ПЕРЕРОБКИ ПЛАСТИЧНИХ МАС ЕКСТРУЗІЄЮ

**Анотація.** Розроблено пристрій керування для встановлення та регулювання профілю теплового зонованого поля екструзійного каналу переробки пластмас в залежності від виду вихідної сировини; вибору режимів для створення умов стабілізації ефективного проведення технологічного процесу й одержання заданої якості екструдата; конструкційних особливостей виготовляємої продукції; можливостей й досконалості основного і допоміжного оснащення, продуктивності його роботи; ступеню підготовленості обслуговуючого персоналу до забезпечення виробництва. Згідно стандарту ІЕС 60584 1:2013 в якості опорних аналітичних сигналів в розробці використані відповідні стандартні значення різниці потенціалів типових градувальних таблиць термопар ТХА (тип К). Корегування середньої теплової потужності, що підводиться нагрівниками в окремих функціонально-технологічних зонах, здійснюється фазовим методом.

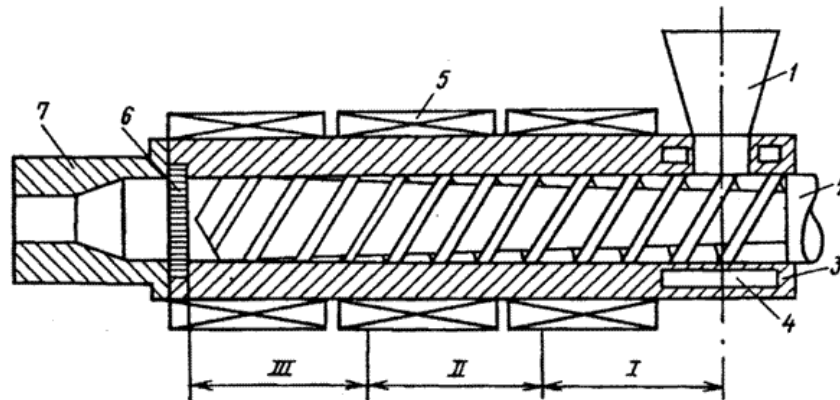
**Ключові слова:** переробка пластмас, метод екструзії, профіль термоекструзійного каналу, системи управління, конструктивні особливості.

### Вступ

У зв'язку зі зростанням об'ємів виробництва полімерних матеріалів великого значення набувають питання, пов'язані зі створенням високопродуктивного переробного обладнання та вдосконаленням чинного. Серед численних способів переробки полімерів найпоширенішим є метод екструзії. За оцінкою фахівців, на сьогоднішній день до 60% світового виробництва пластмас переробляється саме цим методом. Він полягає в продавленні матеріалу з високою в'язкістю у рідкому стані через формуючий інструмент (екструзійну головку, фільтру), з метою отримання виробу з поперечним перерізом потрібної форми [1], та з подальшими охолодженням, калібруванням і т. д. Використання шнекових апаратів при переробці полімерних матеріалів обумовлено їх високими технологічними показниками, головними з яких є безперервність

ведення процесу, відносна простота конструкції та порівняно невеликі енерго- та металозатрати. Цим пояснюється широке використання екструдерів у низці галузей: кабельній, хімічній, харчовій та інших.

При переробці полімерів все частіше використовуються композиційні матеріали, наповнювачі, барвники, легуючі добавки, які суттєво змінюють фізико-механічні характеристики сировини. Розширення асортименту полімерів, суттєве збільшення їхнього виробництва потребують створення високопродуктивного та ресурсоенергоощадного обладнання для їх переробки у найрізноманітніші вироби, [2, 3]. На сьогоднішній день при екструзії полімерів широкого використання набули одночерв'ячні екструдери (рис. 1, [1]), в яких процес завантаження (I); плавлення, гомогенізації (II); створення тиску і дозування (III) виконуються одним робочим органом – шнеком (черв'яком).



**Рис. 1.** Схема одношнекового екструдера без зони дегазації [1]: 1 - бункер; 2 - шнек; 3 - циліндр, 4 - порожнина для циркуляції води; 5 - нагрівачі; 6 - решітка з сітками; 7 - формуюча головка; I, II, III - технологічні зони

детально поведінка матеріалу послідовно на кожному етапі екструзії описана в [1].

Недоліком одностадійних черв'ячних екструдерів є прив'язка всіх цих процесів один до одного, тому недосконалість якогось із них призводить до зміни параметрів інших стадій, що значно ускладнює керування ними і унеможливає їх оптимізацію. Проаналізувавши технічні умови на виробі з

полімерної сировини (особливо крупно-погонні, профільовані) можна зробити висновок, що допуски на геометричні розміри полімерної продукції в багатьох випадках завищені на 10-20% [3, 4]. Все це пов'язано з недосконалістю існуючих технологічних ліній, які створені на базі одночерв'ячних екструдерів. При цьому виникає поперечна та поздовжня різнотовщинність заготовок через пульсації тиску в



зоні дозування. Усунення коливань тиску дає змогу зменшити допуски на продукцію, а це призведе до суттєвої економії вихідного полімеру, енергії, яка витрачається на його перероблення, зменшення кількості браку, яка потребує утилізації.

Відомо, що на тиск і якість процесів, які відбуваються в екструдері впливає природа і гранулометричний склад сировини, коливання температури, швидкість обертання черв'яка, зміна в'язкості розплаву і тиску в середині екструдера. Нестабільність останніх призводить до коливання тиску на вході формуючої головки і продуктивності, а це, як наслідок, призводить до необхідності встановлення завищених допусків на геометричні розміри екструдата.

Рішенням вказаних проблем може бути використання каскадних схем екструзії [3, 4], де всі процеси розділяються на окремі операції чи їх групи, з можливістю оптимізації процесів за рахунок автономного керування. Саме тому доцільно використовувати більш універсальне обладнання для переробки полімерів – каскадні екструдери (наприклад, рис. 2, [4]). Це дозволяє встановлювати раціональні режими роботи виділених операцій при якісному веденні всього технологічного процесу в цілому.

В такій схемі передбачено виділення в окремі операції: дозоване живлення, плавлення та гомогенізація, створення тиску та дозування. Всі пристрої оснащені окремими приводами з можливістю автономного керування процесами, які в них передбачені. Дозоване живлення дискового екструдера дозволяє регулювати термо-механічне навантаження на розплаву за рахунок можливості зміни обертів дискового екструдера при незмінній продуктивності. До того ж таке дозоване живлення дозволяє реалізувати модель диспергованого плавлення, енергоефективність якої в декілька разів вища, ніж при використанні пробкової моделі плавлення, яка реалізується в класичних черв'ячних екструдерах. Гомогенізація розплаву відбувається в робочих зазорах 9, величину яких можна змінювати конструктивними особливостями і формою шнека (наприклад, переміщуючи диски шнека 2). Задачею розплавлувача-гомогенізатора є плав-

лення матеріалу та його перемішування. Функцію дозування розплаву в зону формування може виконувати черв'ячний в'язкісний насос, який використовується у варіантах класичної екструзії, або об'ємний шестеренний насос 3 (рис. 2) з жорсткою напірною характеристикою. Шестеренний насос в такому екструдері виконує подвійну роль і має кілька переваг: по-перше, завдяки значному внутрішньому опору він відсікає всі коливання тиску та продуктивності, які накопичувалися на попередніх стадіях; по-друге, шестеренний насос забезпечує стабільний тиск та продуктивність безпосередньо на вході формуючого органу.

Аналіз технологічного процесу екструзії дозволив виявити характерні динамічні особливості екструдера як об'єкта управління. Встановлено, що тепловий стан окремих зон екструдера визначається не тільки тепловою енергією нагрівачів та енергією, що виділяється в полімері за рахунок в'язкого тертя, а й характером взаємовпливу елементів та теплових зон екструдера.

В [3] встановлено, що розігрів і плавлення полімерних матеріалів в пластикуючих екструдерах відбувається в основному за рахунок дисипативного джерела тепла, на що витрачається більше 90% механічної енергії, а на його пересування витрачається не більше 10%. При цьому корпус екструзійної машини практично на всій довжині працює в режимі відведення тепла, за винятком початкових ділянок, що припадають на зону завантаження. За відомостями [3-7] можна узагальнити способи обігріву екструдерів та систем регулювання температури в їх функціональних зонах. Встановлено, що найбільш прийнятним способом обігріву промислових екструдерів є електричний спосіб з використанням спіральних трубчастих електронагрівачів опору, залитих в алюмінієві блоки у вигляді напівкілець, що охоплюють циліндр екструдера по всій довжині зони.

Аналіз використання існуючих розробок комбінованих САР тепловим режимом в екструдерах вказує на можливість успішного поєднання й спряження аналогових схемо-технічних рішень в контурі управління цифрових мікроконтролерів.

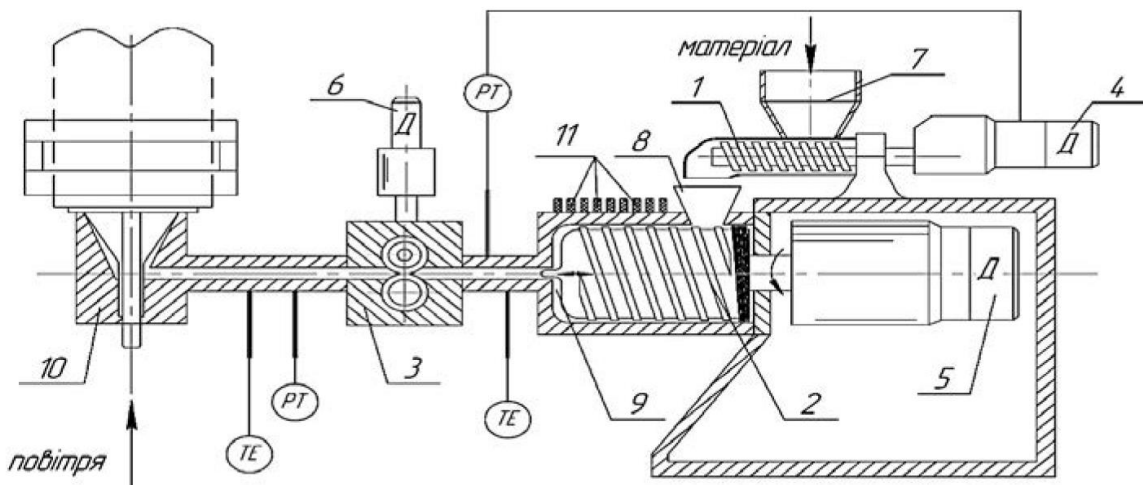


Рис. 2. Варіант структурно-функціональної схеми апаратурного оформлення каскадного шнекового екструдера [4]:

- 1 – дозатор; 2 – екструдер; 3 – шестеренний насос; 4, 5, 6 – приводи обертових органів екструдера; 7 – бункер;  
8 – завантажувальна горловина; 9 – торцевий робочий зазор дискового екструдера; 10 – формульний інструмент;  
11 – модульні зони нагрівачів з датчиками температури параметру; РТ – датчики тиску; ТЕ – датчики температури

Для стабілізації основного технологічного параметра процесу екструзії - температури розплаву полімеру - розробляються алгоритми корекції температурних режимів стінок в функціональних зонах та головці з урахуванням вимог виробників до теплового режиму обробки полімеру. Такі пристрої забезпечують збереження електроенергії та підвищують тривалість експлуатації нагрівачів.

Наведені відомості свідчать про складність контролю нагрівання в екструзії. При цьому налаштування температурних режимів вимагає врахування не тільки виду сировини, що обробляється, але й особливостей конкретного наявного обладнання. На вирішення частини вказаних проблем і були спрямовані дослідження авторів цієї роботи, що складаються із двох взаємопов'язаних частин.

**Постановка завдання.** Метою проведеної роботи є вивчення особливостей контролю нагрівання в екструзії, розробка автономних модулів терморегулювання для зонної переробки пластичних мас за цим методом, з'ясування домінуючих факторів впливу на прийняття рішення з проектування розробки. Основні до них вимоги: модульний принцип, однотипність; легке переналаштування в залежності від природи вихідної сировини та виду і конструктивних особливостей виготовляемого виробу; задовільний робочий діапазон, високі чутливість і точність підтримки заданого технологічного параметру; мала теплова інерція; надійність; відтворюваність; простота установки, управління, обслуговування; великий ресурс роботи. Розгляд всіх цих питань є виключно важливим з точки зору покращення якості виготовляемої продукції, підвищення ефективності робіт під час проектування та модернізації екструзійного обладнання та удосконалення його технологічних режимів.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Для практичної реалізації поставленого завдання вивчений накопичений досвід в області переробки високомолекулярних полімерних сполук, фізико-хімічних процесів поведінки і фазових перетворень складних за будовою термопластичних, терморективних, композиційних найбільш вживаних матеріалів; процесів руху та теплообміну нелінійних полімерних середовищ в умовах фазового переходу в каналах екструзійного обладнання; способи і режими технологічних перетворень; особливості проектування, роботи, експлуатації, продуктивності, енергоємності сучасного технологічного обладнання, його інноваційні тенденції розвитку.

Вихідні високополімери представляють собою дуже великий асортимент цінних конструкційних матеріалів. Їх застосування вимагає знання їх властивостей та їхньої змінності залежно від умов переробки та експлуатації.

За даними [8] полімери являють собою складні системи, побудовані з макромолекул, що взаємодіють між собою, а макромолекули складаються з ланок, що повторюються і з'єднані хімічними зв'язками. Міжмолекулярне зчеплення залежить від будови ланцюгів і вмісту в них груп, що заміщають водневі атоми. Взаємодія макромолекул призводить до упо-

рядкованого їхнього розташування (так званої надмолекулярної структури). Особливості поведінки структурних елементів полімерів у тепловому русі зумовлюють їх здатність до релаксації (здатність системи приходити у попередній стійкий стан після зняття збурюючої дії).

Для лінійних полімерів різний розвиток явищ релаксації дозволяє виділити три можливі стани:

1) склоподібний, що відповідає низьким температурам (можливі лише пружні деформації);

2) пружноеластичний, при якому можливі великі деформації, що при знятті напруги поступово зникають;

3) в'язкотекучий, характеризується пластичними деформаціями, що зберігаються після зняття навантаження (залишковими).

Ці стани лінійного полімеру розташовуються між двома температурними зонами: температурою склування та температурою плинності.

Поскілки температури склування і плинності залежать від будови макромолекул полімеру, то полімери, що володіють складним ланцюгом, можуть і не переходити у в'язкотекучий стан, якщо для них температура плинності вище за температуру деструкції (їх термічного хімічного розпаду). Вони виявляються терморективними на відміну термопластичним, здатних переходити кілька разів з одного стану в інший без хімічного руйнування.

Полімери за своїми механічними властивостями відрізняються від інших твердих і квазітвердих тіл (скла) через релаксаційні явища, що сильно проявляються. Закон нормальної пружності Гука до них мало застосовний, тому що відносна деформація залежить від багатьох змінних:

$$\varepsilon = f(T, \sigma, t),$$

де  $\varepsilon$  – відносна деформація ( $\Delta l/l$ ),  $T$  – температура,  $\sigma$  – механічна напруга,  $t$  – час. Найбільший вплив має температура, змінюючи стан лінійного полімеру. З узагальненої термомеханічної кривої  $\varepsilon = f(T)$  [8] при постійній механічній нарузі  $\sigma$  і часу навантаження  $t$  слідує, що залишкові пластичні деформації виникають при температурах вище температури плинності. Також показано, що при високих температурах поблизу температури плинності пружна деформація виникає практично миттєво і зникає також; наростання ж пластичних та пружноеластичних деформацій відбувається в часі.

**Особливості контролю нагріву в екструзії.** Складність поставленого завдання ще і в тому, що кожна зона нагрівання циліндра екструдера має довжину близько 350-450 мм. На кожній із них можна задати певну температуру, але стандартів для налаштування „правильної температури” не існує. Єдиною умовою є створення на першій та іноді другій зоні значення температури близької до показників, яке має набути розплав на виході. Підбір температури залежить від особливостей полімеру та конструкції шнека. Регулювання нагрівання проводиться в умовах ефективної тепловіддачі для запобігання перегріву. Регулювання проводити непросто. Це пов'язано з неможливістю контролю нагріву розпла-

ву від зсувних зусиль, які розвиваються шнеком, та залежать від швидкості подачі гранул і варіації теплової провідності вздовж циліндра.

Після стабілізації екструзивного процесу полімер розігрівається ще й від внутрішньої сили тертя та зсуву. Інтенсивність виділення тепла залежить від будови шнека, тиску розвиненого в головці та в'язкості полімерного розплаву. На деяких ділянках обладнання температура може перевищувати максимальні значення. У такому разі потрібне охолодження. Кожному екструдеру необхідний свій температурний режим для якісного нагріву. Температурне поле відповідне одному виду обладнання іншим буде недоцільним. Це стосується навіть однотипних установок. Температурне поле циліндра залежить ще й від створюваного тиску в головці екструдера, ступеня зносу шнека і циліндра, навколишніх умов та фізико-хімічних властивостей оброблюваного матеріалу. І підбір «правильного значення» температури циліндра визначається методом проб, враховуючи зміни температури, швидкість обертання шнека та зміну процесів екструзії.

На ділянці, в зонах нагріву, де відбувається гомогенізація полімеру, температура повинна відповідати температурам плавлення полімеру, які вказує виробник в технічній документації. Якщо нормовані температури, зазначені постачальником, не забезпечують якісний процес екструзування, їх доводиться коригувати самостійно.

Практика свідчить, що короткі екструдери (зі співвідношенням L/D від 24:1 до 26:1) мають 3-4 зони нагріву. Більш довгі установки (з співвідношенням L/D 30-32:1) часто мають 5-6 зон нагріву, дуже довгі (з співвідношенням L/D 34:1 і більше) можуть мати до 10 нагрівальних зон. Занижені температури на ділянках циліндра погіршують стабільність та ефективність розплавлення матеріалу, а зайво високі призводять до розкладання полімерів або до проблем в процесі охолодження.

Зрозуміло, для налаштування температурного профілю каналу екструдера контролювати температуру розплаву важко, а зрештою навіть марно. У гвинтовому каналі шнека завжди спостерігається перепад температурних значень. Краще контролювати температуру металевого корпусу циліндра, її й простіше стабілізувати. Контроль нагріву циліндра проводиться за допомогою термодатчиків. Реальний вплив температури металевої поверхні на оброблюваний матеріал опосередкований. Але, в будь-якому випадку необхідно створити стабільний режим обраної температури для обробки наявної композиції. Фактично вимірюється температура поверхні циліндра, тому слід ще й враховувати період стабілізації її реального впливу на розплав.

Екструдери зі шнеками однакової конфігурації, але з різними зонами нагріву вимагають індивідуального підбору температурних режимів. Інтенсивне нагрівання завантажувальної зони шнека може відбуватися через високий рівень стиснення або примусове внесення матеріалу. І навпаки, холодний неуцілюваний матеріал прослизає по стінках вузла завантаження та охолоджує циліндр. Якщо на одній із зон з ко-

роткими інтервалами включається охолодження, екструзування генерує зайве місцеве нагрівання на цій зоні. Тут потрібно відрегулювати температурну подачу нагрівачів або замінити шнек на більш відповідний по конструкції. Іноді слід впливати нижчими температурами, ніж необхідно для розплаву. Причиною цього є сильне нагрівання матеріалу від сил тертя та зсувних зусиль шнека. У такому випадку керування температурою матеріалу залежить від конструкції шнека та гвинтових каналів. Особливо це спостерігається при використанні бар'єрного шнека.

Для визначення теплового потоку в неусталених процесах найчастіше використовують методи, засновані на вимірі тієї чи іншої величини, що має малу інерційність. Температура тіла (стілки циліндра екструдера) у цьому випадку виявляється найбільш підходящим для вимірювання параметром. Для вимірювання температури поверхні циліндра у запропонованому варіанті використані хромель-алюмелеві термопари. Якщо датчик розглядати як напівобмежене тіло, то залежність теплового потоку, що віддається полімерному екструдату, від зміни температури поверхні виявляється однозначною функцією.

Сучасні виробничі агрегати характеризуються високою апаратною осначеністю, і найчастіше робота на них або проводиться з використанням елементів автоматизації, або повністю автоматизована. Ступінь їх автоматизації багато в чому залежить від цілей та завдань, які ставить перед собою виробник; від об'єму, серійності, специфічності виробництва; наявності відповідного устаткування; ступеня професіоналізму персоналу, що бере участь у його роботі; наявності належної технічної документації. При проведенні досить простих технологічних операцій витрати часу і коштів на повну автоматизацію можуть значно перевищити такі витрати на проведення їх звичайним шляхом або із застосуванням часткової автоматизації. Тому при оцінці доцільності та ступеня автоматизації необхідно враховувати такі фактори, як можливість проведення операцій без засобів автоматизації, розширення можливостей існуючого обладнання, покращення експлуатаційних показників установок.

Проведений докладний попередній аналіз особливостей екструзійної технології переробки пластмас і роботи технічних засобів її відтворення, з'ясування основних закономірностей процесів руху, теплообміну та плавлення полімерів у гвинтових каналах пластикуючих екструдерів, виявлення функціональних зон оброблення, ступінь впливу різних факторів на температуру стінки циліндра та розплаву полімеру вибудовують комплекс вимог до основ розробки складових компонентів апаратного забезпечення. В розділі постановки завдання дослідження сформульовані основні вимоги до засобів зонованого нагрівання для підтримки заданих робочих технологічних режимів. Опис структури, функціонування, робочих характеристик розробленого модульного варіанту такого спеціалізованого пристрою і приводиться нижче.

***Розробка пристрою для налаштування температурного профілю екструзійного каналу пере-***

**робки пластичних мас.** Запропоновано простий варіант пристрою керування для встановлення та регулювання профілю теплового зонованого поля екструзійного каналу переробки пластмас в залежності від виду вихідної сировини; вибору режимів для створення умов стабілізації ефективного проведення технологічного процесу й одержання заданої якості екструдата; конструкційних особливостей виготовляємої продукції; можливостей й досконалості основного і допоміжного оснащення, продуктивності його роботи.

В силу індивідуальності та малої повторюваності налаштувань режимів екструзійних агрегатів в основу положений автономний принцип побудови. Вхідний сигнал датчика в кожній робочій зоні вибирається виходячи з температурного діапазону з таблиці тарування хромель-алюмелевої термопари [9] відповідно до температурного профілю циліндра екструдера для конкретного виробництва. Функціо-

нування засобу добре узгоджується з імпульсно-цикловим мікропроцесорним керуванням робочими зонами тепломасообміну.

Робота пристрою (рис. 3) базується на фазовому методі керування потужністю, що підводиться до електричних нагрівників опору у відповідних технологічних зонах екструзійного циліндру. Він складається із датчика температури, первинного перетворювача (датчика температури - хромель-алюмелевої термопари, ТХА), вузла віднімання (ВВ) на основі диференціального операційного підсилювача, порогового пристрою (тригера Шмітта, ТШ), генератора з лінійним законом зміни напруги (ГЛЗН) для синхронізування роботи пристрою з частотою напруги живлення, блокунг-генератора (БГ), силового блока, схеми індикації режимів роботи пристрою, схеми індикації пориву кола термоперетворювача, параметричного стабілізатора двополярної напруги живлення.

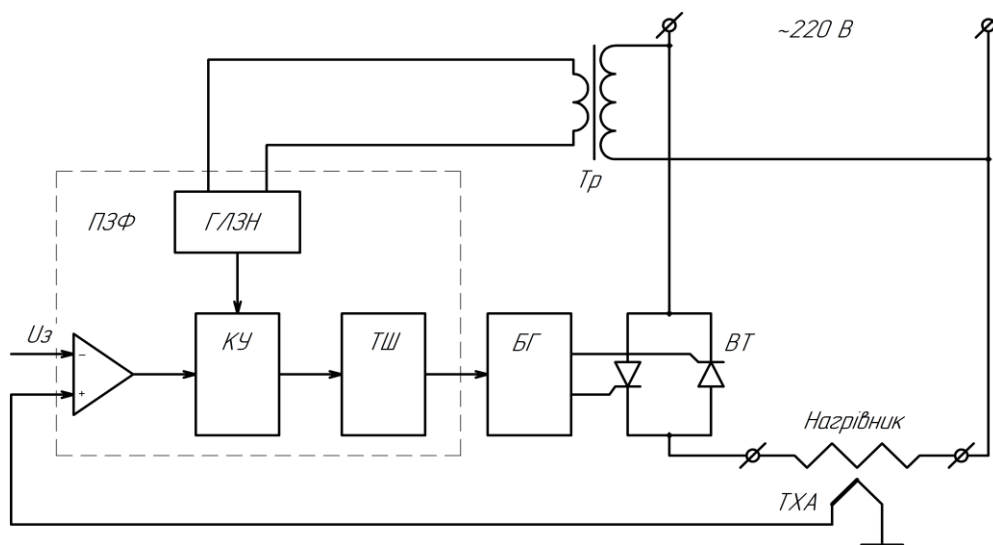


Рис. 3. Структурна схема автономного модуля терморегулювання для зонної переробки пластичних мас екструзією

Напруга датчика температури з прецизійного опорного джерела подається на інвертуючий вхід вузла віднімання.

Опорні значення технологічного параметру у кожній контрольній каналній точці агрегату задаються напругою, значення якої визначається стандартними даними градуовальної таблиці залежності термоЕРС від температури хромель-алюмелевої термопари (тип К) [9] та коригуються оптимізованими значеннями за результатами оцінювання попередніх тестових випробувань конкретного екструдера. На його неінвертуючий вхід приєднана хромель-алюмелева термопара, яка введена у ланцюг головного контуру негативного зворотного зв'язку системи регулювання. Вибір її типу зумовлений природною практично лінійною залежністю ЕРС від температури, яка характерна для електродів із хромель-алюмелевих сплавів. „Гарячий” спай термопари розташовується біля нагрівника й ізолюється тонким шаром термостійкого діелектрика. Різниця напруг датчика і термопари є сигналом похибки. На вході каскаду узгодження сигнал похибки складається з напругою формувача лінійно змінної напруги.

При умові:

$$U_{\text{вих.ВВ}} + U_{\text{вих.ГЛЗН}} \geq U_{\text{верх.нор.}}$$

на виході тригера Шмітта утворюються прямокутні імпульси, задній фронт яких „фіксований” і співпадає з кінцем робочого півперіоду напруги живлення в мережі, а передній фронт „зміщується” при зміні сигналу похибки в системі відслідковування терморегулюючого пристрою. Прямокутні імпульси, що формуються тригером Шмітта, керують роботою блокунг-генератора, на виході якого з’являються серії імпульсів загальною шириною, що відповідають тривалості прямокутних імпульсів. Блокунг-генератор застосовується для гальванічного розв’язування кола керування з силовою частиною регулюючого пристрою за допомогою імпульсного трансформатора. Імпульси зі вторинної обмотки трансформатора блокунг-генератора керують фазою відкриття силового тиристорного вентиля, здійснюючи таким чином пропорційне керування середньою потужністю нагрівача. Подача енергії в об’єкт здійснюється до тих пір, поки температура в ньому не досягне заданого значення. При цьому напруга на виході диференційного підсилювача наближається до нуля, і силовий вентиль закривається (призакривається).

Система повільно проходить через низку послідовних квазіблизьких станів, відтворюючи задану величину технологічного параметру у зоні нагрівання. Пристрій з таким лінійним додатковим ланцюгом негативного зворотного зв'язку виявляє слабку залежність від нестабільності вихідних компонентів і при великій глибині негативного зворотного зв'язку за потужністю забезпечує не тільки високу лінійність коефіцієнта передачі, але й слабку залежність вихідної потужності від коливань напруги живлення.

Перевагою даного способу при технічній його реалізації у системі керування нагрівниками у функціонально-технологічних зонах за відхиленням температурного параметра при вирішенні поставленої задачі - є використання у системі датчика параметра й лінійного негативного зворотного зв'язку природної лінійної залежності термо-ЕРС хромель-алюмелевих сплавів від різниці температури їх гарячого і холодного спайів, яка сьогодні не використовується в жодному подібному аналітичному засобі. Спосіб запатентований авторами [10]. Він являє інтерес за схемним і конструкційним шляхами вирішення проблеми формування закону регулювання температури об'єкта - простий, з високою чутливістю і хорошою розрізнявальною здатністю. Реалізується на сучасних комплектуючих елементах, які серійно виготовляються, і може бути запропонований для використання при вирішенні аналогічних задач.

Слід зауважити, що визначаючи параметри екструзійного потоку непрямими методами, необхідно враховувати додаткові похибки, не пов'язані з помилками вимірюваних величин. Додаткові похибки зумовлюються припущеннями та спрощеннями, які приймаються при емпіричному розгляді процесів руху і теплообміну ньютонівських середовищ при формуванні виробів із полімерних матеріалів.

### Висновки

Розроблено пристрій керування для встановлення та регулювання профілю теплового зонованого поля екструзійного каналу переробки пластмас в залежності від виду вихідної сировини; вибору режимів для створення умов стабілізації ефективного проведення технологічного процесу й одержання заданої якості екструдата; конструкційних особливостей виготовляємої продукції; можливостей й досконалості основного і допоміжного оснащення, продуктивності його роботи; ступеню підготовленості обслуговуючого персоналу до забезпечення виробництва. Згідно стандарту ІЕС 60584 1:2013 в якості опорних аналітичних сигналів в розробці використані відповідні стандартні значення різниці потенціалів типових градувальних таблиць термопар ТХА (тип К). Корегування середньої теплової потужності, що підводиться нагрівниками в окремих функціонально-технологічних зонах, здійснюється фазовим методом.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Extrusion: The Definitive Processing Guide and Handbook / Harold F. Giles Jr, John R. Wagner Jr., Eldridge M. Mount III // William Andrew, 2013 – 636 p.
2. Chan C. M. et al. Polypropylene/calcium carbonate nanocomposites //polymer. – 2002. – Т. 43. – №. 10. – 2981-2992 p.
3. Опис методу екструзії пластичних мас [Електронний ресурс]. – 2006. – Режим доступу до ресурсу: <https://etp.com.ua/ua/articles/news-101>.
4. Плешко О.В. Ресурсо-енергоощадний каскадний екструдер для переробки полімерних матеріалів / Плешко О.В., Швед М.П., Швед Д.М. Наукові праці Одеської національної академії харчових технологій. – Одеса. – 2013. Вип. 43, Т. 1 – С. 118-120.
5. Extruder Processing / Gregory A. Campbell, Paul G. Andersen // 2022, ISBN: 9781569908631 – 220 p.
6. Advanced Thermoforming: Methods, Machines and Materials, Applications and Automation / Sven Engelmann // John Wiley & Sons, 2012 – 352 p.
7. Thermoforming: A Plastics Processing Guide, Second Edition / Geza Gruenwald // Routledge, 2018 - 256 p.
8. Robust Process Development and Scientific Molding: Theory and Practice / Suhas Kulkarni // Carl Hanser Verlag GmbH & Company KG. 2017 - 390 p.
9. International Standard IEC 60584-1:2013 Thermocouples - Part 1: EMF specifications and tolerances. ICS 17.200.20 - Temperature-measuring instruments. ISBN 978-2-8322-1047-5
10. Пат. 43549 Україна. МПК G 05 D 23/00. Спосіб програмного формування лінійного закону зміни температури нагрівника / О.Г. Дрючко, Д.О. Стороженко, Н.В. Буякіна, І.О. Іваницька – у 2009 01783; Заявлено 02.03.2009; Опубл. 25.08.2009, Бюл. №16. – 10 с.

Received (Надійшла) 20.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

### Development of thermo-regulation modules for zone processing of plastic materials by extrusion

O. Dryuchko, O. Schefer, B. Boriak, N. Borozdin, V. Galai, R. Zakharchenko

**Abstract.** A control device has been developed for setting and correcting the profile of the thermal zoned field of the extrusion channel of processing plastic masses depending on the type of raw material; selection of modes to create conditions for stabilizing the effective implementation of the technological process and obtaining the specified quality of the extrudate; structural features of manufactured products; possibilities and perfection of the main and auxiliary equipment, productivity of its work; degree of preparedness of service personnel to ensure production. According to IEC 60584 1:2013, standard potential difference values of typical TXA thermocouple graduation tables (type K) were used as reference analytical signals in the development. Correction of the average thermal power supplied by heaters in certain functional technological zones is carried out by the phase method.

**Keywords:** plastics processing, extrusion method, thermal extrusion channel profile, control systems, design features.

Yevgeniy Bodyanskiy, Olha Chala

Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, Ukraine

## ADAPTIVE DOUBLE NEO-FUZZY NEURON AND ITS COMBINED LEARNING

**Abstract.** The **subject of the study** in the article is the process of data classification under conditions of fuzziness and a limited volume of training sample. **The goal** is to enhance the double neo-fuzzy neuron within the framework of solving the data classification task with constraints on the training sample volume, processing time, as well as fuzziness and non-stationarity of input data. **The tasks** include improving the double neo-fuzzy neuron to enhance the system's approximation properties and developing a combined system learning method to ensure fast performance in an online mode. **The approaches** used are lazy learning, supervised learning, and self-learning. The following **results** have been obtained: the double neo-fuzzy neuron has been modified by introducing a compressive activation function at the output, creating conditions for building a neo-fuzzy network capable of adapting to non-stationary input data in an online mode and avoiding the vanishing gradient problem. **Conclusion.** A combined learning method for the double neo-fuzzy neuron has been proposed, involving parallel utilization of lazy learning, supervised learning, and self-learning with the "Winner Takes All" rule, followed by automatic formation of membership functions, enabling fast online classification in the presence of outliers in the input data.

**Keywords:** fast data classification, online classification, fuzzy classification, short sample, neo-fuzzy neuron, combined learning.

### Introduction

Today, artificial neural networks (ANN) have been widely used to solve a wide range of problems related to Data Mining, primarily due to their universal approximating capabilities and their capacity to adjust their parameters (learn) by optimizing the adopted objective function (learning criterion). The main "building block" of ANN typically comprises elementary perceptrons by F. Rosenblatt, each using a particular nonlinear activation function (most referred to as the "squashing" activation function). Often, no more than three layers are required to achieve the necessary level of approximation accuracy from a different perspective. However, the training of ANN with a squashing activation function encounters significant computational challenges, often referred to as the "vanishing gradient" problem, which leads to a halt in the training process, causing network "paralysis". Consequently, modern deep neural networks (DNN) [1–3] have abandoned squashing functions (such as sigmoid and tanh) in favour of piecewise linear functions (ReLU, PReLU, etc.) whose derivatives are commonly used as activation functions, most of which do not yield zero values.

Since such activation functions do not fulfil the conditions of G. Cybenko's approximation theorem [4], ensuring the required accuracy necessitates DNNs to encompass a substantial number of layers, neurons, and synaptic weights. Consequently, this demands an expansion in the volume of training samples and setup time. Although the application of adaptive piecewise linear activation functions can expedite the learning process [5], the need for substantial amounts of training data persists.

This situation can potentially be enhanced through the utilization of advanced nodes in lieu of traditional neurons, with one such alternative being the neo-fuzzy neuron (NFN) [6, 7]. The advantages of neo-fuzzy neurons have been showcased in addressing various

problems [8, 9]. What sets a neo-fuzzy neuron apart is its integration of nonlinear synapses in place of traditional synaptic weights, with each synapse embodying the F-transform [10]. This approach facilitates universal approximating properties using a system of kernel membership functions, including conventional triangular functions that satisfy the conditions of unity partitioning. It's noteworthy that the neo-fuzzy neuron also offers piecewise linear approximation, the quality of which is significantly contingent on the count of membership functions within each nonlinear synapse.

A further progression in the evolution of the neo-fuzzy neuron is the Double Neo-Fuzzy Neuron (DNFN) [11, 12], which distinctively incorporates a non-linear synapse at its output (as opposed to an activation function), supplementing the non-linear synapses at the inputs. Importantly, the F-transform at the neuron's output can accommodate various forms of traditional activation functions, including squashing functions, without disrupting the vanishing gradient.

Both in NFN and DNFN, the number of membership functions in nonlinear synapses is predetermined (usually based on empirical considerations), evenly distributed along the abscissa axis. Enhanced approximation quality can be achieved by dynamically determining the requisite number of these functions and adapting the positioning of their centres. This necessitates an augmented training procedure that incorporates adjustments to the number and centres of membership functions. This innovation is anticipated to augment the precision of DNFN in comparison to systems with predetermined counts and shapes of activation functions - membership.

**The primary objective of this article** is to investigate and propose an alternative approach that overcomes the limitations encountered in traditional artificial neural networks (ANNs) and their training methodologies. In particular, we aim to address the

challenges associated with the "vanishing gradient" problem, which impedes the training process of ANNs with certain activation functions. Additionally, we seek to enhance the accuracy and efficiency of the adaptive learning process within neural networks.

### Architecture of the Double neo-fuzzy neuron

The DNFN architecture is shown in Fig. 1 and consists of  $n + 1$  nonlinear synapses  $NS_i, i = 0, 1, \dots, n$  the scheme of which is shown in Fig. 2.

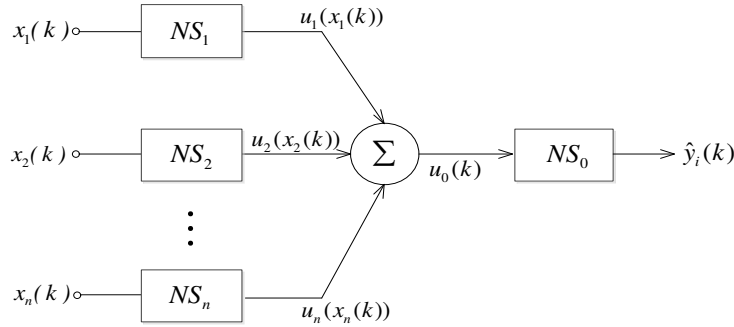


Fig. 1. Double neo-fuzzy neuron

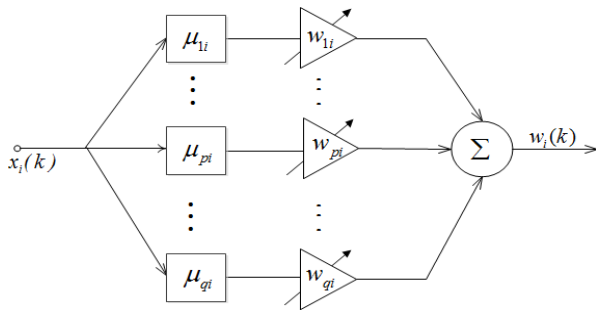


Fig. 2. Nonlinear synapse

The input information for training is a sample of vector observations  $X = \{x(1), x(2), \dots, x(k), \dots, x(N)\}$ ,  $x(k) = (x_1(k), \dots, x_i(k), \dots, x_n(k))^T \in R^n$ , where  $k$  or the observation number in the sample, if it is specified a priori in the batch form, or the number of the moment of the current time, if the training is carried out online as the action information is received for processing. Each nonlinear synapse contains  $q$  membership functions  $\mu_{ip}(u_i), p = 1, \dots, q; i = 1, 2, \dots, n$ ; and  $\mu_{p0}(u_0)$  in the output layer and  $q$  tuned synaptic weights (one for each membership function)  $W_{ip}$  and  $W_{p0}$ . In this way, nonlinear synapses implement the transformation adaptive double neo-fuzzy neuron (DNFN) its combined learning.

$$\begin{cases} u_i(x_i(k)) = \sum_{p=1}^q \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k), \\ \hat{y}(k) = \sum_{p=1}^q \mu_{p0}(u_0(k))w_{pi}(k). \end{cases} \quad (1)$$

It is also easy to write down the transformations implemented by DNFN as a whole:

$$\begin{cases} u_{0i}(k) = \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^q \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k), \\ \hat{y}(k) = \sum_{p=1}^q \mu_{p0} \sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^q \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k)w_{p0}(k). \end{cases} \quad (2)$$

Triangular ones satisfying the Ruspini conditions are most often used as the membership function in NFN, due primarily to numerical simplicity, although the use of other functions, such as B-Splines, is not excluded.

If the input data is pre-encoded on the interval  $[0, 1]$ , and their centers  $c_{pi}$  and  $c_{p0}$  evenly spaced on the abscissa axis  $\Delta = c_{p+1,i} - c_{pi}$ , it is easy to see that  $\Delta = c_{p+1,i} - c_{pi} = (q-1)^{-1}$ , namely, these functions can be written in the form

$$\mu_{1i}(x_i) = \begin{cases} (c_{2i} - x_i)c_{2i}^{-1} & \text{if } x_i \in [0, c_{2i}], \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (3)$$

$$\mu_{pi}(x_i) = \begin{cases} (x_i - c_{p-1,i})(c_{pi} - c_{p-1,i})^{-1} & \text{if } x_i \in [c_{p-1,i}, c_{pi}], \\ (c_{p+1,i} - x_i)(c_{p+1,i} - c_{pi})^{-1} & \text{if } x_i \in [c_{pi}, c_{p+1,i}], \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (4)$$

$$\mu_{qi}(x_i) = \begin{cases} (x_i - c_{q-1,i})(1 - c_{q-1,i})^{-1} & \text{if } x_i \in [c_{q-1,i}, 1], \\ 0 & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (5)$$

for the input layer of nonlinear synapses. For a nonlinear synapse DNFN can be written

$$\mu_{10}(u) = \begin{cases} (c_{20} - u_0)c_{20}^{-1} & \text{if } u_0 \in [0, c_{20}], \\ 0 & \text{otherwise,} \end{cases} \quad (6)$$

$$\mu_{p0}(u) = \begin{cases} (u_0 - c_{p-1,0})(c_{p0} - c_{p-1,0})^{-1} & \text{if } u_0 \in [c_{p-1,0}, c_{p0}], \\ (c_{p+1,0} - u_0)(c_{p+1,0} - c_{p0})^{-1} & \text{if } u_0 \in [c_{p0}, c_{p+1,0}], \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$



$$\mu_{p0}(u) \begin{cases} (u_0 - c_{p-1,0})(1 - c_{p-1,0})^{-1} \\ \quad \text{if } u_0 \in [C_{p-1,0}, 1], \\ 0 \text{ otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

a feature of the membership function used in DNFN is that at each time instant  $k$  only two neighbouring functions are-fired. Suppose that the component of the input vector  $x(k)$  belongs to the interval  $C_{pi} < x_i(k) < C_{p+1,i}$ , that is, only two adjacent functions are fired  $\mu_{pi}(x_i(k))$  and  $\mu_{p+1,i}(x_i(k))$ .

It is easy to calculate that the signal at the input of the  $i$ -th input  $NS_i$  can be represented in the form:

$$\begin{aligned} u_i(x_i(k)) &= \sum_{p=1}^q \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k) = \\ &= \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi}(k) + \mu_{p+1,i}(x_i(k))w_{p+1,i}(k) = \\ &= (c_{p+1,i} - x_i(k))(c_{p+1,i} - c_{pi})^{-1}w_{pi}(k) + \\ &+ (x_i(k) - c_{pi})(c_{p+1,i} - c_{pi})^{-1}w_{p+1,i}(k) = \\ &= a_i(k)x_i(k) + b_i(k) \end{aligned} \quad (9)$$

where

$$\begin{cases} a_i(k) = (w_{p+1,i}(k) - w_{pi}(k))(c_{p+1,i} - c_{pi})^{-1} \\ b_i(k) = \begin{pmatrix} c_{p+1,i}w_{pi}(k) - \\ -c_{pi}w_{p+1,i}(k) \end{pmatrix} (c_{p+1,i} - c_{pi})^{-1}. \end{cases} \quad (10)$$

and the signal at the adder input:

$$u_0(k) = \sum_{i=1}^n a_i(k)x_i(k) + b_i(k). \quad (11)$$

Then the DNFN output signal in general can be written as

$$\begin{aligned} \hat{y}(k) &= \sum_{p=1}^q \mu_{p0}(u_0(k))w_{p0}(k) = \\ &= \mu_{p0}(u_0(k))w_{p0}(k) + \mu_{p+1,0}(u_0(k))w_{p+1,0}(k) = \\ &= (c_{p+1,0} - u_0(k))(c_{p+1,0} - c_{p0})^{-1}w_{p0}(k) + \\ &+ (u_0(k) - c_{p0})(c_{p+1,0} - c_{p0})^{-1}w_{p+1,0}(k) = \\ &= a_0(k)u_0(k) + b_0(k) \end{aligned} \quad (12)$$

where

$$\begin{cases} a_0(k) = (w_{p+1,0}(k) - w_{p0}(k))(c_{p+1,0} - c_{p0})^{-1} \\ b_0(k) = \begin{pmatrix} c_{p+1,0}w_{p0}(k) - \\ -c_{p0}w_{p+1,0}(k) \end{pmatrix} (c_{p+1,0} - c_{p0})^{-1}. \end{cases} \quad (13)$$

It is easy to see that  $NS_0$  at the DNFN output does not play the role of an activation function in F. Rosenblatt's neuron, and in some sense is close to the PReLU function popular in DNN, however, in our case, this activation function is configured, implements the F-transformation and can accept you are a complicated shape.

Finally, the transformation implemented by DNFN can be implemented in the form

$$\hat{y}(k) = a_0(k) \left( \sum_{i=1}^n a_i(k)x_i(k) + b_i(k) \right) + b_0(k), \quad (14)$$

that is, a piecewise linear approximation of some ringing function is provided, the quality of which depends on the number of readings (belonging functions)  $q$ , the location of the centres of these functions and  $(n+1)q$  synaptic weights, which is adjusted during the learning process.

### A training procedure of the Double neo-fuzzy neuron

The tuning of DNFN synoptic weights is implemented by gradient minimization (tutored learning) of the objective function, which is commonly used in training and ANNs.

$$\begin{aligned} E(k) &= (y(k) - \hat{y}(k))^2 = (y(k) - \\ &- \sum_{p=1}^q \mu_{p0} \left( \sum_{i=1}^n \mu_{pi}(x_i(k))w_{pi} \right) w_{p0})^2 = \\ &= (y(k) - a_0 \left( \sum_{i=1}^n a_i x_i(k) + b_i \right) - b_0) \end{aligned} \quad (15)$$

where  $y(k)$  -external reference signal.

The learning process at each moment  $k$  is implemented in two stages: adjustment of the synoptic weights of the original nonlinear synapse  $NS_0$  setting the weights of input signals  $NS_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$ .

At the same time, it is noticeable that only the weights corresponding to the membership functions are adjusted  $\mu_{pi}$  and  $\mu_{p+1,i}$ , which are currently  $k$  have zero values.

At the same time, the learning process can be left as it is

$$\begin{cases} w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k) - \eta_p(k)l(k)\mu_{l0}(u(k)), \\ l = p, p+1 \\ w_{l0}(k+1) = w_{l0}(k) \quad \forall l \neq p \neq p+1, \end{cases} \quad (16)$$

where  $l(k) = y(k) - \hat{y}(k)$  - learning error,  $\eta_0(k) > 0$  - learning rate parameter, which means speed of convergence.

This process can be optimized for speed by using a modification of the Kaczmarz-Widrow-Hoff algorithm [13, 14]:

$$\begin{cases} w_{p0}(k+1) = w_{p0}(k) + \\ \quad + \frac{l(k)\mu_{p0}(u(k))}{\mu_{p0}^2(u(k)) + \mu_{p+1,0}^2(u(k))}, \\ w_{p+1,0}(k+1) = w_{p+1,0}(k) + \\ \quad + \frac{l(k)\mu_{p+1,0}(u(k))}{\mu_{p0}^2(u(k)) + \mu_{p+1,0}^2(u(k))}. \end{cases} \quad (17)$$

In the case when the input data is disturbed by interference, an algorithm with additional filtering properties can be used [15]

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{p0}(k+1) = w_{p0}(k) + \\ \quad + \eta_0^*(k)l(k)\mu_{p0}(u(k)), \\ w_{p+1,0}(k+1) = w_{p+1,0}(k) + \\ \quad + \eta_0(k)l(k)\mu_{p+1,0}(u(k)), \\ \eta_0^*(k) = (\eta_0\eta_0^*(k-1) + \mu_{p0}^2(u(k)) + \\ \quad + \mu_{p+1,0}^2(u(k)))^{-1}. \end{array} \right. \quad (18)$$

where  $0 \leq \eta_0 \leq 1$  is a forgetting factor.

To adjust the synaptic weights of the first layer of non-linear synapses  $NS_i$ , a standard S-rule training method can be used.

Let us consider the derivatives of the objective function.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E(k)}{\partial w_{li}} &= -l(k) \frac{\partial \hat{y}(k)}{\partial u_0(k)} \cdot \frac{\partial u_0(k)}{\partial w_{li}} = \\ &= -l(k)a_0(k) \frac{\partial u_0(k)}{\partial w_{li}} \end{aligned} \quad (19)$$

and  $\delta$  is an error.

$$\delta(k) = l(k)a_0(k). \quad (20)$$

It is easy to write down the gradient learning procedure

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{li}(k+1) = w_{li}(k) + \eta_i(k)\delta(k)\mu_{li}(x_i(k)), \\ l = p, p+1, \\ w_{li}(k+1) = w_{li}(k) \forall l \neq p \neq p+1. \end{array} \right. \quad (21)$$

Optimized versions of this procedure take shape accordingly

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{pi}(k+1) = w_{pi}(k) + \\ \quad + \frac{\delta(k)\mu_{pi}(x_i(k))}{\mu_{pi}^2(x_i(k)) + \mu_{p+1,i}^2(x_i(k))}, \\ w_{p+1,i}(k+1) = w_{p+1,i}(k) + \\ \quad + \frac{\delta(k)\mu_{p+1,i}(x_i(k))}{\mu_{pi}^2(x_i(k)) + \mu_{p+1,i}^2(x_i(k))}. \end{array} \right. \quad (22)$$

and

$$\left\{ \begin{array}{l} w_{pi}(k+1) = w_{pi}(k) + \\ \quad + \eta_i^*(k)\delta(k)\mu_{pi}(x_i(k)), \\ w_{p+1,i}(k+1) = w_{p+1,i}(k) + \\ \quad + \eta_i^*(k)\delta(k)\mu_{p+1,i}(x_i(k)), \\ \eta_i^*(k) = (\eta_i\eta_i^*(k-1) + \mu_{pi}^2(x_i(k)) + \\ \quad + \mu_{p+1,i}^2(x_i(k)))^{-1}, \\ 0 \leq \eta_i \leq 1. \end{array} \right. \quad (23)$$

It is possible to improve the approximate properties of DNFN by adjusting not only the synoptic weights of linear synapses, but also the number of membership functions and the location of their centres. Self-learning methods without a teacher and lazy learning based on the principle of "Neurons at data points" [16] can be used for this.

Usually, the number of membership functions in non-linear synapses  $q$  is given by  $p$  empirical considerations and the weights are placed uniformly with an interval  $\Delta$ . Let us consider the threshold of indistinguishability of two neighbouring centres  $\delta \ll \Delta$  let's start the learning process with the entry into the system of the first observation of the training sample  $x(1) = x_1(1), \dots, x_i(1), \dots, x_n(k)^T$ . The first function of belonging  $x \mu_{1,i}(x_i(1))$  is formed so that its centre  $c_{1,i}(x_i(1))$ . Then with the arrival of the second observation  $x(2)$  the condition is checked  $|x_i(2) - c_{1,i}(2)| \leq \delta$  and if it is performed for some components of the input signals, then new centres are not formed at these inputs.

If the condition is fulfilled (on several inputs)  $\delta < |x_i(2) - c_{1,i}| < 2\delta$ , coefficients of centers  $c_{1,i}$  adjusted according to the self-learning rule "Winner Takes All" [17], introduced by T. Kohonen

$$c_{1,i}(2) = c_{1,i}(1) + \eta_0(2)(x_i(2) - c_{1,i}(1)). \quad (24)$$

With the learning threshold parameter  $\eta_0(2) < 1$  if the inequality holds for some components  $2\delta < x_i(2) - c_{1,i}(2)$ , then the second membership function is formed at the  $i$ -th input  $\mu_{q_i}$  with centre  $c_{2,i} = x_i(2)$ . During the second learning cycle, the number of membership functions in synapses  $NS_i$  may be different. On the  $N$ -th self-learning step with input signal  $x(N)$  membership functions are solved for each nonlinear synapse the membership function- winner is sought  $\mu_{pi}^*(x_i(N-1))$  for which the distance  $|x_i(N) - c_{pi}(N-1)|$  is minimal and the following rules are checked:

$$\left\{ \begin{array}{l} |x_i(N) - c_{pi}^*(N-1)| \leq \delta, \\ \delta < |x_i(N) - c_{pi}^*(N-1)| \leq 2\delta, \\ 2\delta < |x_i(N) - c_{pi}^*(N-1)| \end{array} \right. \quad (25)$$

after which at the  $i$ -th input in the linear synapse  $NS_i$  or is not formed or adjusted or a new (and last) membership function is created  $\mu_{q_i}(x_i)$  with the centre  $C_{q_i}$ . Thus, in each nonlinear synapse, the number of membership functions can vary from two (in the case of binary input signals) to  $N$  (in the case of a small indistinguishability threshold  $\delta$ ). Similarly, the membership functions of the nonlinear synapse can be configured  $NS_0$  at the output where DNFN.

## Conclusion

To enhance the widely known neo-fuzzy neuron (NFN) referred to as the Double neo-fuzzy neuron, which exhibits enhanced approximative capabilities when compared to its prototype, a novel combined learning approach is introduced. This approach is grounded in tutored learning, self-learning, and lazy learning principles. Through this methodology, the aim is to achieve optimal rapidity in configuring the synoptic

weights of nonlinear synapses, along with the automatic formation of membership functions, all implemented in real-time online mode.

Importantly, the proposed method doesn't necessitate substantial amounts of training data. Instead, it's characterized by its computational simplicity, rendering it applicable in diverse scenarios. This method holds promise in creating a double neo-fuzzy system capable of effectively adapting to phasing systems, even within the constraints of a limited training dataset.

## REFERENCES

1. Aggarwal CC (2018) Neural networks and deep learning: a textbook. Springer, Cham, Switzerland
2. Bengio Y, Cun YL, Hinton G (2015) Deep learning. Nature 521:436–444
3. Goodfellow I, Bengio Y, Courville A (2016) Deep Learning. MIT Press
4. Cybenko G (1989) Approximation by superpositions of a sigmoidal function. Math Control Signal Systems 2:303–314. <https://doi.org/10.1007/BF02551274>
5. Bodyanskiy YV, Tyshchenko OK (2020) A hybrid cascade neural network with ensembles of extended neo-fuzzy neurons and its deep learning. Advances in Intelligent Systems and Computing 945:164–174
6. Yamakawa J, Uchino E, Miki J, Kusanagi H (1992) A neo-fuzzy neuron and its application to system identification and prediction of the system behavior. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Fuzzy Logic & Neural Networks. Iizuka, Japan
7. Miki T (1999) Analog Implementation of Neo-Fuzzy Neuron and Its On-board Learning
8. Zurita D, Delgado M, Carino JA, et al (2016) Industrial Time Series Modelling by Means of the Neo-Fuzzy Neuron. IEEE Access 4:6151–6160. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2016.2611649>
9. Bodyanskiy YV, Kokshenev I, Kolodyazhnyi V (2003) An adaptive learning algorithm for a neo fuzzy neuron. In: Wagenknecht M, Hampel R (eds) Proceedings of the 3rd Conference of the European Society for Fuzzy Logic and Technology, Zittau, Germany, September 10-12, 2003. University of Applied Sciences at Zittau/Görlitz, Germany, pp 375–379
10. Perfilieva I (2006) Fuzzy transforms: Theory and applications. Fuzzy Sets and Systems 157:993–1023. <https://doi.org/10.1016/j.fss.2005.11.012>
11. Bodyanskiy Dr.-Ing. habil. Y, Gorshkov M.Sc. Y, Kolodyazhnyi Dr.-Ing. V, et al (2007) Evolving network based on double neo-fuzzy neurons. Computer science meets automation: 52 IWK, Internationales Wissenschaftliches Kolloquium; proceedings; 10 - 13 September 2007; Volume I 52, 2007, Vol. 1:35–40
12. Hu Z, Bodyanskiy YV, Tyshchenko OK, Samitova VO (2017) Fuzzy clustering data given on the ordinal scale based on membership and likelihood functions sharing. International Journal of Intelligent Systems and Applications 9:1–9
13. Kaczmarz S (1993) Approximate solution of systems of linear equations. International Journal of Control 57:1269–1271. <https://doi.org/10.1080/00207179308934446>
14. Widrow B, Hoff ME (1960) Adaptive Switching Circuits. IRE WESCON Convention Record
15. Bodyanskiy Y, Kolodyazhnyi V, Stephan A (2001) An Adaptive Learning Algorithm for a Neuro-fuzzy Network. Computational Intelligence Theory and Applications Fuzzy Days 2206:68–75
16. Zahirniak DR, Chapman R, Rogers SK, et al (1990) Pattern recognition using radial basis function network. Aerospace Application of Artificial Intelligence 249–260

Received (Надійшла) 16.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

## Адаптивний подвійний нео-фаззі нейрон та його комбіноване навчання

Є. В. Бодянський, О. С. Чала

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процес класифікації даних за умов нечіткості та обмеженого об'єму навчальної вибірки. **Метою** є удосконалення подвійного нео-фаззі нейрона в рамках вирішення задачі класифікації даних із обмеженнями щодо об'єму тренувальної вибірки, часу обробки, а також нечіткості та не стаціонарності вхідних даних. **Завдання:** удосконалення подвійного нео-фаззі нейрона для покращення апроксимаційних властивостей системи, а також розробка комбінованого методу навчання системи для забезпечення швидкої в онлайн режимі. Використовуваними **підходами** є: лінійне навчання, навчання з учителем та самонавчання. Отримані наступні **результати**. Модифіковано подвійний нео-фаззі нейрон, запропоновано метод комбінованого навчання, що забезпечує оптимальну швидкість при налаштуванні синоптичних ваг та автоматичне формування функцій належності в онлайн-режимі за умов обмеженої навчальної вибірки. **Висновки.** Удосконалено подвійний нео-фаззі нейрон шляхом введенням стискаючої активаційної функції на виході, що створює умови для побудови нео-фаззі мережі з можливістю адаптації до нестационарних вхідних даних за умови роботи в онлайн режимі, а також уникнути проблеми зникаючого градієнту. Запропоновано комбінований метод навчання подвійного нео-фаззі нейрону, який передбачає паралельне використання лінійного навчання, навчання з учителем та самонавчання за правилом «Переможець забирає все» з подальшим автоматичним формуванням функцій належності, що дає можливість швидкої класифікації в режимі онлайн за умови наявності викидів у вхідних даних.

**Ключові слова:** швидка класифікація даних, класифікація в онлайн режимі, нечітка класифікація, коротка вибірка, нео-фаззі нейрон, комбіноване навчання.

В. Б. Важинський, В. М. Ткачов

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

## ПРОБЛЕМАТИКА БЕЗПЕКИ ТА КРИТЕРІЇ НАДІЙНОСТІ МУЛЬТИХМАРНИХ СЕРЕДОВИЩ

**Анотація.** Мета статті – познайомитися з проблематикою безпеки мультимарних середовищ і проаналізувавши причини виникнення цих проблем сформувавши на їх основі власні критерії безпечної хмари. Викладені головні проблеми та критерії надійності мультимарних середовищ для подальшого їх аналізу. Було освітлено пріоритетні міні-проблеми, які мають зв'язок з головними. **Завдання:** проаналізувати будь-які інформаційні джерела за напрямом та відповідною темою, окреслити проблеми та пов'язані з ними загрози і ризики в області хмарної безпеки, проаналізувати основних провайдерів хмарних послуг, розглянути перспективи і застосування на ринку, довести доцільність використання підходу мультимарності, сформувавши власні критерії безпечності хмарних систем. **Результати дослідження.** В цій статті при знайомстві з хмарним світом і історією його виникнення, а також при розгляді через призму розвитку популярності хмар в якості IT-тренду наведені існуючі ризики та загрози виникнення сучасних дірок безпеки в хмарному секторі, які сповільнюють подальший розвиток IT-індустрії. Описані фундаментальні проблемні моменти роботи хмарних обчислень в інфраструктурі. Проведено порівняльний аналіз найвигідніших сучасних хмарних систем, що задають темп іншим організаціям хмарного ринку. Досліджено доцільність та область використання хмарних середовищ. Запропоновані загальні критерії надійності виправленого хмарного продукту, на основі причин виникнення проблем мультимарних середовищ. **Висновок.** Закладено основу для подальшого майбутніх досліджень хмарної безпеки, розробки рішення по забезпеченню надійності хмарних систем та вдосконаленню наявних компонентів хмарних технологій в IT-інфраструктурі.

**Ключові слова:** мультимарне середовище, хмарна безпека, хмарні обчислення, мультимарність, критерії надійності, кіберзлочинець, IT-інфраструктура.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Нарощування об'ємів цифрового кода відбувається в неконтрольованій геометричній прогресії, тому на сьогодні, ризиковано залишати важливі відомості на локальному носії, для цих випадків вже створений тип програмно-технічного середовища. Прикладом вищеописаного довкілля є хмара, її простий спосіб експлуатації та некоректно налаштований доступ до розташованих в ній об'єктів, становить загрозу надійності всієї системи. Також зі збільшенням кількості хмарних продуктів зростає складність їх інтеграції, контролю, розробки та забезпечення ефективної, стабільної та безпечної роботи. Перераховані міні-проблеми, якщо їх не вирішити або частково не зменшити їх негативний вплив, можуть перетворити надії та гарантії успішності роботи в хаос. У результаті, не релевантні методи забезпечення ефективного рівня безпеки або їх відсутність викликать серйозні занепокоєння щодо втрати або витіку даних організації та її клієнтів. Зараз також в нашому сучасному світі, актуально захистити кожен збережений біт інформації і підібрати наявні підходи або у разі необхідності відновити вже втрачені файли. При бурхливому розвитку хмарних технологій та бажанні бізнесменів, швидко зробити власний продукт максимально легким та зручним, мало приділяли уваги до безпеки. Наразі ключовими факторами сповільнення вирішення питань безпеки все ще є людський фактор, не вигідні втрати продуктивності заради захисту продукту та складність комплексу з урахуванням індивідуальних обмежень компанії в залежності від завдання. Хмари все більше вбудовуються в наше життя і тепер з кожним кроком їх розвитку, користувачі переконані що такий невинуватий темп пов'язаний з потребами жадібного

ринку споживачів, які не дають шансу розробникам проектів або стартапів хоча б на середній рівень задовільнити вимоги до безпеки. Таким чином монополні компанії в маркетинговій гонці за грошима будуть успішно втрачати репутацію, коли клієнти сконцентруються на більш вигідних унікальних рішеннях конкурентів. Зараз як ніколи це актуально, під час сурової конкуренції між технологічними-технічними компаніями, клієнт має максимальну вигоду за рахунок одночасної взаємодії різних хмарних сервісів з інфраструктурою та платформами серверів. Якщо ми кажемо про масштаби цілої організації, тоді не створюють з нуля нові рішення та відповідно їм додаткові перепони для бізнесу, завжди застосовують і вдосконалюють існуючі стратегії в IT-сфері, наприклад, мультимарність. Завдяки хмарній інфраструктурі, користувачі можуть, будь-де, при наявності доступу до хмари, в зручний час використовувати розподілені ресурси для дій при виконанні різноманітних завдань. Значить будь-яка вразлива частина або вузол, який був зламаний, IT-інфраструктури при задіянні декількох хмар може стати ризиковою системою №1. Окремо, хочеться наголосити, що додатковим економічним тягарем для юридичних та публічних обличчя є складність забезпечення конфіденційності даних. В хмарних продуктах, при впровадженні хмарних обчислень співробітникам корпорацій не вистачає знань та досвіду, щоб перевірити, які елементи інфраструктури під безпекою. Звідси пішла необхідність більш детально досліджувати даний напрям з різних боків в плані безпеки та надійності хмар. На мою думку, чим більше якісних досліджень ми зробимо, тим швидше наші праці дадуть шанс вирішити поточні проблеми або зменшити поганий вплив на IT-сферу. Освітливши насущні проблеми надійності хмарного сектору і на основі

причин їх виникнення, необхідно знайти критерії безпечної хмари, щоб вони стали орієнтиром для знаходження або створення, у майбутньому, методу забезпечення надійності хмарних систем. Звісно необхідно врахувати роботу інших діячів для подальшого якісного та унікального дослідження. Не дивлячись на новизну технології, пов'язаною з хмарами, вони в подальшому обов'язково будуть незамінними ще декілька років та можливо стануть частиною нових винаходів, але без рішень сучасних проблем, хмарні перспективи залишаться нездійсненою мрією.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В веб-сайті [1] стисло проведена екскурсія по хмарному світу. Унікальні статистичні дані взяті з джерела [2] і там же вони детально описані. Наукова стаття [3] надає нам готовий результат аналізу різних хмарних продуктів нашого часу. Електронний ресурс [4] розповідає про актуальність та необхідність у використанні мультихмарності в бізнесі. Робота [5] показує наявні документи по хмарним питанням. В інтернеті [6] описаний окремий розділ комп'ютерної безпеки – безпека хмарних обчислень.

**Мета статті** – познайомитися з проблематикою безпеки мультихмарних середовищ і проаналізувавши причини виникнення цих проблем сформулювати на їх основі власні критерії безпечної хмари.

### Виклад основного матеріалу

Людство, після цифрової революції минулого сторіччя та реалізації концепції хмарних обчислень, настільки пришвидшила свій технологічний прогрес, що вийшла на новий рівень можливостей і паралельно з ними з'являються нові або погіршуються раніше невирішені проблеми надійності інформації. Наприклад: ефективність потужних мереж, низька вартість обладнання та пристроїв зберігання і обробки, а також необхідне масштабне вбудовування віртуалізації. Саме такі досягнення створили основу для проблем із-за пов'язаних з ними потенційних загроз та ризиків інформаційної безпеки, які будуть специфічними для хмар та обчислень. Варто згадати що, єдина перша складова навколишнього світу – це інформація, необмежений доступ до неї став ключовою подією у сучасній історії. Тому зараз, компанії усві-

домлюють, що задіяння хмари – це геніальний шанс щоб, легко, швидко та за незначну вартість, отримати доступ до найкращих додатків у своїй галузі. Але із-за зросту конфіденційної інформації, яка розміщується в хмарі, починає зростати занепокоєння з приводу того, наскільки безпечним є це середовище.

Щоб повністю і точно розгледіти всю глибину проблем, потрібно хоча б поверхнево відповісти на ряд логічних питань:

- 1) З чого почалася ідея зі створення інформаційної хмари і як далі вона розвивалася в ідеал?
- 2) Наскільки зараз важливі хмарні технології для нас і яка область їх застосування на ринку ІТ-індустрії?
- 3) Хто є головними постачальниками хмарних середовищ?
- 4) Які існують плани, перспективи та шанси у подальшому для хмарного напрямку?

Перед послідовної відповіддю на перераховані питання, краще почати з маленької історичної довідки та визначенням хмарних обчислень.

Згідно з визначенням Національного інституту стандартів і технології (NIST) США, Хмарні обчислення (від англ. Cloud Computing) — це модель забезпечення повсюдного та зручного доступу на вимогу, через мережу до спільного пулу обчислювальних ресурсів, що підлягають налаштуванню (наприклад, до комунікаційних мереж, серверів, засобів збереження даних, прикладних програм та сервісів), і які можуть бути оперативно надані та вивільнені з мінімальними управлінськими затратами та зверненнями до провайдера [1]. Першим же кроком до втілення хмарних обчислень можна вважати появу ASP (Application service provider - провайдери послуг доступу до додатків) у другій половині 1990х років. ASP можна вважати одними із перших SaaS сервісів. Пальма першості належить сервісу електронної пошти від компанії Hotmail. Але відсутність на той час широких каналів інтернет та технологій віртуалізації стали на перепоні - за відсутності швидких та стабільних каналів інтернет користувачі не могли отримати якісні послуги, а без технологій віртуалізації неможливо було ефективно та гнучко розподіляти ресурси та масштабувати сервіси (рис. 1) [1].

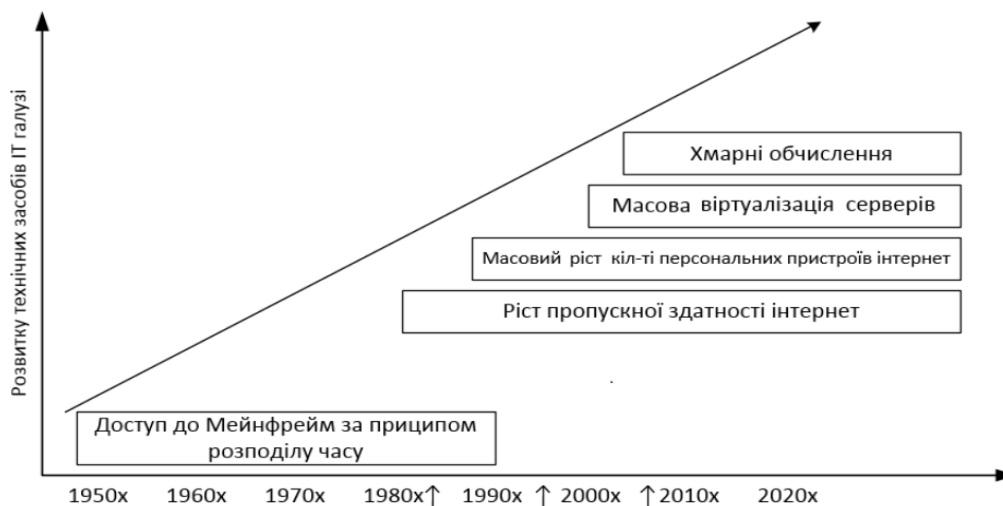


Рис. 1. Розвиток ІТ галузі (джерело: [1, С. 1])

В цей момент доцільно наголосити що хмарочки залишаються актуальними, тому що на сьогоднішній день задовольняють запити більшості користувачів. Вони це довели не тільки в теорії, але і в своїй справі. У глобальному вимірі, хмарні сервіси розповсюджені у багатьох галузях. Відповідно, за галузевим розподілом перше місце посідає ІТ-сектор (50 %), друге – сфера фінансових послуг (14 %), третє – державний сектор (рис. 2) [2].

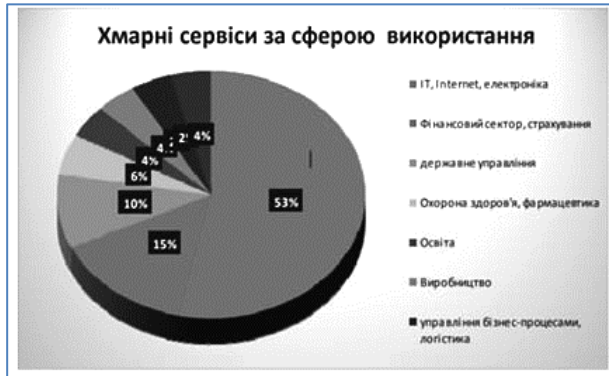


Рис. 2. Розповсюдженість хмарних сервісів за сферою використання (джерело: [2, С.3])

Для перерахування факторів виникнення проблем та їх самих з подальшим описом, важливо проаналізувати проблемні місця – хмарні продукти. За кожною хмарою стоїть свій провайдер, в такому ареалі не багато основних постачальників, згідно статистики приблизно дві третини ринку заняті проектами великих корпорацій такими як: Amazon Web Services, Microsoft Azure, Google Cloud Platform.

На їх прикладі, ми можемо побачити більшість сучасних проблем хмар, тому що ці компанії-виробники зараз задають темп розвитку хмар на ринку (табл. 1) [3].

Таблиця 1 – Популярні послуги хмарних обчислень (джерело: [3, С.4])

	Google Cloud Platform	Amazon Web Services	Microsoft Azure
Віртуальні машини	Compute Engine	EC2	Virtual Machines
Хостинг сайтів	App Engine	Elastic Beanstalk	Cloud Services
Системи контейнерів	Container Engine	EC2 Container Service	Container Service
Бази даних	Cloud Bigtable	DynamoDB	CosmosDB
Аналіз даних	BigQuery	Redshift	SQL Database
Обробка даних	Cloud Functions	Lambda	Functions
Бази даних	Cloud Datastore	DynamoDB	Cosmos DB
Зберігання	Storage	S3	Blob Storage

Наприклад, нещодавнє дослідження State of the Cloud, проведене компанією Flexera, показало, що в 2019 році, принаймні на ринках економічно розвинутих країн, доля організацій, що використовують декілька хмарних послуг різних операторів, досягла 84%. Приблизно того ж висновку дійшли і аналітики Gartner — нещодавно проведене опитування представників експертного середовища продемонструвало, що 81% респондентів працюють з двома чи більше провайдерами. [4, С.1]

**Загальна безпека.** В якому місці надійніший захист для даних, в локальних пристроях або на віддалених серверах?

З одного боку, дані користувачів мають кращу безпеку при внутрішньому керуванні, з іншого боку, провайдер хмарних послуг вигідно зберігають стабільну довіру і для цього використовують найбільш доступний рівень безпеки. Важливо врахувати що інформація клієнта фізично знаходиться в різних кутках світу. Тому, перед застосуванням хмарних обчислень необхідно врахувати можливі загрози або ризики і для протидії їм, потрібно перевірити наявність механізмів хмарного захисту та контролю.

**Недостатність ресурсів та досвіду.** Не звертаючи увагу, на те що більшість ІТ працівників покращують свій досвід, компаніям складно знайти актуального та вагомого фахівця на ринку праці. В даній ситуації технології випереджають ринок, тому різниця в швидкості засвоєння нового стала значуща настільки, що справжні професіонали просто ще не встигли вирости в робочому плані. Високі вимоги по вирішенню та некоректна оцінка поставленого завдання знецінює будь-яку кількість наданих ресурсів. Спільне використання ресурсним потенціалом вірогідно надає тимчасовий доступ сторонньому користувачу у разі випадкового відкриття шляху до самих ресурсів.

**Зайві витрати у хмарі.** Деякі ІТ робітники, такі як розробники, вмикають хмарний сервіс з обмеженим часом дії і забувають його вчасно вимкнути. Окремим корпораціям заважає сміття та шум у хмарному трафіку, які не використовуються. Бізнесмени інколи забувають, що хмарні проекти не обов'язково гарантують економію витрат, адже організації полюбляють робити зайві резервування або полінітися зробити моніторинг та автоматизацію процесів власних витрат.

Враховуючи популярність лідерів поставки хмарних послуг, варто не забувати що, в залежності від часу, немає такого місця куди не міг дістатися злодій або у нашу цифрову еру – кіберзлочинець. Лакомим шматочком для зловмисників є хмарні сервіси, які привертають увагу хакерів при наявності в них однієї із загроз та ризиків хмарної безпеки:

- втрата або витік даних;
- порушення цілісності системи;
- великі фінансові витрати;
- відсутність належного захисту;
- неправильне або некоректне налаштування хмарної системи безпеки;
- існує тільки частковий контроль та керування хмарним довкіллям;
- стихійні, фізичні, помилкові пошкодження;
- занадто велика небезпека використання привілейованого доступу до значущих частин роботи;
- відсутність правової міжнародної справедливості та підтримки у хмарних питаннях;
- схильність до різного виду хакерських атак.

Тепер можливо навести загальні критерії захищеної хмари, яку ми хочемо отримати в результаті успішної роботи майбутнього методу.

Для цього, ми, по пріоритету та с описом, наведемо, с різних сторін, критерії безпеки мультихмарних середовищ.

Наявні ліцензії хмар і її відповідність різним законам та нормам безпеки. Ліцензування це не тільки маркетинговий хід на якому можна заробити, також такий підхід виправдовує себе в плані безпеки. Вся відповідальність за якість продукту покладається на розробника або постачальника, якщо надається послуга. З'являється лояльне вирішення банальних хмарних питань у правовому полі та збільшується довіра до самого виробника або власника ідеї.

Аргументована доцільність використання і ефективно оптимізовані витрати на IT-інфраструктуру. Умовою коли потрібно заощадити завжди була обмеженість в ресурсах, потім клієнт шукає шляхи для економії і на жаль більшість жертвують хмарною безпекою системи заради її швидкодії та після атаки на інфраструктуру, розуміють що вони втратили більше ніж могли. Також вищеописане стосується працівників, коли рішення одного фахівця переважають кількісну перевагу в колективі. Це важливо для будь-якої компанії, які звикли планувати і прогнозувати свої витрати.

Надається більше контроль над продуктом для кращої його якості. Ідеальний той постачальник, який дозволяє контролювати найбільшу кількість процесів, засобів та даних в хмарі. Вільне володіння хмарою дасть можливість задовільнити різноманітні потреби, наприклад, завжди можна отримати повідомлення і вчасно на нього відреагувати, або детально налаштувати політику доступу до хмари.

Створено звіт відкритих міжнародних стандартів та специфік по хмарним питанням в області безпеки. Більшість провайдерів хмарних послуг мають у своєму «арсеналі» власний механізм для програмування, який може бути задокументованим, але така

практика призводить до неможливості переходу користувача до іншого постачальника. Єдиним рішенням цього питання є розробка ефективних та унікальних стандартів і специфік.

У США асоціація Cloud Security Alliance випустила Cloud Controls Matrix. Цей документ являє собою перелік існуючих технологій інформаційної безпеки, які можуть бути використані в хмарних сервісах. Хоча деякі фахівці вважають, що для управління ІБ при побудові хмари SaaS можуть бути використані стандарти ISO 27001 та ISO 27002, все ж необхідна розробка спеціальних стандартів для хмарних обчислень [5].

### Висновки

В даній науковій роботі ми поверхнево розкрили відповідну тематику і досягли поставленої мети за власним планом. Для цього робота була розділена на декілька частин, кожна з яких логічно та послідовно доповнювала попередню. Після мотивації, роз'ясненням сучасних проблемних обставин хмарної безпеки в IT-індустрії, ми трішки познайомили читачів історією та визначенням хмарних обчислень. Потім, як по нотах, нам вдалося через призму розвитку і статистику області застосування хмар, знайти проблеми в проаналізованих нами хмарних продуктах на наявність вагомих загроз та ризиків для хмарної безпеки.

Додатково навели відомості доцільності застосування стратегії мультихмарності на практиці. Відокремили фундаментальні проблеми та пов'язані з ними знайдені загрози та ризики, які потребують подальших ефективних і актуальних рішень. Наостанок розробили власні ознаки надійної хмари.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Хмарні обчислення. 2023. URL: <http://surl.li/hdptk>.
2. Рубцова М. Ю. Хмарні технології як інструмент поглиблення віртуалізації фінансового сектору. *Електронна економіка*, 2020, № 5. URL: [http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/5\\_2020/112.pdf](http://www.economy.nayka.com.ua/pdf/5_2020/112.pdf).
3. Дідківська С.О. Платформи хмарних обчислень: порівняльний аналіз. Житомирський державний університет імені Івана Франка. *Semantic Scholar*, Corpus ID: 200208573, С. 131–136. URL: <http://surl.li/kxurb>.
4. Multicloud - перевага чи проблема. URL: <https://denovo.ua/blog/multicloud-perevega-chi-problema-75>.
5. Никишин Д.Д., Федюшин О.И. Ризики інформаційної безпеки в хмарних сервісах. *GLOBAL CYBER SECURITY FORUM 2019*: матеріали першого міжн. науково-практичного форуму. Харків: ХНУРЕ, 2019. С. 80–81. URL: <http://surl.li/kxvhdq>.
6. Безпека хмарних обчислень. Матеріал з Вікіпедії — вільної енциклопедії. URL: <http://surl.li/kxuvd>.

Received (Надійшла) 11.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

### Security issues and reliability criteria of multiple cloud environments

B. Vazhynskiy, V. Tkachov

**Abstract.** The purpose of the given work is to shed light on the critical and actual reliability problems of multi-cloud environments. In this scientific article, we outlined the main problems and reliability criteria of multi-cloud environments for their further analysis. For this purpose, priority mini-problems related to the main problems were highlighted. The work is divided into three small parts, each of which complements each other and fully reveals the subject of the article. In the first part, the problem of multiclouds is described in detail, what is its state, the causes of its occurrence, how relevant the problems are for users of any clouds and why they need to be solved in the near future, and note the considered possible consequences of ignoring them. Also, the connection of problems with practical and scientific tasks was drawn up in order to offer solutions in cases of a combination of cloud products from different providers in the IT infrastructure. In the second part, we got acquainted with the basics of the cloud world and the main providers of the cloud market, using their example, we listed various risks and threats of clouds that caused key reliability problems. In the final third part, the formed criteria of a secure cloud with multicloud are offered to your attention, which can become a guide for choosing a universal method for ensuring the reliability of multicloud or similar systems. Of course, for the uniqueness of the scientific work, a specific goal was given and the well-known works of other figures in the direction of this topic were analyzed. Further details and results can be seen in the conclusions section.

**Keywords:** multicloud environment, cloud security, cloud computing, multicloud, reliability criteria, cybercriminal, IT infrastructure.



О. А. Горносталь, С. Ю. Гавриленко

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## МЕТОД ІДЕНТИФІКАЦІЇ СТАНУ КОМП'ЮТЕРНОЇ СИСТЕМИ НА ОСНОВІ АНСАМБЛЕВИХ КЛАСИФІКАТОРІВ З ПОКРАЩЕНОЮ ПРОЦЕДУРОЮ ГОЛОСУВАННЯ

**Анотація.** Об'єктом дослідження є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи. Предметом дослідження є методи ідентифікації стану КС. Метою дослідження є підвищення якості та швидкодії ансамблевих класифікаторів шляхом оптимізації процедури голосування. **Методи, що використовуються:** методи машинного навчання, ансамблеві класифікатори, метод обрізки ансамблів, процедура зваженого адаптивного голосування. **Отримані результати:** розроблено ансамблевий метод ідентифікації комп'ютерних систем на основі мета-алгоритму бегінг зі спеціальною процедурою зменшення кількості базових класифікаторів та їх ранжування. Досліджено ефективність різних підходів обрізки базових класифікаторів на основі дерев рішень для підвищення якості мета-алгоритму. Розглянуто різні види методів розрахунку вагових коефіцієнтів для реалізації зваженого голосування з використанням різних метрик якості. Експериментальні дослідження дозволили оцінити розглянуті підходи окремо, а також підтвердили ефективність їх комплексного використання. **Висновки.** За результатами дослідження запропоновано удосконалений ансамблевий класифікатор ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі мета-алгоритму бегінг, який відрізняється від відомих комплексним використанням методів обрізки базових класифікаторів ансамблів та використанням процедури адаптивного зваженого голосування. За рахунок удосконалення класифікатору вдалося підвищити його точність до 2.5%. Перспективами подальших досліджень може бути підбір та налаштування базових класифікаторів з використанням різних методів машинного навчання.

**Ключові слова:** класифікація, машинне навчання, ансамблі, бегінг, зважене голосування, обрізка ансамблів, точність, швидкодія.

### Вступ

У сучасному інформаційному суспільстві комп'ютерні системи та комп'ютерні мережі стали невід'ємною частиною повсякденної діяльності людей та організацій. Вони відіграють ключову роль у бізнесі, науці, освіті та інших галузях людського життя. При цьому зростання залученості інформаційних технологій у ці сфери призводить до постійного зростання складності та різноманітності мережевих технологій, а також до збільшення обсягу інформації, що передається.

Такі явища, як Інтернет речі (IoT), хмарні обчислення та розподілені мережі, стали звичайними у нашому повсякденному житті, і це призвело до нових викликів у галузі ідентифікації та моніторингу стану комп'ютерних ресурсів. Сучасні системи та мережі стикаються з ризиками кібератак, збоїв, неполадок та перевантажень, що може призвести до серйозних наслідків, наприклад, до простою бізнес-процесів та витоку конфіденційної інформації [1]. Це робить питання ідентифікації стану комп'ютерних систем та мереж критично важливими. Існує гостра необхідність у розробці нових та вдосконаленні існуючих методів ідентифікації та контролю стану комп'ютерних систем та мереж, які дозволять оперативно виявляти та усувати проблеми, що виникають.

**Об'єктом дослідження** є процес ідентифікації стану комп'ютерної системи.

**Предметом дослідження** є методи та засоби ідентифікації стану КС.

**Огляд пов'язаних наукових публікацій.** Процес ідентифікації стану комп'ютерної системи представляє собою процедуру збору інформації про поточний стан та параметри системи та її аналізу з метою забезпечення оптимальної продуктивності та безперебійної роботи. Основні характеристики, які

слід враховувати в процесі ідентифікації, включають апаратну конфігурацію, обсяг оперативної пам'яті, використання процесорного ресурсу, наявність актуальних оновлень програмного забезпечення та налаштування мережевих параметрів, інтенсивність використання ресурсів мережі, особливості використання системних функцій та інші [2]. Актуальність цього процесу полягає в забезпеченні ефективності та безпеки роботи системи, вчасному виявленні можливих проблем або вразливостей, а також вдосконаленні ресурсного використання. На процес ідентифікації можуть вплинути зміни в апаратному забезпеченні, програмних оновленнях, налаштуваннях безпеки, зміна завдань, які виконує комп'ютерна система, а також несанкціоноване втручання в роботу комп'ютерної системи. В будь-якому випадку, ці події відображаються в основних характеристиках її роботи.

Для ідентифікації стану комп'ютерної системи використовуються різні методи класифікації, проте попередні дослідження показали, що найбільш якісними є ансамблеві класифікатори. Актуальність використання ансамблевих класифікаторів полягає в їх здатності покращити точність та стійкість моделей шляхом поєднання декількох базових класифікаторів, що допомагає знизити вплив випадкових помилок та підвищити загальну точність прогнозів [3].

Одним з популярних методів ансамблювання є бегінг (bootstrap aggregating method), який використовує вибірки даних, згенеровані методом бутстрепу (вибірка з повторенням), для навчання декількох базових класифікаторів. Цей підхід сприяє зниженню впливу випадкових помилок та підвищенню загальної точності прогнозів. Результати роботи цих класифікаторів потім агрегуються за допомогою голосування або обчислення середньої оцінки, для отримання кінцевого прогнозу [4].

Вибір ансамблевих класифікаторів, таких як бегінг, у порівнянні з іншими методами машинного навчання обумовлений низкою переваг, які роблять його привабливими для багатьох класифікаційних завдань [5]:

1. Стійкість до перенавчання: Однією з основних проблем у машинному навчанні є перенавчання моделей на тренувальних даних, що призводить до поганої узагальнюючої здатності нових даних. Ансамблеві методи, включаючи бегінг, працюють на основі композиції декількох моделей, що зменшує ймовірність перенавчання та підвищує стійкість.

2. Поліпшення стабільності та узагальнюючої здатності: Ансамблеві методи поєднують прогнози кількох базових моделей, що дозволяє знизити вплив аномалій та шуму в даних. Це призводить до більш стабільних і надійних передбачень, які краще узагальнюються на нові дані.

3. Підвищення точності: Комбінування прогнозів кількох моделей може значно покращити точність класифікації. Ансамблеві методи, такі як бегінг, дозволяють знизити дисперсію помилки та підвищити загальну точність моделі.

4. Робота з різними типами базових моделей: Ансамблеві методи можуть застосовуватися з різними базовими моделями, такими як вирішальні дерева, лінійні моделі, метод опорних векторів та інші. Це дозволяє вибирати найкращі базові моделі для конкретного завдання.

5. Масштабованість: Ансамблеві методи легко масштабуються, моделей, що робить їх придатними для аналізу великих обсягів даних та складних завдань.

6. Простота реалізації: Більшість ансамблевих методів, включаючи бегінг, відносно прості в реалізації та потребують незначного налаштування. Це спрощує їх використання у практичних завданнях.

Разом взяті, ці переваги роблять ансамблеві методи, такі як бегінг, потужним та універсальним інструментом для вирішення різних завдань класифікації. Однак, як і з будь-яким іншим методом машинного навчання, важливо проводити експерименти з налаштування параметрів для оптимізації продуктивності моделі для конкретної задачі та конкретних видів даних.

**Постановка проблеми.** Основною метою поточного дослідження є підвищення точності та швидкодії бегінг класифікаторів застосовно до завдання ідентифікації стану комп'ютерних систем. Попередні наші дослідження були пов'язані з попередньою обробкою даних, яка суттєво впливає на точність класифікації стану комп'ютерної системи. Зараз, метою роботи є дослідження ефективності використання різних технік процедури голосування ансамблевих бегінг класифікаторів:

1. Обрізка ансамблів. Цей метод включає визначення оптимального числа базових класифікаторів, які повинні бути включені в ансамбль. Для цього проводиться оцінка якості прогнозів класифікатору на валідаційній вибірці для різного числа класифікаторів та вибирається оптимальна кількість базових моделей ансамблю. Обрізка ансамблів допомагає уникнути перенавчання та підвищує його швидкодію.

2. Зважене голосування з адаптивними вагами. У цьому методі присвоюються різні ваги кожному з базових класифікаторів в ансамблі, ґрунтуючись на їхній продуктивності на навчальній та валідаційній вибірках. Адаптивне присвоєння ваги дозволяє дати більшу вагу більш точним класифікаторам, що покращує загальну точність ансамблю.

3. Голосування з вагами, заснованими на вихідних даних. У цьому методі ваги кожного класифікатора визначаються з урахуванням характеристик вихідних даних, як-от їх складність чи подібність. Це дозволяє гнучкіше налаштувати внесок кожного класифікатора у підсумкове голосування.

4. Калібрування впевненості. Цей метод спрямований на корекцію впевненості, з якою ансамбль робить прогнози. Це особливо корисно у випадках, коли ансамбль акцентує увагу на неправильних прогнозах. Калібрування впевненості дозволяє покращити якість імовірнісних прогнозів.

5. Метанавчання з метаознаками. У цьому методі використовується другий рівень ансамблю, який навчається на основі передбачень першого рівня. Це навчання дозволяє використовувати інформацію про те, як кожен класифікатор працює на різних прикладах, щоб поліпшити підсумкові передбачення.

За попередньою оцінкою, найкращі результати досягаються при застосуванні зваженого голосування [6] з вагами, що базуються на продуктивності кожного з класифікаторів та техніки обрізки ансамблів з використанням різних оцінок якості класифікаторів [7]. Основне припущення дослідження полягає у комплексному використанні цих методів відносно створення більш збалансованого і точного ансамблю класифікаторів для ідентифікації стану комп'ютерної системи. Комбінуючи їх, прагнемо покращити точність процедури голосування та забезпечити більш надійні результати під час ідентифікації стану комп'ютерної інфраструктури, а також зменшити час роботи отриманої системи ідентифікації за рахунок зменшення кількості класифікаторів.

## Огляд підходів та методів

Стандартне просте голосування в бегінг ансамблях передбачає рівний внесок кожного з базових незалежних класифікаторів. Проте визначення вагових коефіцієнтів кожного класифікатора, який залежать від різних оцінок його якості, можуть підвищити точність ансамблю [8]. Рівняння для розрахунку вагового коефіцієнта є таким:

$$w_{di} = \frac{Perf_i}{\sum_{k=1}^n Perf_k} \quad (1)$$

де  $w_{di}$  – динамічна (адаптивна) вага  $i$ -го класифікатора;  $Perf_i$  – оцінка якості  $i$ -го класифікатора;  $\sum_{k=1}^n Perf_k$  – сума оцінок продуктивності усіх класифікаторів.

У якості критерія оцінки якості класифікації можуть використовуватися наступні показники: точність (1), F1 Score (2), функція втрат 0-1 Zero-One Loss function (6), площа під ROC-кривою (ROC AUC Score), функція логарифмічних втрат Log Loss function (7), збалансована точність Balanced Accuracy Score (8).

$$f_{01}(\hat{y}_i, y_1) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_{\hat{y}_i \neq y_1}, \quad (2)$$

де  $f_{01}(\hat{y}_i, y_1)$  – функція втрат 0-1 Zero-One Loss function;  $n$  – кількість спостережень;  $\hat{y}_i$  – прогнозований вихід класифікатора;  $y_1$  – істинне значення;  $\delta_{\hat{y}_i \neq y_1}$  – бінарна функція, яка приймає значення 1, коли класифікатор робить вірну класифікацію.

$$f_{\log loss} = -\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i \cdot \log \hat{y}_i + (1 - y_i) \cdot \log(1 - \hat{y}_i)), \quad (3)$$

де  $f_{\log loss}$  – функція логарифмічних втрат;  $n$  – кількість спостережень;  $\hat{y}_i$  – прогнозований вихід класифікатора;  $y_i$  – істинне значення.

$$f_{bas} = \frac{1}{2} \left( \frac{TP}{TP + FN} + \frac{TN}{TN + FP} \right), \quad (4)$$

де  $f_{bas}$  – функція збалансованої точності; TP – кількість правильно передбачених позитивних подій; TN – кількість правильно передбачених негативних подій; FP – кількість неправильно передбачених позитивних подій; FN – кількість неправильно передбачених негативних подій.

Основна ідея обрізки ансамблевих класифікаторів полягає в тому, щоб побудувати ансамбль незалежних класифікаторів з використанням мета-алгоритму бегінга, а потім оцінити внесок або продуктивність кожного з класифікаторів у загальний результат і вилучити частину найменш продуктивних із них за певним правилом [9, 10], що зменшить час навчання та ідентифікації КС. Для оцінки продуктивності можна використовувати абсолютну точність та оцінку F1 Score:

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}; \quad (5)$$

$$f_1 score = \frac{2}{\frac{1}{Precision} + \frac{1}{Recall}} = \frac{2TP}{TP + 0.5(FP + FN)}. \quad (6)$$

Позначимо обидві характеристики продуктивності як Perf. Тоді функція вибору базового індивідуального класифікатора буде виглядати так: для обрізки ансамблю за певним значенням продуктивності (вираз 3) і для обрізки ансамблю за віддаленістю продуктивності від середнього значення (4).

$$f = Perf(n) > Perf_T, \quad (7)$$

де  $f$  – функція, що визначає необхідність використання  $n$ -й класифікатора у фінальному голосуванні; Perf( $n$ ) – оцінка продуктивності  $n$ -го класифікатора; Perf<sub>T</sub> – заздалегідь обране порогове значення.

$$f = |Perf(n) - Perf_{Avg}| \leq Perf_T, \quad (8)$$

де  $f$  – функція, що визначає, необхідність використання  $n$ -й класифікатора у фінальному голосуванні; Perf( $n$ ) – оцінка продуктивності  $n$ -го класифікатора; Perf<sub>Avg</sub> – середнє значення оцінки продуктивності усіх класифікаторів; Perf<sub>T</sub> – заздалегідь обране порогове значення. Задавши порогові значення та вибравши за їх допомогою якісні базові моделі, необхідно поєднати їх для фінального голосування.

**Формулювання теоретичних очікувань.** Основною ідеєю бегінг класифікаторів є побудова великої кількості незалежних базових класифікаторів, які навчаються на різних наборах даних. Саме тому, класифікатори можуть робити різні прогнози. Крім того, на точність класифікації ансамблю може впливати незбалансованість класів. Саме у таких випадках зважене голосування може підвищити точності за рахунок ранжування складників ансамблю за якістю їх роботи. Разом із тим, зважене голосування потребує збільшення часу навчання та, що найголовніше, збільшення часу ідентифікації КС, адже під час голосування необхідно враховувати вагові коефіцієнти кожної моделі.

Вирішити цю проблему можливо за рахунок обрізки ансамблю, що призведе до зменшення кількості базових класифікаторів [11, 12]. Комплексне використання наведених підходів підвищить точність роботи ансамблю при незначному збільшенні часу класифікації.

### Експериментальні дослідження та оцінка ефективності

Перша частина експерименту полягає у використанні техніки зваженого голосування для підвищення точності класифікації ансамблевого бегінг класифікатора. У якості вихідних даних, використано штучно згенеровані значення з великим вмістом шумів, що імітують показники функціонування КС. Розроблено програмне забезпечення, яке спочатку навчає стандартний бегінг класифікатор. Надалі виконується аналіз якості кожної із базових моделей та розраховуються для них вагові коефіцієнти на основі різних показників якості їх роботи: точність (accuracy), F1 Score, функція втрат 0-1 (Zero-One Loss function), площа під ROC-кривою (ROC AUC Score), функція логарифмічних втрат (Log Loss function), збалансована точність (Balanced Accuracy Score). Результати дослідження представлені на рис 1 – 3.

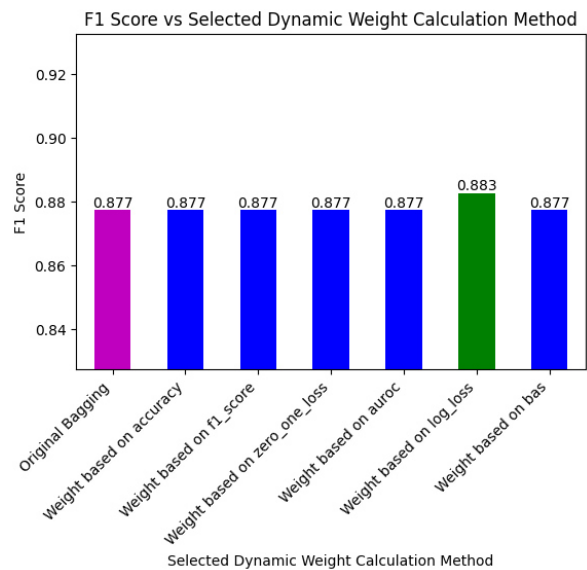


Рис. 1. Залежність метрики F1 Score ансамблю від обраного методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування

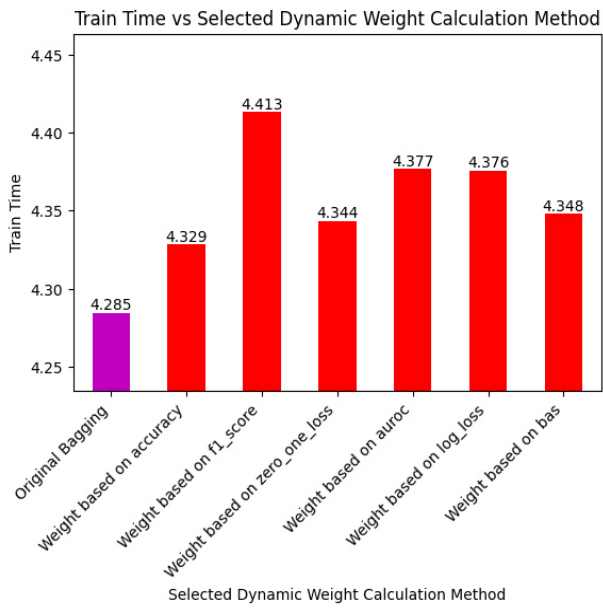


Рис. 2. Залежність часу тренування ансамблю від обраного методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування

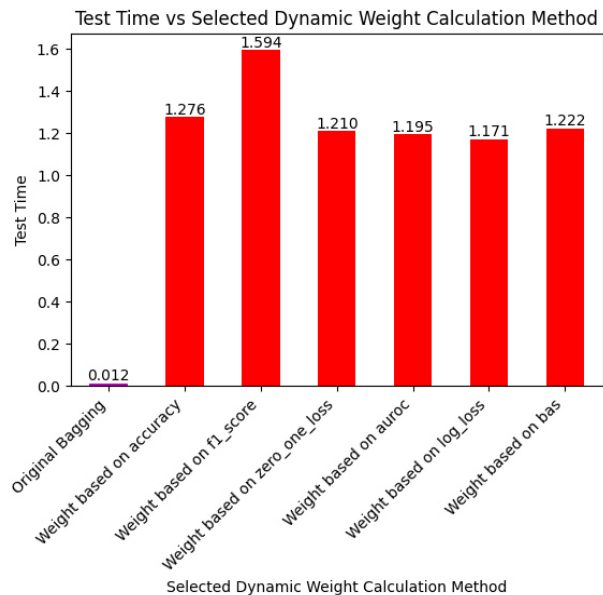


Рис. 3. Залежність часу ідентифікації ансамблю від обраного методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування

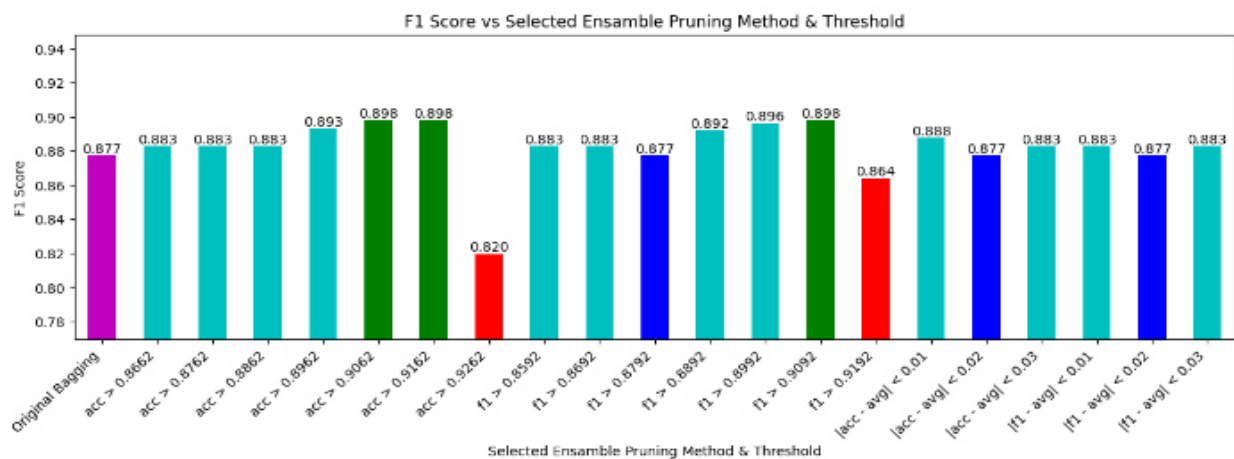


Рис. 4. Залежність метрики F1 Score ансамблю від обраної техніки обрізки та від обраного порогового значення

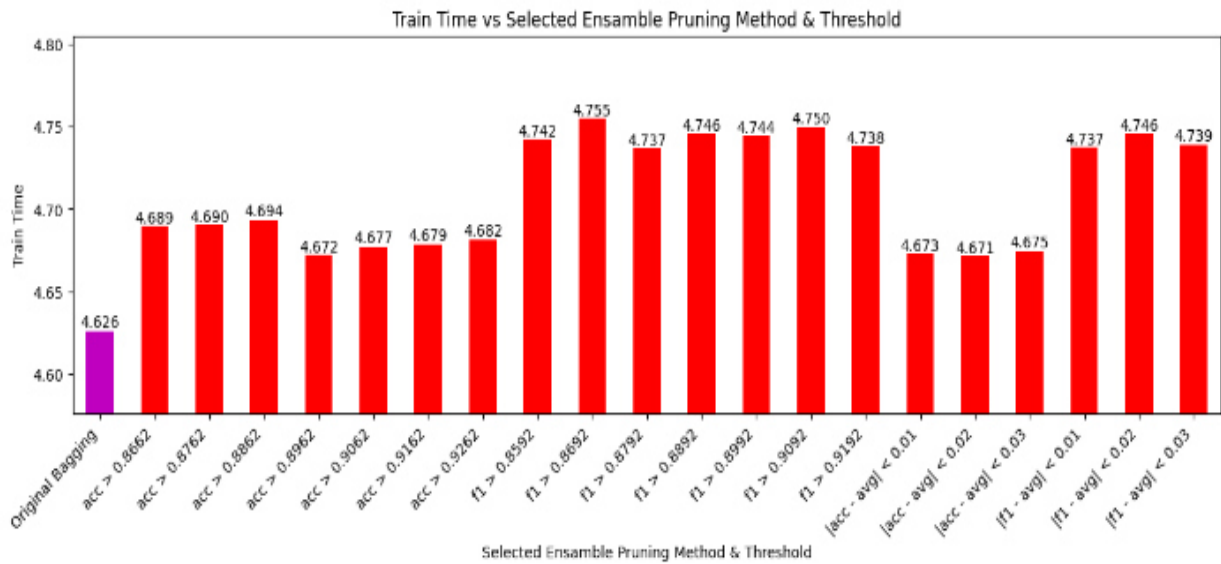
За результатом проведених експериментів отримано, що використання процедури зваженого голосування дозволяє підвищити точність роботи ансамблю на 0.5%, значення F1 Score на 0.6%, значення Precision на 0.1% та значення Recall на 1%. При цьому, найкращі результати отримано при розрахунку вагових коефіцієнтів на основі методу логарифмічних втрат.

У зв'язку з необхідністю розрахунку вагових коефіцієнтів, збільшуються час тренування та тестування ансамблю (рис.5-6). Це пов'язано з необхідністю врахування вагових коефіцієнтів базових класифікаторів у процесі фінального голосування. Збільшення часу тестування є несуттєвим і складає одну секунду.

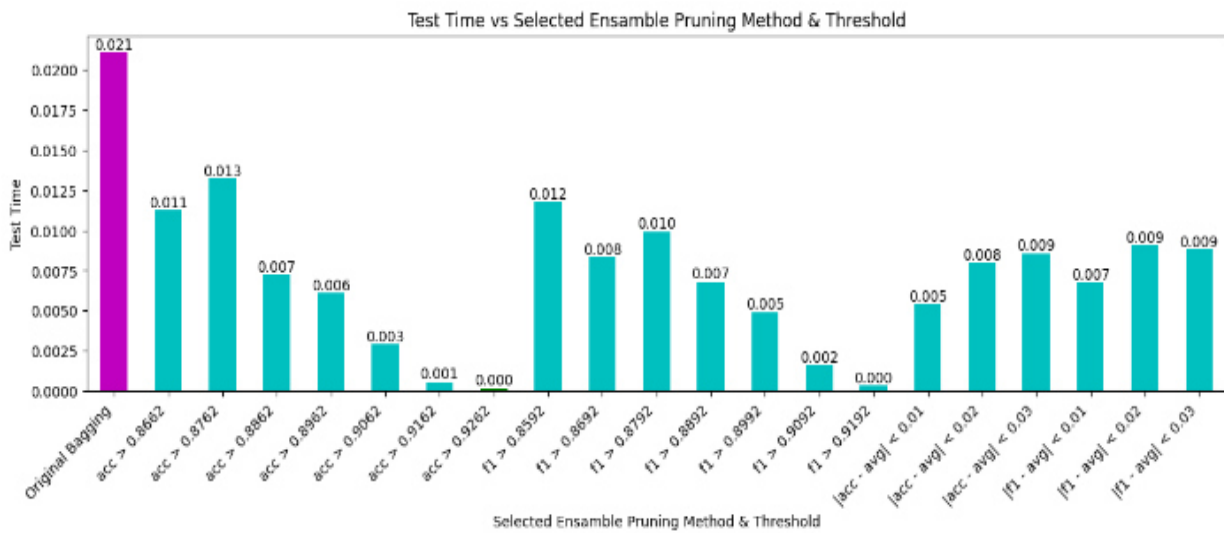
Друга частина експерименту полягає у дослідженні впливу різних технік обрізки ансамблю з ранжуванням порогових значень критеріїв прийняття рішень на ефективність роботи ансамблевого класифікатора. Для цього було розглянуто чотири техніки обрізки, де у якості критерія прийняття рішень використовувались такі показники якості класифікації: Accuracy, Precision, Recall та F1 score. Результати дослідження представлені на рис. 4 – 6.

За результатом проведених експериментів можна стверджувати, що використання процедури обрізки ансамблю з ранжуванням порогового значення дозволяє підвищити якість класифікації. Вибір оптимального порогу призводить до підвищення точності роботи ансамблю на 2%, значення F1 Score на 2.1%, значення Precision на 1.9% та значення Recall на 3.8%. При цьому відмічається незначне збільшення часу тренування ансамблю через необхідність видалення певних класифікаторів. З іншого боку – значно зменшується час тестування, що пов'язано зі зменшенням кількості базових класифікаторів. Найкращі результати вдається отримати при використанні обрізки за точністю з пороговими значеннями 0.9062 та 0.9162, а також при використанні обрізки за значенням метрики якості F1 Score з пороговими значеннями 0.8992 та 0.9092.

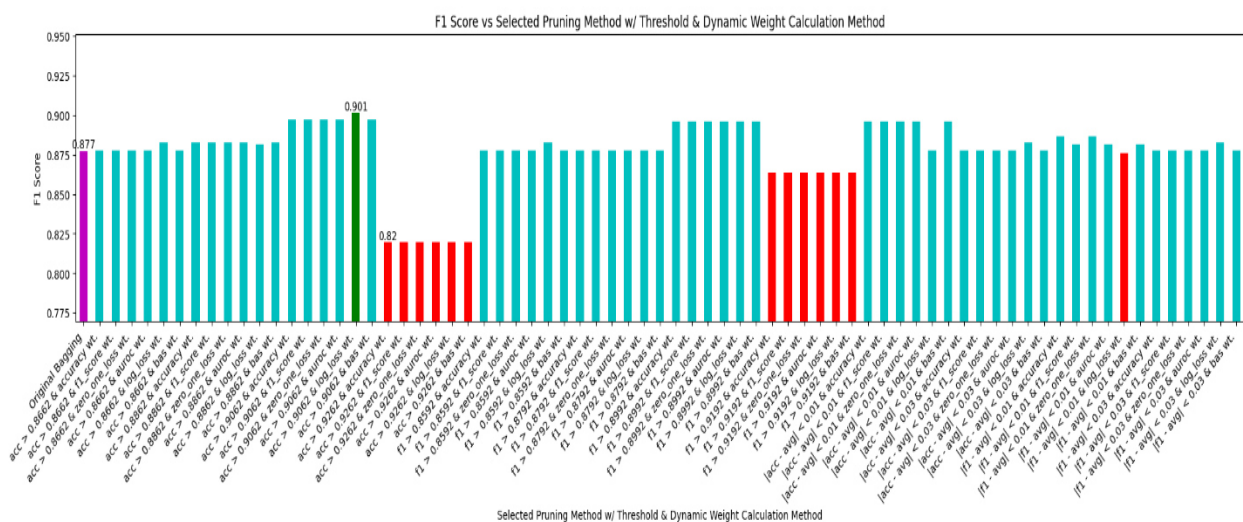
Третя частина експерименту полягає у дослідженні впливу комплексного використання обрізки ансамблю з ранжуванням критеріїв прийняття рішень і їх порогових значень та технік зваженого голосування. Результати дослідження представлені на рис. 7 – 9.



**Рис. 5.** Залежність часу навчання ансамблю від обраної техніки обрізки та від обраного порогового значення



**Рис. 6.** Залежність часу ідентифікації ансамблю від обраної техніки обрізки та від обраного порогового значення



**Рис. 7.** Залежність значення метрики F1 Score ансамблю від обраної техніки обрізки, обраного порогового значення та методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування



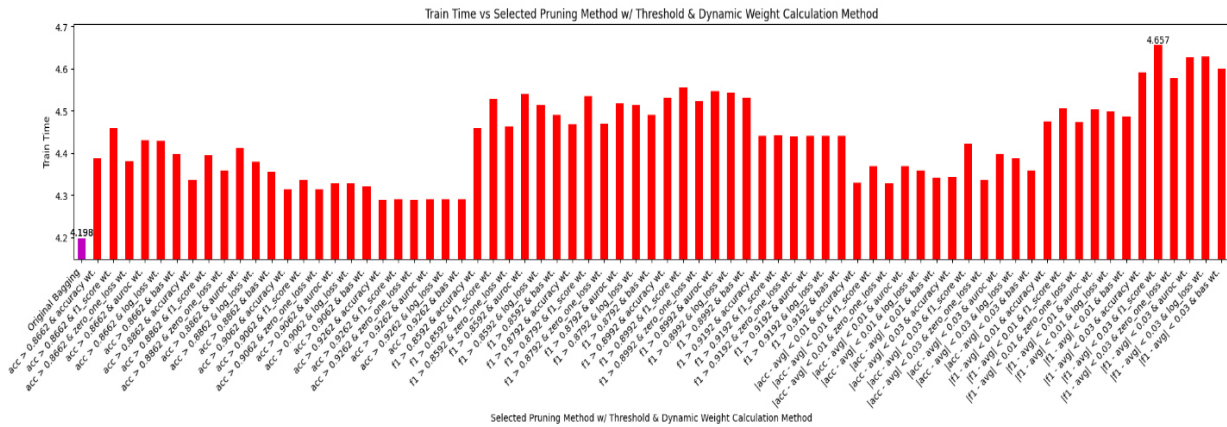


Рис. 8 Залежність часу тренування ансамблю від обраної техніки обрізки, обраного порогового значення та методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування

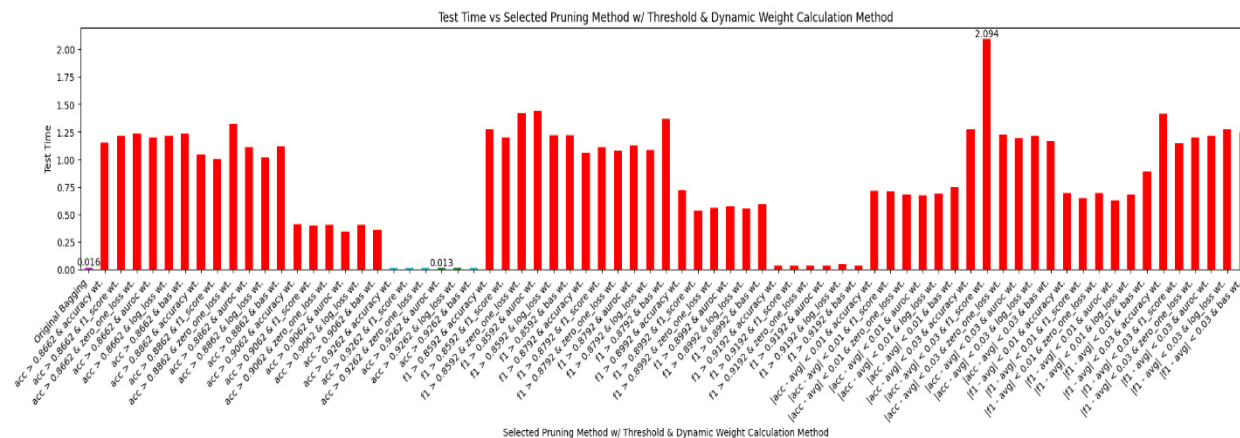


Рис. 9. Залежність часу ідентифікації від обраної техніки обрізки, обраного порогового значення та методу розрахунку вагових коефіцієнтів для голосування

За результатом проведених експериментів отримано, що комплексне використання процедури обрізки ансамблю та зваженого голосування дозволяє, в цілому, підвищити показники якості класифікації запропонованого ансамблю: Accuracy – на 2.5%, F1 Score – на 2.4%, Precision – на 2% та Recall – на 2.8%. При цьому відмічається збільшення часу тренування ансамблю до 1 секунди через необхідність видалення певних класифікаторів та розрахунку вагових коефіцієнтів. З іншого боку, збільшення часу тестування до 1 секунди є не значним та прийнятним для ідентифікації стану комп'ютерних систем з щосекундним збором статистичних даних.

Результати експерименту підтвердили підвищення якості класифікації за рахунок використання процедури зваженого голосування на основі функції логарифмічних втрат та обрізки ансамблю, засновану на використанні точності у якості критерію прийняття рішення з пороговим значенням 0.9062.

Таким чином, процедури обрізки ансамблів з різними техніками та пороговими значеннями, а також методика зваженого голосування дають можливість підвищити ефективність роботи ансамблю. При цьому їх комплексне використання дозволяє отримати максимальне значення метрик якості при допустимому підвищенні часу тренування та часу тестування.

## Висновки

У рамках дослідження було проведено аналіз різних підходів до підвищення ефективності бегінг-класифікаторів для ідентифікації стану комп'ютерної системи.

У якості вихідних даних, використано штучно згенеровані значення з підвищеним вмістом шумів, що імітують показники функціонування КС. Було досліджено техніку зваженого голосування з використанням різних метрик якості класифікаторів для оцінки їх ваг та процедура зменшення кількості базових класифікаторів.

Проведені дослідження підтвердили припущення, що зважене динамічне голосування та обрізка ансамблів сприяють підвищенню якості класифікації. Ці методи покликані забезпечити більш надійну та точну ідентифікацію стану комп'ютерної системи, що важливо для своєчасного виявлення аномалій у їх роботі.

Обрізка ансамблів, крім підвищення точності, має ще одну важливу перевагу - скорочення часу розпізнавання на тестовій вибірці. Це особливо актуально у ситуаціях, де швидкодія є критичним чинником успішної ідентифікації стану системи.

З іншого боку, зважене динамічне голосування надає можливість точніше врахувати продуктивність

кожного класифікатора в ансамблі. Особливо важливою є гнучкість у виборі функції оцінки якості, яка може бути адаптована до конкретного завдання.

Комплексне використання обох методів має найбільший позитивний ефект. Груба обрізка ансамблів скорочує розмір ансамблю та прискорює процес класифікації, а зважене динамічне голосування збільшує якість моделі. Такий комплексний підхід забезпечує найкращу ефективність ідентифікації стану комп'ютерної системи.

За результатами дослідження отримано, що комплексне використання методів може бути корисними інструментами для підвищення точності та надійності ідентифікації стану комп'ютерних систем, особливо в умовах наявності даних, що знаходяться на межі розмежування класів. Отримані результати можуть бути важливим керівництвом для практиків та дослідників, які прагнуть підвищити ефективність роботи бегінг-класифікаторів в аналогічних прикладних задачах.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Sathiya Devi, S., Rajakumar, R. (2021). Network Intrusion Detection Using Cross-Bagging-Based Stacking Model. In: Pandian, A., Fernando, X., Islam, S.M.S. (eds) Computer Networks, Big Data and IoT. Lecture Notes on Data Engineering and Communications Technologies, vol 66. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-0965-7\\_58](https://doi.org/10.1007/978-981-16-0965-7_58)
2. Челак В. В. Розробка методу ідентифікації стану комп'ютерної системи на основі нечітких дерев рішень / С.Ю. Гавриленко та В.В. Челак // Системи управління, навігації та зв'язку Випуск 1 (71). – Полтава, Україна, 2023. – с. 78-83. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.1>
3. Andrea Campagner, Davide Ciucci, Federico Cabitza, Aggregation models in ensemble learning: A large-scale comparison, Information Fusion, Volume 90, 2023, pp. 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.inffus.2022.09.015>
4. O. Hornostal and S. Gavrylenko, "Development of a method for identification of the state of computer systems based on bagging classifiers", A.I.S., vol. 5, no. 4, pp. 5–9, Dec. 2021. <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.4.01>
5. O. Hornostal, S. Gavrylenko and V. Chelak "Ensemble Approach Based on Bagging and Boosting for Identification of the Computer System State," 2021 XXXI International Scientific Symposium Metrology and Metrology Assurance (MMA), Sozopol, Bulgaria, 2021, pp. 1-7. <https://doi.org/10.1109/MMA52675.2021.9610949>
6. J. A. Sáez and J. L. Romero-Béjar, "On the Suitability of Bagging-Based Ensembles with Borderline Label Noise," Mathematics, vol. 10, no. 11, p. 1892, Jun. 2022. <https://doi.org/10.3390/math10111892>
7. A. Dogan and D. Birant, "A Weighted Majority Voting Ensemble Approach for Classification," 2019 4th International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Samsun, Turkey, 2019, pp. 1-6. <https://doi.org/10.1109/UBMK.2019.8907028>
8. Pinto, F., Soares, C., Mendes-Moreira, J. (2015). Pruning Bagging Ensembles with Metalearning. In: Schwenker, F., Roli, F., Kittler, J. (eds) Multiple Classifier Systems. MCS 2015. Lecture Notes in Computer Science, vol 9132. Springer, Cham. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-20248-8\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-20248-8_6)
9. Sannasi Chakravarthy, S.R., Rajaguru, H. (2022). Ensemble-Based Weighted Voting Approach for the Early Diagnosis of Diabetes Mellitus. In: Karrupusamy, P., Balas, V.E., Shi, Y. (eds) Sustainable Comm. Networks and Application. Lecture Notes on Data Engineering and Comm. Technologies, vol 93. Springer, Singapore. [https://doi.org/10.1007/978-981-16-6605-6\\_33](https://doi.org/10.1007/978-981-16-6605-6_33)
10. Wenyu Zhang, Dongqi Yang, Shuai Zhang, A new hybrid ensemble model with voting-based outlier detection and balanced sampling for credit scoring, Expert Systems with Applications, Volume 174, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2021.114744>
11. Li, D., Zhang, Z. & Wen, G. Classifier subset selection based on classifier representation and clustering ensemble. *Appl Intell* (2023). <https://doi.org/10.1007/s10489-023-04572-x>
12. S. Kwak and H. Kim, "Comparison of ensemble pruning methods using Lasso-bagging and WAVE-bagging," Journal of the Korean Data and Information Science Society, vol. 25, no. 6. Korean Data and Information Science Society, pp. 1371–1383, 2014. <https://doi.org/10.7465/jkdi.2014.25.6.1371>
13. George D.C. Cavalcanti, Luiz S. Oliveira, Thiago J.M. Moura, Guilherme V. Carvalho, Combining diversity measures for ensemble pruning, Pattern Recognition Letters, Volume 74, pp. 38-45, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.patrec.2016.01.029>

Received (Надійшла) 12.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

#### Method of identifying the state of a computer system based on ensemble classifiers with an improved voting procedure

Oleksii Hornostal, Svitlana Gavrylenko

**Abstract.** The object of research is the process of identifying the state of the computer system. The subject of research is the methods of identifying the state of CS. The purpose of research is to improve the quality and performance of ensemble classifiers by optimizing the voting procedure. **Methods used:** machine learning methods, ensemble classifiers, ensemble pruning method, weighted adaptive voting procedure. **The results were obtained:** an ensemble method of identification of computer systems based on the bagging meta-algorithm with a special procedure for reducing the number of basic classifiers and their ranking was developed. The effectiveness of various approaches to pruning basic classifiers based on decision trees to improve the quality of the meta-algorithm was investigated. Different types of methods for calculating weighting coefficients for the implementation of weighted voting using various quality metrics are considered. Experimental studies allowed to evaluate the considered approaches separately, and also confirmed the effectiveness of their integrated use. **Conclusions.** Based on the results of the research, an improved ensemble classifier for identifying the state of the computer system based on the bagging meta-algorithm is proposed, which differs from the known ones in the complex use of pruning methods of basic ensemble classifiers and the use of the adaptive weighted voting procedure. Due to the improvement of the classifier, it was possible to increase its accuracy to 2.5%. Prospects for further research may be the selection and adjustment of basic classifiers using various machine learning methods.

**Keywords:** classification, machine learning, ensembles, bagging, weighted voting, ensemble pruning, accuracy, performance.



Olena Dvirna, Kseniia Verhal, Yuri Ivanov

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## THE HIGHER EDUCATIONAL INFORMATION SYSTEM: MANAGEMENT OF THE TIMETABLE SCHEDULING AND LOGISTICS OF THE EDUCATIONAL PROCESS

**Abstract.** In modern conditions, one of the important areas of development of a higher educational institution is the automation of educational activities through the implementation of a complex information system. In order to increase the effectiveness of simultaneous management of various aspects of educational activity, the information system should combine a wide range of functionality, including the timetable scheduling module. This paper is dealing with the one of the important issues of the most significant university administrative processes - timetable scheduling. This module should support working with big data and have the appropriate software and technical infrastructure, analytical tools, reporting units and error detection units. The article discusses some aspects of the timetable module. A description of the software and technical infrastructure of the business process of forming the university schedule is given.

**Keywords:** Information system, higher educational institution, schedule, curriculum, students, system architecture.

### Introduction

In modern conditions, society have been facing with the need of an ongoing digitalization of the activity in all sectors activities of the economy, including the field of higher education as a central venue for the creation of new knowledge economies for the 21st century [1]. Under the influence of the rapid expansion of COVID-19 epidemic, the russian federation's military war of aggression against Ukraine higher education institutions of Ukraine are undergoing digital transformation. The information technologies and systems, learning technologies and digital platforms are actively implemented to meet the needs of students and faculty, since these needs are critical for teaching and learning. Trying to absorb the shock, students, academic staff, and administration embarked on a fast experimentation and learning process on how to teach, learn and administer digital education [2]. The study plan is the main foundation of the educational process in any academic institution that determines the content all training activities that each student must undertake during its university career. The study plan specifies a list of educational components and their logical sequence according to the state educational standard, implements the basic principles of subject selection, regulates the total academic load and the volume of academic disciplines, the student's workload by periods of study, forms of final control. Given the complex structure of the study plan, the generation of the schedule of the university's educational process is important component of the educational process, its quality and efficiency. Considering the lack of automated information systems in universities the process of building student's schedule is considered one of the chronic problems facing the educational process in many educational institutions [3]. The university course schedule is the main, final planning document that regulates the educational work of students and educational staff. The problem of drawing up a schedule at the university is to distribute a set of courses according to the curricula within the given number of classrooms and time periods (pairs).

The informatization of universities has become one of the main issues of higher education management in the digital age.

Almaraz et al. [4] define the digitalization of HEIs. This research is focused on digital transformation challenges in higher education institutions. Jackson [5] presents the research into managerial strategy, pitfalls and pivots of digital transformation. The issues related to the theoretical model of digital transformation in the HEI is presented in research [6]. The authors of the paper [7] consider five general assumptions that hinder the digital transformation of HEIs. In [8], the authors consider the problems of the digital transformation of higher education after COVID-19. Paper [9] considers a key aspect of the digital transformation of higher education - the creation of a digital learning space.

The Bologna process, proposed in 1999, tends to harmonise HE systems throughout Europe in order to ensure compatible degree structures, equal academic qualifications and enhancing the attractiveness of foreign students to study across Europe [10]. Structural convergence of HE systems in Europe, generalized view of characteristics in HEIs, more complex and standardized HEI systems, became an important task of universities [11]. Globalisation of HE stimulates the use of more advanced information and communication technology [12]. Universities and colleges of many countries of the world are constantly searching for tools used to automate educational processes. Such tools are mainly focused on the selection of educational process management systems, electronic document flow management systems, educational activity support systems, virtual learning environment for providing distance education.

Information systems in higher education institutions are designed to manage and organize the vast amount of data that is generated in these institutions. These systems provide a platform for storing, processing, and retrieving data related to student records, financial aid, academic programs, faculty, staff, research, and administrative operations.

Usually, educational institutions use corporate information and analytical systems (IAS) [13], which are usually commercial products and require considerable costs for the purchase of licensed software (software products of automation of the process of creation and management and examinations of MedMe, BeAxi from KindGeek, (England) [14], software for the development

of the system of accounting the student body Lotus Notes/Domino from IBM, (USA) [15]). The main disadvantages of using such information systems for Ukrainian universities are the English-language interface, high cost and the failure to take into account the specifics of domestic institutions of higher education.

Some of the key information systems used in higher education institutions include:

- Student Information System (SIS): SIS is a comprehensive database that stores and manages student-related data, such as registration, enrollment, grades, and transcripts. It also includes features for course scheduling, degree audit, and student communication.

- Learning Management System (LMS): LMS is an online platform used to deliver and manage course content, assessments, and communication between faculty and students. It also includes features for tracking student progress and performance.

- Financial Information System (FIS): FIS is used to manage financial data related to tuition fees, financial aid, scholarships, and grants. It also includes features for budgeting, accounting, and reporting.

- Human Resources Information System (HRIS): HRIS is used to manage employee data related to hiring, payroll, benefits, and performance evaluation. It also includes features for tracking employee attendance and leave.

- Research Information System (RIS): RIS is used to manage research data related to grants, funding, publications, and collaborations. It also includes features for tracking research progress and outputs.

These systems help higher education institutions to streamline their operations, improve efficiency, and enhance the student experience. They also provide valuable insights into institutional performance and help in decision-making processes.

However, quite often the automation of higher educational institutions builds on disparate tools that are not combined into a single system for solving functional problems. Moreover, separate software tools have their own information bases for each functional problem, do not cover all objects and processes of the HEI activity, and do not take into consideration the peculiarities of a particular university (a comprehensive educational scheduling system UniTime [16]).

The use higher educational information system should ensure [17]:

1. In educational activities:

- creation of a modern distributed educational and methodological environment university;
- use of Internet technologies in the educational process;
- e-learning;
- export and import of educational services in the international educational space.

2. In scientific activity:

- presentation of the scientific potential of the university in the global information space;
- access of scientific staff to the information resources of world scientific centers;
- implementation of joint research and projects as part of international consortia.

3. In the university management:

- management of the processes of collection, storage and processing of information about the university facilities, data search and analysis;
- provision of automated control of the execution of decisions;
- improvement of educational institution management planning;
- improvement of the efficiency of the use of financial and material and technical resources.

But in their implementation, information systems have two groups of problem, namely technical and non-technical [18].

The technical aspects related to systems itself, namely the quality of technical information system.

In contrast, the non-technical aspects are associated with the perceptions of users on an information system that cause them to accept or refuse to use an information system.

At present, universities of Ukraine have implemented and are using a number of automated educational process management systems, namely [17]:

- Academic Information System (AIS) «STEP 5 PROF» [<http://gavah.com.ua>];
- AIS «Direktiva» [<http://www.kitsoft.com.ua>];
- AIS «University» [<http://www.unitex.com.ua>];
- A package of computer systems of "Polytek-soft" PE [<http://www.politek-soft.kiev.ua>];
- Program complex "ALMA-MATER" [<http://www.direct-it.com.ua>];
- AIS "Higher Educational Institution" [<http://ndipit.com.ua>];
- IS "University" [<http://www.kspu.edu>];
- The electronic management system of the university «Socrat» [<http://vsau.vin.ua/>]
- Program complex "Automated educational institution management system" [<https://mkr.org.ua/>].

The information systems listed above automate the main structural divisions of the higher educational institution - the dean's office, the academic department, the admissions committee, the personnel department, the accounting and financial department, etc.

The main processes that can be automated in the presented automated systems include:

- management of the educational process;
- management of the introductory campaign;
- management of information resources;
- management of financial and economic activities;
- management of scientific work.

The analysis of the information systems of the automation of the activities of the higher educational institution carried out in the article [17] allow to determine the following characteristics of higher educational information system:

- open architecture;
- modular designs;
- cross-platform architecture;
- minimization of client software requirements;
- differentiation of user access rights;
- simultaneous access by multiple users;
- network security controls.

**The purpose** of the article is the description and development of the timetable scheduling module of the high educational information system.

### Systems design

iZETA is an automated system of planning, organization, management and control of the educational process in higher educational institutions. The system is designed to create, support, process and save information about the components of the educational process; automation of document flow in planning, organization, management and control of the educational process; information and analytical support of all units of the educational institution. The system covers all stages from the formation of educational plans to the preparation of the timetable scheduling and the formation of accounting data for the completed teaching load by the teaching staff of the university. The purpose of creating the software package is to obtain reliable and complete information about the educational process in a timely manner, as well as to reduce the labor intensity of inputting and analyzing accounting information, increasing efficiency, consistency and reliability of data. A software package implemented on the basis of client/server technology. The database server uses the MySQL DBMS version 5.0 and higher, which ensures high reliability of data storage and integrity.

Work logs make it possible to monitor each user's access to certain system data. With the help of the "iZETA-Updater" tool, system modules are automatically updated.

Primary data is formed through a system of directories that make it possible to accumulate the following information in the database:

- list of educational institutions (branches of the main educational institution);

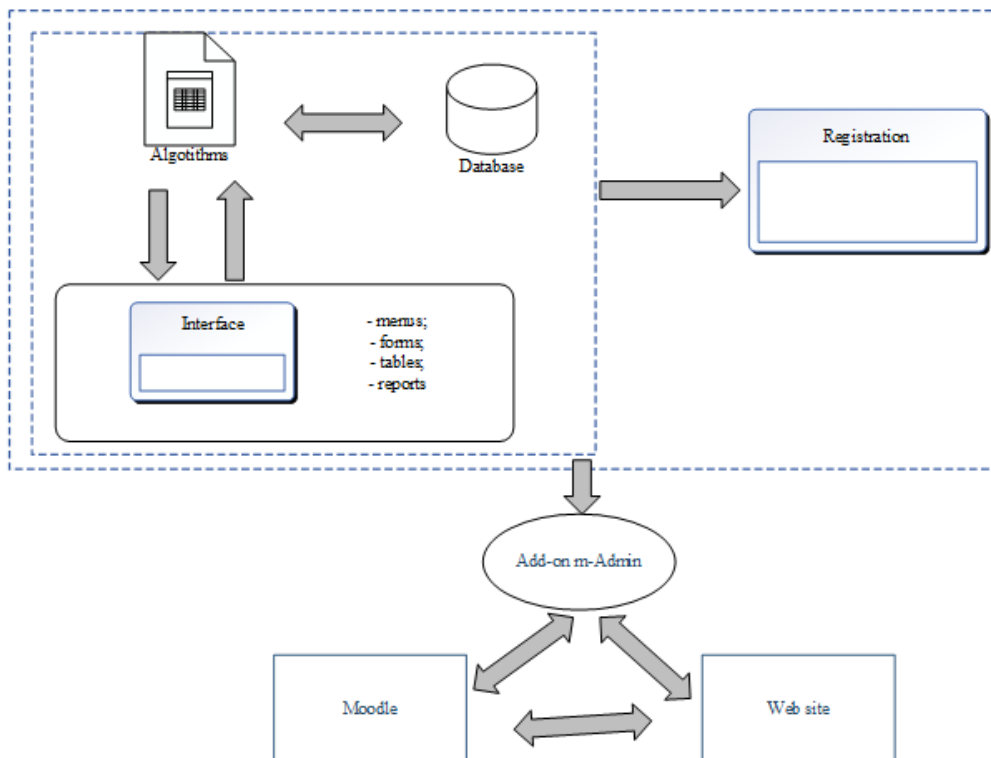
- list of university classrooms;
- list of education programs;
- list of departments of the university;
- list of academic disciplines;
- information about academic staff and employees of the university;
- list of full-time and part-time positions;
- hourly wage tariff grid;
- categories of administrative documents;
- templates of printed forms etc.

The access of authorized users to work with system modules is regulated through the administration module. With the help of a multi-level system of access regulation in one information field, users of different departments and departments of the educational institution can interact.

The system has a modular structure. Each submodule is called by the main module, and each submodule completes a relatively independent function. Each submodule can be developed, tested, and modified independently and finally forms the whole system, so the system has good scalability. The system is divided into twelve modules:

- Management of the study plan;
- Editor of the study plan;
- Consolidated educational process timetable;
- Management of the Consolidated streams;
- Teaching load calculations;
- Teaching load distribution;
- Timetable scheduling;
- Management of the teaching load;
- Business trip manager;
- Management of publishing of printed products;
- Administrative documents management;
- Printing documents on higher education;

The system structure is shown in Fig. 1.



**Fig. 1.** Top level components of iZETA

The server part of the iZETA is the intermediary between the database and users' applications. The main tasks of the server part are transparent access of clients to the database, ensuring the simultaneous operation of all users and synchronization and data exchange between users. The architecture of the software is designed in such a way that all users work in a single information space. So, the changes made by one user are instantly visible to all other users.

The interface handles the different menus, forms, data management, schedule management (Web site with schedule for students and academic staff), report management, and user management.

Schedule formation is computationally complex problem of distributing sets of resources to support the

curricular needs: accessible workforce, courses, appropriated classrooms, labs, and working days of academic staff and student. "The allocation of given resources to specific objects being placed in space time, in such way as to satisfy as nearly as possible a set of desirable objectives, subjected to constraints." The presence of knowledge for creating timetabling software has led to new insights, like improved methodologies and more comprehensive models [19]. Timetable must meet a number of requirements and should satisfy the desires of all entities involved simultaneously as well as possible. The timing of events must be such that nobody has more than one event at the same time [20]. The architecture of the program module Timetable scheduling Module consists of such main components, represented in Fig. 2.

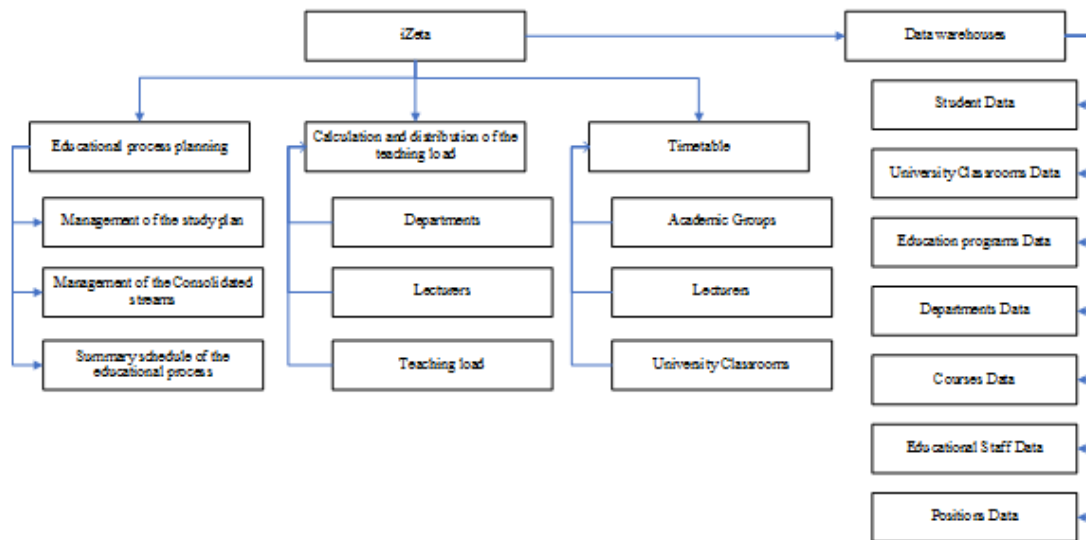


Fig. 2. The main component of the Timetable scheduling Module

This structure allows meeting the specific requirement of the system, including scalability and maintainability. This programmer Timetable scheduling Module is able to handle large amount of data and flexible to adapt to changes in the scheduling requirements. This module performs the main functions, such as:

- formation of a list of university classrooms with the selection of their types - lecture classrooms, laboratories and seminar classrooms, multimedia and computer classrooms (Fig. 3);
- formation of the schedule for the current academic year for the corresponding educational institution in a semi-automatic mode;
- analysis of the formed schedule for the presence of critical inconsistencies for each academic staff member;
- analysis of the workload of the classrooms for the specified period;
- blocking in the schedule for the academic staff member due to his business trip or vacation;
- generating printed forms of relevant documents, exporting them to MS Excel file format.

The architecture of a Timetable scheduling Module includes several layers or components, such as:

- User interface layer: This layer provides the user interface for administrators or scheduling managers to input data, configure scheduling rules and constraints, view schedules, and generate reports (Fig. 4).

- Data layer: This layer stores all the data needed for scheduling, such as course offerings, academic staff availability, room availability, and scheduling rules and constraints. In the presented system, the module interacts with the database, calling the following data references: Student Data, University Classrooms Data, Education programs Data, Departments Data, Educational Staff Data, Courses Data, Positions Data.

- Scheduling engine layer: This layer includes the algorithms and rules that optimize the schedule based on the input data and constraints.

- Reporting layer: This layer provides report on various aspects of the scheduling process. These reports help managers to make informed decision about resource allocation and course offering.

- Integration layer. This layer allows for integration with other modules of iZETA (Fig. 2). It enables the module to exchange data, ensuring consistency and accuracy across the entire system.

- User presentation layer. This layer provides the user web interface for the module, allowing users to interact with the system and schedule. The layer distributes information through a browser. So the user can send requests to the server, and display the results returned by the server.

- Error handling layer. This layer is responsible for identifying, reporting, and handling errors that occur

during the operation of the module. It provides mechanisms for detecting, reporting, and handling errors, ensuring that the system operates smoothly and efficiently. When an

error is detected, the error handling layer generates an error message that describes the nature of the error. The error message is displayed on the user interface (Fig. 5).

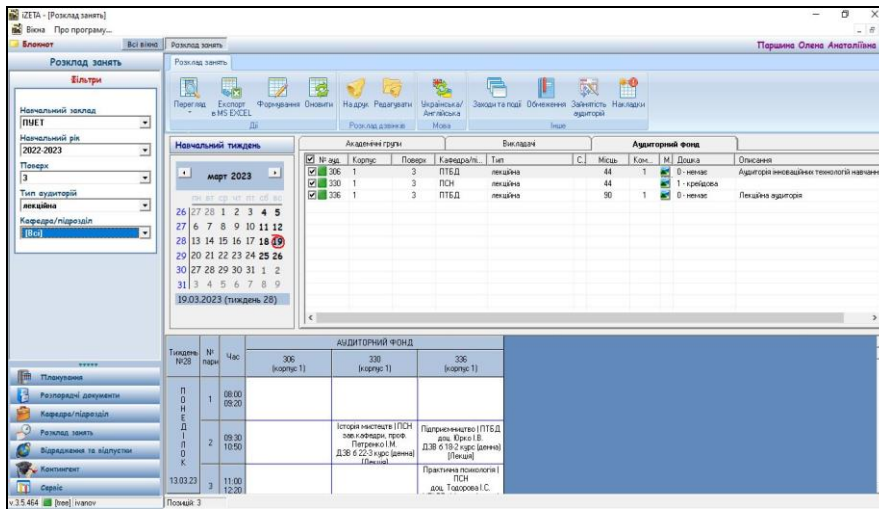


Fig. 3. The interface for choosing the university classroom

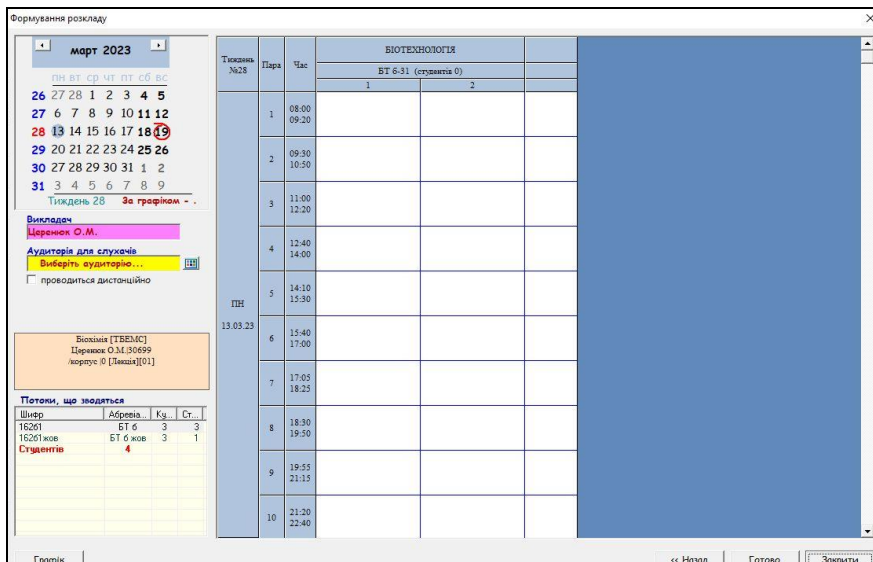


Fig. 4. The interface for scheduling managers to input data

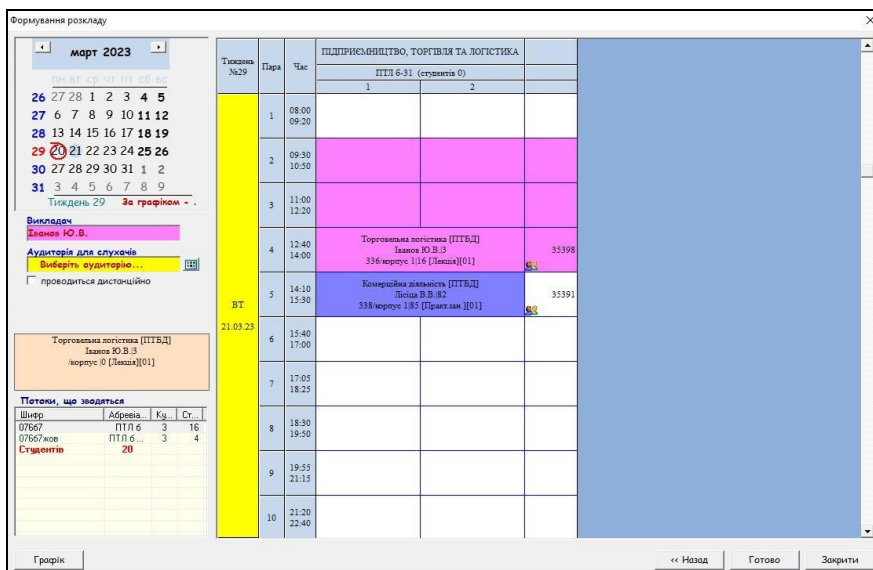


Fig. 5. The interface for error handling

During the formation of the schedule, the system monitors three important components of the module - the teacher's employment, the classrooms' employment, and the group's employment. If the system identifies an error in at least one of the three components, then courses cannot be held at a given time in a given audience. Employment for each component is marked by color. For example, in the figure, the purple color indicates the group's employment, the pink color indicates the teacher's employment. To avoid creating conflict situations in the schedule grid (for example, when the teacher at the same time is engaged in several groups). With any changes to the schedule grid, the schedule are automatically changed for all users. According to this approach, the dispatchers that make up the schedule can track changes in real time and see any kinds of overlays errors. In Timetable Scheduling Module there are some constraints that are detected using the Error handling component [21]:

- Lectures should not have timeslot clashes.
- None of the room could be used for two different lectures at same time slot.

- None of the lecturer should have two classes at same time slot
- Every classroom must be scheduled exactly once at same time slot.
- The working hours should be according to teaching load.

The schedule adjustment capability enables Schedule Managers to manually fix schedules in order to apply constraints that are not implemented by the auto-scheduler function of the system.

The architecture of the software module is designed in such a way that all schedule makers work in a single information space. Changes made by one schedule maker are instantly visible to all other schedule makers. According to this approach, the dispatchers that make up the schedule can track changes in real time and see any kinds of overlays.

The key actors for the proposed program module "Timetable scheduling" include Administrators, Education department, Schedule Manager, Head of department, Lecturers, and Students (Fig. 6).



Fig. 6: Use case diagram

The Administrator manages the application, access rights and data warehouse. The Education Department is responsible for education planning: study plans, teaching load, students data and academic staff data. The responsible employee of this department is engaged in updating data in warehouse, creating, and editing of the study plans, monitoring the distribution of teaching load. Report management enables the users to view or print schedule reports. Students and Lecturers management allows the Education Department to edit other possible users of the system.

The schedule manager is responsible for scheduling and managing the overall Timetable Module. Students and Lecturers, and other guest users in general may view schedules through the relevant website.

### Conclusions

An automated system (iZETA) was provided for the process of planning, organization, management and control of the educational process in higher educational institutions. The paper explains the work of the Timetable Scheduling Module of this system.



The paper has contributed directly to improving the general automation of the activities of a higher educational work on scheduling by automating the work of the institution, including the work of the educational department. Schedule managers. The program can be used for the department.

## REFERENCES

1. Sam C., Van Der Sijde P. Understanding the concept of the entrepreneurial university from the perspective of higher education models. *Higher Education*, 68 (2014): 891-908.
2. Crawford J., Butler-Henderson K., Rudolph J., Malkawi B., Glowatz M., Burton R., Magni P., Lam S. COVID-19: 20 countries' higher education intra-period digital pedagogy responses *Journal of Applied Learning & Teaching*, 3 (2020): 1-20.
3. Mozamel Saeed, Ahmed Fahim. Designing a smart system for building student's schedule-An application at Neelain University. *International Journal of Advanced and Applied Sciences* (2021): 82-94.
4. Almaraz F., Machado A. M., and Esteban, C. L. Analysis of the digital transformation of higher education institutions: a theoretical framework. *EDMETIC 6*, (2017): 181-202.
5. Jackson N. C. Managing for competency with innovation change in higher education: Examining the pitfalls and pivots of digital transformation. *Business Horizons*, 62 (2019): 761-772.
6. Mora H. L., Sanchez P. P. Digital Transformation in Higher Education Institutions with Business Process Management: Robotic Process Automation mediation model in: *Proceedings of the 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)*, 2020. doi: <https://doi.org/10.23919/cisti49556.2020.9140851>.
7. Kopp M., Gröbinger O. and Adams S. Five Common Assumptions That Prevent Digital Transformation at Higher Education Institutions, in: *Proceedings of the 13th International Technology, Education and Development Conference*, Valencia, 11-13 March 2019, pp. 1448-1457, doi: <https://doi.org/10.21125/inted.2019>.
8. Marks Adam, Maytha AL-Ali, Reem Atassi, Abedallah Zaid Abualkishik and Yacine Rezgui. Digital transformation in higher education: a framework for maturity assessment, *All Works*. 4073, 2020. URL: <https://zuscholars.zu.ac.ae/works/4073>.
9. Dæhlen M. From dual digitalization to digital learning space: Exploring the digital transformation of higher education. *Computers & Education*, vol. 182, 104463, 2022. doi: <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2022.104463>.
10. Altbach P. G. and J. Knight. The Internationalization of Higher Education: Motivations and Realities. *Journal of Studies in International Education*, 11, (2007): 290-305.
11. Oude Vrielink R. A., Jansen E. A., Hans E.W., et al. Practices in timetabling in higher education institutions: a systematic review. *Ann Oper Res* 275, 145-160 (2019). <https://doi.org/10.1007/s10479-017-2688-8>
12. Philip G., Altbach L., Reisberg L., Rumbley E. Trends in global higher education: Tracking an academic revolution. The Netherlands: Brill, 2010. doi: <https://doi.org/10.1163/9789004406155>
13. Kosiyuk M. M., Bilovskyi K. E. and Lysak B. M. Automated Information Management System of Higher Education Institution «Electronic University», *ITLT*, vol. 93, no. 1, (2023): 96-116.
14. Bogdan M. How to Develop a University Management Software (2019). URL: <https://kindgeek.com/blog/post/how-to-develop-a-university-management-software>
15. Elhoseny M., Metawa N., Hassanien A. E., An automated information system to ensure quality in higher education institutions, in: *Proceedings of the 2th International Computer Engineering Conference (ICENCO)*, 2016. doi: <https://doi.org/10.1109/icenco.2016.7856468>
16. UniTime. University Timetabling. URL: [www.unitime.org](http://www.unitime.org).
17. Gritsenko V. G.. Nowadays analysis of using information and communication technologies in the universities management. *Collection of scientific papers Kamianets-podilskyi national Ivan Ohienko university. Pedagogical Series. no. 20* (2014): 256-259.
18. Murtadho M. A., Wahid F. Permasalahan Implementasi Sistem Informasi Di Perguruan Tinggi Swasta. *Jurnal Ilmiah Teknologi Sistem Informasi*, 2(1) (2016): 17-21.
19. B. McCollum, N. Ireland. University timetabling: Bridging the gap between research and practice, in: *Proceedings of the international conference on the practice and theory of automated timetabling (PATAT)*, 2006.
20. Willemsen R. J. School timetable construction : algorithms and complexity. [Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Mathematics and Computer Science]. Technische Universiteit Eindhoven (2002). <https://doi.org/10.6100/IR553569>
21. Perumal Sundresan, Tabassum Mujahid, MD Norita, Samy Ganthan, Perumal Sivananthan. Advancement of a productive Timetable System, in: *Proceedings of the Global Conference on control framework, figuring and Engineering*, 23-25 November 2018, Malaysia.

Received (Надійшла) 16.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

**Автоматизована система управління закладом вищої освіти:  
управління розкладом та логістикою освітнього процесу**

О. А. Двірна, К. Ю. Вергал, Ю. В. Іванов

**Анотація.** В статті розглядаються особливості функціонування автоматизованої системи планування, організації, управління та контролю навчального процесу у вищих навчальних закладах. Розглянута структура та взаємодія основних компонентів автоматизованої системи управління iZETA. Особлива увага приділена розробці модулю, який відповідає за складання навчального розкладу та забезпечує логістику освітнього процесу. Створено та запропоновано інтерфейс модулю, описано його основні компоненти та функціонал. За допомогою UNL діаграми прецедентів відображено ролі основних акторів, які приймають участь у роботі модулю складання навчального розкладу.

**Ключові слова:** інформаційна система, вищий навчальний заклад, розклад, навчальний план, студенти, архітектура системи.



T. Dmytrenko, T. Derkach, A. Dmytrenko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## USING JAVA AND C # PROGRAMMING LANGUAGES FOR SERVER PLATFORMS AND WORKSTATIONS

**Abstract.** The paper analyzes the features of the use of known programming languages Java and C #, and their use in software development for server platforms and workstations. Their main advantages and disadvantages are investigated, some differences in their syntax are compared. Based on the existing dynamics of popularity, the prospects of Java and C # programming languages are shown. By comparing a simple synthetic test, their speeds were compared on the Java virtual machine version 1.8 and the Microsoft .NET Framework version 4.5. As a result, recommendations for further use of Java and C # programming languages are offered.

**Keywords:** Java, C #, JVM, .NET, programming.

### Introduction

Nowadays, two popular and rapidly developing competing programming languages are Java and C#. Even though C# appeared much later than Java, they have a lot in common, but as they say, nothing is perfect.

This case is not an exception, and in this article, an analysis of the advantages and disadvantages of each of them is carried out. When comparing C# and Java, we must start with their origin stories. What is the reason for this? Well, mainly because of their similarity, which explains the many similarities you face today between these languages. C # and Java languages appeared at different times. The Java language was created long before C #. Under the name Oak Java was developed by Sun Microsystems in 1990, and in 1995 the first beta version of Java was released. The creation of C # was announced in 2000, and in 2002 the first version of the .NET platform supporting C # was released. Thus, if Java was created based more on the experience of Objective C and C, then for C # such support was C ++ and Java itself. And, despite its name, C # turned out to be closer to Java than to C ++. From the developer's point of view, Java and C # are very similar. Both languages are strictly typed and object-oriented. Both incorporate much of the C++ syntax, but unlike C++, are easier to learn for beginners. Both borrowed from C a set of basic keywords and service symbols, including curly braces for delimiting blocks. Both languages come with rich library collections. But languages also have their features and differences, strengths, and weaknesses. C # took into account many shortcomings of Java and corrected them in its implementation. But Java does not stand still, evolving in parallel with C #. Kick Redek of Microsoft considers C # to be a more complex language than Java. According to them, "*Java was built to keep a developer from shooting himself in the foot*", and "*C # was built to give the developer a gun but leave the safety turned on*" [1].

**The purpose of the article** is analysis of Java and C # programming languages' functionality. Considering the advantages and disadvantages of each language, determine the best option for software development.

### Presenting main material

C# is a product of Microsoft and the main direction of this language is products for the operating system of the Windows family, both for desktop computers and for mobile devices. The Unity 3d game engine, on which many games are developed, is also gaining popularity,

primarily due to its cross-platform nature (the ability to run on different operating systems) [2]. Using the Xamarin platform allows you to use C # to develop applications for various operating systems, including Android. Although the system is quite new and at first glance very promising, it is not known exactly how long it will take root. This is due to the fact that Microsoft sometimes closes its products if it sees their futility. This can be easily verified by installing their main tool for developing Microsoft visual studio software. If you compare their versions, you can see that older versions contain such tools for program development, which are excluded in more modern versions of Microsoft visual studio, such as J # [3]. In this approach, Microsoft has both advantages and disadvantages. The advantages are that to maintain the relevance of products, it is necessary to spend company resources that can be used to develop more promising products. The main disadvantage is that the programmer will have to learn another language and start all over again, which is not good for him, as well as for the company's reputation in his eyes. The strictness of the language helps to avoid many obvious mistakes. Java, according to statistics, ranks first in popularity. The scope of this language is very large and it supports the ability to run programs almost anywhere: almost all operating systems, personal computers, servers, mobile phones (using Java mini), Android operating system, GPS navigators, VCRs, satellite systems, pressure meters, heart rate monitors, even bracelets to measure the quality of human sleep, etc. According to official developer data, Java is used on more than 3,000,000,000 (three billion) devices [4]. The approach of Java developers in the field of stability is completely opposite to Microsoft. New Java components are tested long before they are fully marketed and are not removed after they are released. Undoubtedly, this method has a significant disadvantage, the novelty of the product is introduced very slowly. Despite this, nowadays, the latest version of the Java language is almost not inferior in innovations to C# [5].

Regarding the comparison of the performance of programs written in Java and C#, we can say that this comparison is a synthetic test, and its purpose is to compare how long it will take programs written in C# (net 4.5) version "Release" and Java (1.8) to complete tasks in the Windows 10 operating system. For example, consider the process of creating the same class a given number of times, for example, 1,000,000,000 times, in which the same mathematical functions are performed. Programs were run not from editors, but from created files, which were created not as Debug versions, but as Release.

As a result of the test, you can clearly see that to perform the same operations, the program in C# took more time than the program in Java, ie a program in Java performs the same operation several times faster than a program in C# [3].

There is a set of libraries for both languages, which allows you to build a user interface for desktop applications. In the case of Java, these are the Swing and SWT multiplatform libraries, as well as the platform JavaFX, which allows you to create RIA applications.

For C# on the Windows platform, the main platforms for developing desktop graphical applications are Windows Forms and WPF. There is a special WinRT platform for development under Windows 10. For other platforms, the gtk# library, created as part of the Mono project, is used. Developments that are originally based on Windows are usually built on Windows Forms, their transfer to another platform becomes time-consuming [4]. C# development in the Mono environment using gtk# is ported, but much less. There is no implementation of the WPF platform within the Mono project, so WPF programs are not portable to Linux-based operating systems.

C#, along with Java, is gradually becoming popular on several Linux and BSD-based operating systems. The implementation of the Mono project was a legally painless process, as the CLR and C# languages are standardized by Ecma and ISO, and anyone can implement them without worrying about the legal side of the case. At the same time, it should be noted that a program written in a Windows environment can have significant problems running under another OS [1]. For server software development, these two programming languages are closest to being considered competitors. Java with its J2EE (Java (2) Enterprise Edition) platform and C# with its ASP.NET are at odds when it comes to creating dynamic web content and applications. Both programming languages are widely used and supported in this market, along with a set of tools and related products created in JavaEE and .NET [2].

Since the creation of C#, it is constantly compared with Java. There is no denying that C# and its CLR control shell owe much to Java and its JRE (Java Runtime Environment). It is arguable that C# development is the result of Microsoft's recognition that the Java-led control code shell has many benefits in a growing networked world, especially with the advent of the Internet on non-

personal devices and the growing importance of network security. [3]. Prior to the creation of C#, Microsoft modified Java (creating J++) to add features that only work on Windows, thus violating the Sun Microsystems license agreement. The development of these two programming languages, as well as their APIs, binaries, and execution environments, is governed differently. C# is defined by ECMA and ISO standards, which specify the syntax of the language, the format of the executable modules (known as CLI), and the Base Class Library. The standards do not include many new libraries, such as libraries for databases, GUIs, and web applications. To date, no component of the Java environment is standardized by Ecma, ISO, ANSI, or any other standards organization. While Oracle retains unlimited exclusive legal rights to modify and license its Java trademarks [4].

### Conclusions

Today, Java is more popular than C#, and considering the popularity graphs, the situation will not change in the near future. C# attracts primarily because you can write anything on it, thanks to the .NET platform and a huge number of frameworks. However, despite its affinity with C++, it is quite friendly to beginners. The syntax of C# is more concise because signs are used instead of long words. Its special advantage is the ability to divide classes into separate parts and files with the instruction "partial". In terms of software development speed, C# is once again the leader – it is possible to write a simple program using GUI (graphical user interface) faster than Java [5]. If the program must be cross-platform, there are no options when choosing between C# and Java – Java will be better in this case. In the speed of the conducted synthetic test, Java won by a significant margin. Thus, we can conclude that if you need stability, cross-platform, and speed of the program itself, it is better to write in Java, and if you need to write a program that will run on Windows then it will be more profitable to choose C#. In general, do not worry too much about this choice. C# was originally created as an analog of Java, so the languages are quite similar. After all, a programming language is just a tool, and C# and Java are like two tools that are the same in purpose but from different companies. Therefore, the main thing is to learn how to use this tool, and which one you have specifically is not so important.

### REFERENCES

1. Jeffrey Richter CLR via C#. Programming on the Microsoft.NET Framework 4.5 in C#: Print2print. – 2020. – 896 p.
2. Andrew Troelsen, Philip Jepix C# 6.0 programming language and .NET 4.6 platform: Apress. – 2016. – 1440 p.
3. Joseph Albahari, C# 10 in a Nutshell. The Definitive Reference: O'Reilly. – 2022. – 1058 p.
4. Herbert Shieldt Java 9. Complete Guide: Науковий світ. – 2023. – 752 p.
5. Robert Laforet Data Structures and Algorithms in Java: Print2print – 2016. – 704 p.

Received (Надійшла) 18.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

### Використання мов програмування Java та C# для серверних платформ та робочих станцій

Т. А. Дмитренко, Т. М. Деркач, А.О. Дмитренко

**Анотація.** В роботі проведено аналіз особливостей використання відомих мов програмування Java та C#, та використання їх у розробці програмного забезпечення для серверних платформ та робочих станцій. Досліджено їх основні переваги та недоліки, проведено порівняння деяких відмінностей у їх синтаксисі. На основі існуючої динаміки популярності, показана перспективність мов програмування Java та C#. Шляхом простого синтетичного тесту було проведено порівняння їх швидкостей на платформі Java virtual machine версії 1.8 та Microsoft .NET Framework версії 4.5. В результаті запропоновано рекомендації, щодо подальшого використання мов програмування Java та C#.

**Ключові слова:** Java, C#, JVM, .NET, програмування.

Y. Zhyvylo <sup>1</sup>, V. Kuz <sup>2</sup>

<sup>1</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

<sup>2</sup> Kruty Heroes Military Institute of Telecommunication and Information Technologies, Kiev, Ukraine

## TECHNICAL REQUIREMENTS FOR THE PHYSICAL AND APARTMENT INFRASTRUCTURE OF THE MOBILE DATA PROCESSING AND STORAGE SYSTEM FOR THE DATA PROCESSING CENTRE OF THE CONTAINER TYPE OF FINANCIAL INSTITUTIONS, ENTERPRISES, ORGANISATIONS

**Abstract.** In modern conditions, the amount of information is constantly increasing, and at the same time, the speed of doing business is increasing. According to Gartner Group estimates, the global average amount of user data per company is 120 terabytes. In turn, according to IDC calculations, last year 35 billion messages were sent in one hour in the world. If these numbers are taken into account, it turns out that one message accounts for approximately 3.4 Mb of information. To be successful, companies not only have to operate with large volumes of data, but also process it quickly and efficiently. At the same time, according to the opinion of the world's leading experts, there are about 40 key macrotechnologies in the world today that determine the level of the economy. These processes were significantly influenced by the specifics of the formation, constant development and transformation of cyberspace. In these areas, breakthrough achievements are predicted, first of all, in artificial intelligence, cloud technologies, internet of things, productivity and nature of computing devices, possibilities of storage, processing and transmission of large arrays of data and information (Big Data), means and technologies for their implementation on radically new principles. The capabilities and vulnerabilities of almost all modern infocommunication and cybernetic systems increasingly depend, in addition, on the growth of the interrelationships of various information systems and control systems among themselves in multiparametric, multidimensional cyberspace and their informational and cybernetic interpenetration, interaction and interdependence, etc. Therefore, taking into account the above, it is necessary to focus primarily on the creation of permanently functioning data processing centers (data centers), and under the conditions of our state's opposition to the aggressor country, to develop appropriate data processing and storage systems on mobile platforms. Another, quite significant and meaningful component is taking into account the modern structures of information protection and cyber security systems, which involve the use of a fairly powerful line of tools, both at the technological and software levels, the use of extensive relevant architectures, protection methods aimed at prejudice, detection and response to potential cyber threats.

**Keywords:** information, data processing, asset, cyber threats, cyberspace, communication system.

### Introduction

**Problem statement.** The unique capabilities of data centers (DC) guarantee the efficiency and uninterrupted operation of any organization, helping to solve most of the problems inherent in any type of business.

Multicomponent systems provide:

- high reliability of information storage at a fully justified cost;
- significant cost savings due to a variable selection of services and opportunities, which is especially relevant when implementing new IT projects;
- reduction of costs for renting premises, service of equipment and payment of electricity;
- creation of conditions for smooth operation and interaction of the head office and the network of branches;
- the possibility of organizing a reserve office in case of need.

Modern DC allow you to work with a large flow of information, organize centralized data storage, increase the reliability of the entire information infrastructure and ensure communication between the DC and users.

An improperly designed and deployed DC, savings on life support systems: the subsystem of ventilation, air conditioning, fire extinguishing, access control and video surveillance, this can cause negative consequences. Violation of stable functioning or technological processes of DC operation can block

access to information, and in the worst case, it will be irretrievably lost. Therefore, it is extremely important for all financial institutions of our country to develop and implement the relevant technical requirements (TR) for data processing and storage systems (DPSS) of container mobile data centers, as well as to ensure the stable operation of the corresponding subsystems in the conditions of the existing risk of violation of banking operations through cyberspace.

Understanding the needs of the present day for conducting business, there is a rather urgent question regarding the creation of an effective and reliable data center (data center), and in the conditions of our country's war, to foresee the development of appropriate the DPSS on mobile platforms. The basis of the implementation of such solutions is the principle of access to corporate network resources and virtualization, which will allow to rationally distribute the load on equipment and ensure uninterrupted operation of applications. The development and implementation of the specified systems (centers) will ensure data storage, backup and data recovery, guaranteed accessibility to all corporate assets. At the same time, the territorial location of data and servers does not matter at all, you can work with data from anywhere, having an access interface and an Internet connection. If necessary, it is possible to organize work from mobile devices.

**Research publications.** Ensuring the stable functioning of electronic communication systems and

networks of financial institutions of Ukraine in special conditions and ensuring uninterrupted operation of departmental information systems in conditions of martial law, data storage (information), ensuring access to information resources of subjects and users is carried out in accordance to the current legislation of Ukraine, regulatory acts of the National Bank of Ukraine, taking into account international standards, generally accepted international practices and principles [1], in particular:

- Law of Ukraine "On Electronic Communications" (current edition dated 03/31/2023), document 1089-IX;

- Law of Ukraine "On Basic Principles of Ensuring Cyber Security of Ukraine" (Verkhovna Rada Bulletin, 2017, No. 45, Article 403, with amendments), document 2163-VIII;

- Law of Ukraine "On banks and banking activity" (information of the Verkhovna Rada of Ukraine, 2001, No. 5-6, Article 30, with amendments), document 2121-III;

- Law of Ukraine "On Financial Services and State Regulation of Financial Services Markets" (Publications of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 2002, No. 1, Article 1), document 2664-III;

- Resolution of the Board of the National Bank of Ukraine dated September 28, 2017 No. 95, document v0095500-17, "On approval of the Regulation on the organization of measures to ensure information security in the banking system of Ukraine" [2];

- National Standard of Ukraine on Information Security DSTU ISO/IEC 27000:2015 "Information Technologies. Protection methods. Information security management system. Overview and dictionary";

- National Standard of Ukraine on Information Security DSTU ISO/IEC 27001:2015 "Information Technologies. Protection methods. Information security management systems. Requirements" [10];

- National Standard of Ukraine on Information Security DSTU ISO/IEC 27002:2015 "Information Technologies. Protection methods. Compendium of practices regarding information security measures";

- Internal Statutes.

The supply of SOZD mobile data center of the container type is carried out on the basis of:

- the Law of Ukraine "On Information" (information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 1992, No. 48, Article 650, with amendments), document 2657-XII [3];

- Law of Ukraine "On the Protection of Information in Information and Communication Systems" (information of the Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 1994, No. 31, Article 286, with amendments), 80/94-VR;

- Law of Ukraine "On Electronic Trust Services" (Verkhovna Rada Bulletin, 2017, No. 45, Article 400, as amended), 2155-VIII;

- Law of Ukraine "On the National Informatization Program" (Adopted on December 1, 2022, entered into force on March 1, 2023), 22807-IX;

- Law of Ukraine "On Protection of Personal Data" (Vedomosti Verkhovna Rada of Ukraine (VVR), 2010, No. 34, Article 481, as amended), 2297-VI.

The above-mentioned regulatory documents and standards provide requirements for the minimum necessary package for the creation, development and use of information systems, networks, resources and information technologies, which are built on the basis of the use of modern computing and communication technology, as well as the creation, implementation, technical support (TS) and improvement of the management system of information security and cyber protection [4].

At the same time, more and more organizations are also realizing that traditional security solutions and manual procedures are no longer sufficient to implement and maintain financial sector security policies. In this context, organizations (institutions, enterprises) are not prohibited from building up their capabilities in matters of information and cyber security. But, taking into account the principles of ensuring information security and cyber protection generally accepted in international practice, financial institutions must manage cyber security risks in their activities, on the objects of the critical information infrastructure of the banking system [5], in accordance with international standards, standards of the European Union and NATO.

The most leading compliance protocols (their releases and components) that financial organizations can no longer ignore are [6]:

1. The Payment Card Industry Data Security Standard (PCI-DSS). A security standard for protecting payment data throughout the payment lifecycle.

2. The Sarbanes-Oxley Act (SOX), the modern database (DB) on "reform of open joint-stock companies and investor protection" and "corporate and audit reporting and responsibility".

3. The Monetary Authority of Singapore-Technology Risk Management (MAS-TRM).

4. General Data Protection Regulation (GDPR).

5. Gramm-Leach-Bliley Financial Services Modernization Act (GLBA) is protection of records and information about clients, the procedure for modernization of cyber security systems of financial institutions.

Therefore, programs, tasks, projects and informatization works aimed at the creation, development, integration and support of information and communication systems, networks, resources and information and communication technologies [7], as well as the fulfillment of security requirements are contained in a wide set of standards regulations, mandates, and guidelines that include PCI-DSS, SOX, and MAS-TRM.

**The purpose of the article** is to formulate the general technical requirements for the DPSS mobile data center container type of institutions, enterprises and organizations of the financial sector of the state.

### The main material

Justifying the purpose of the article, it is proposed to outline the main material of the study according to the following structure:

- general requirements;
- requirements for the DPSS;

- requirements for hyperconverged infrastructure.  
 - requirements for the hardware platform of the data backup and recovery system.

**General requirements (Table 1).** The DPSS equipment must be assembled, mounted, configured and tested by the supplier in a container-type mobile data center. The DPSS should work in 24x7x365 mode. The DPSS must be provided with warranty service, technical support and software license updates. The supplier performs design, debugging, maintenance and support of servers and the DPSS exclusively by qualified and certified specialists. All equipment and systems as a whole must comply with current environmental, sanitary, fire and explosion safety standards, as well as other applicable regulatory documents of Ukraine.

**Requirements for the DPSS (Table 2).** The DPSS must be designed and supplied by a single manufacturer and consist of two subsystems, namely:

- data processing and storage (hyperconverged infrastructure);
- data backup and recovery.

**Requirements for hyperconverged infrastructure.** The software and hardware complex must be delivered in the form of a hyperconverged infrastructure. That is, the server equipment, data storage subsystems, virtualization environment and control systems of the complex must be supplied in the form of a single integrated physical device (solution) compatible with the existing solution of the financial institution (Dell EMC VxRail AllFlash). The architecture of this solution must be standardized by the

manufacturer, described in the documentation and serially produced as a single system.

The manufacturer's technical support service must act as a single point of entry and must not redirect the customer to any other technical support services for software or hardware components included in the solution.

A single monitoring point (single interface) of all hardware and software resources of the complex should be provided. The monitoring system should display all hardware components of the complex in the form of a logical structure.

The monitoring system must support integration with VMware vCenter and display the relationship between certain hardware resources and hypervisors. The monitoring system must ensure the compliance of the installed versions of the manufacturer's microcodes and software, as well as ensure the security settings of all components are checked in accordance with the specified corporate security policies.

The system architecture should eliminate a single point of failure. Servers, network infrastructure, power distribution of all equipment and control systems must be fully duplicated.

Hyperconverged infrastructure should ensure compatibility and automation of network parameters in virtualization environments ESXi (VMware), Hyper-V (Microsoft), Openstack (RedHat, Ubuntu), Docker (Kubernetes) container environment, as well as in the combination of several hardware virtualization platforms within the data center.

Table 1 – Key characteristics of the solution

Name	Requirement
Physical parameters	The hyperconverged system must be compatible with a 19" mounting cabinet for server equipment and consist of "server" nodes with processors of the x86 architecture with the possibility of replacing the server without stopping the operation of the entire system. The servers must be equipped with cable organizers for ease of maintenance.
Fault tolerance	Hardware redundancy of power and input/output buses. Each system node must be equipped with hot-swappable power supplies with 1+1 availability level.
Network interface	Each server node must have at least four SFP+10GbE ports and one 1GbE port for management.
Management of a hyperconverged system	A hyperconverged system must be equipped with all the necessary hardware and software tools to implement the following main components: - the provision of a single management interface for all equipment included in the system via the Web. Role restriction of administrator rights; - the control system must be fault-tolerant and be hardware-reserved. Complete failure of the control system should not lead to simple functioning; - the monitoring the performance of the used servers. The possibility of remote installation of software necessary for the operation of the server, including the operating system; - the management at the level of policies integrated with VMware vSphere with the possibility of performance control; - the system should provide management of event logs and analysis of the cause of the incident. The event analytics system must be integrated into the VMware environment.
Data access infrastructure requirements	The data storage subsystem should be based on software-defined data access architecture technologies with the ability to balance load and fault tolerance between all hardware components at the hypervisor core level and use flash drive technologies, deduplication and real-time compression. If it is impossible to implement the subsystem at the hypervisor level, it is necessary to add additional computing resources for virtual machines (VM) that must provide this function. The system must include All Flash disk space based on SSD disks, which can be configured in different levels of data protection: without protection, in a mirror, in a double mirror, in fail-safe groups 3+1 and 4+2 using erasure coding technology, depending on the criticality of the data and use to cache a write operation. Availability of data encryption functionality and "stretched" functionality between cluster data centers. The data storage subsystem must provide logical segmentation of data access at the level of each VM or VM file (a data access failure of one VM should not affect the work of others). It should be possible to assign a protection level to each VM file and set access priorities to disk resources (bandwidth). The data storage system (DSS) must support the creation of a single cluster on the scale of two or more data centers with simultaneous access to data on both resources. The DSS must provide data protection at the level of failure of at least one disk or server node. The system must be able to scale within each node of the cluster and by adding additional nodes. The data storage subsystem should include the possibility of synchronous and asynchronous replication between various systems, both software-defined and classical, based on controllers.

End Table 1

	Appropriate replication software should be provided as part of the solution. The I/O subsystem must support software-defined file access with support for file protocols (SMB, NFS) and management by VMware. Support for data encryption at the datastore and VM level.
Virtualization platform requirements	The platform must support: <ul style="list-style-type: none"> <li>- operation of the required number of VM users and VM management system and applications;</li> <li>- centralized management of the virtualization platform and automation of administration processes;</li> <li>- load redistribution mechanisms between cluster nodes without stopping VM operation;</li> <li>- mechanisms for changing VM configuration;</li> <li>- provision of mechanisms for snapshots of guest systems;</li> <li>- integration with the VDI control system;</li> <li>- creation of a hierarchical structure of pools of computing resources (CPU/RAM) of physical servers with the assignment of priorities or a dedicated resource reserve;</li> <li>- "hot" addition of processor cores and RAM for a working guest OS;</li> <li>- creation of clones of working VMs with changed network parameters and entry into the MS Active Directory domain.</li> </ul>
VMware licenses that must be included in the software and hardware complex	Provide for the availability of VMware vSphere Enterprise Plus, VMware vRealize Operations Advanced licenses for all processors of the software and hardware complex, VMware vCenter Server. software subsystem of software-defined storage, with support for deduplication and compression, and metro cluster for all processors of the software-hardware complex. All licenses must have technical support.
Requirements for a hyperconverged infrastructure server cluster:	
The total number of processor cores in the cluster servers (not including Hyper-Threading or similar technology) is at least 784 cores.	
The architecture and performance of the processor is no worse than Intel CPU GOLD 6348 2.6GHz.	
The total amount of RAM per system is at least 7168 GB.	
The total raw of the disk system is at least 322 TB.	
Server nodes that are mounted in a hyperconverged infrastructure	
Processor per node is at least two Intel Xeon Gold 6348 2.6G, 28C/56T processors or equivalent.	
The memory per node is 512 GB, memory slots are at least 32 GB. The possibility of increasing the amount of RAM at least up to 4 TB.	
Storage devices per node	At least two 400GB NVMe drives, U2 G4, Intel Optane P5800X (or similar) and support for the "hot" replacement function. At least six 3.84TB SSD drives, 2.5" with parameters no worse than 1DWPD and support for the function of "hot" replacement. The possibility of installing at least 24 drives of 2.5" (SAS/SATA/NVMe) and 4 drives of 2.5" HDDs (SAS/SATA). The node supports a disk space of at least 184 TB.
Boot disks are 2x M.2 SATA 480GB RAID1 with support for the "hot" replacement function.	
Power supply units are at least 2x 1400W 250v with C13-C14 cables connected to the PDU.	
Connecting to an Ethernet network switch per node	At least 4 10/25 Gbps Ethernet Opt SFP28 ports, without using PCIe expansion slot. At least 4 optical modules SFP+ SR Optic, 10GbE. At least 4 optical cables OM3/4 LC/LC Fiber Cable 5 meters long. Expandable by adding additional PCIe NICs.
Management requirements	The server must have software and hardware from the server manufacturer for configuring management and monitoring the operation of all components.
Management mechanism in conditions of lack of physical access to them	Graphical interface/Remote power management/Platform independent text or graphical console for displaying remote server activity management/Command ribbon and scripting interface/SSL encryption. Ability to diagnose CPU and server. DNS/DHCP support. Ability to update IPMI microcode via local network. Ability to connect images as local disk devices.
Support for hypervisors and virtualization management environments VMware® ESXi 7.0U3	
Technical support	<ul style="list-style-type: none"> <li>- at least 36 months of warranty and service support from the equipment manufacturer;</li> <li>- support must be provided 24*7*365;</li> <li>- the response time to a service request is no later than 4 hours from the moment the request is received by the service department;</li> <li>- warranty support should include replacement of failed components, access to software updates and support from the technical support center of the equipment manufacturer;</li> <li>- service, if necessary, is carried out at the location of the equipment;</li> <li>- availability of a single call center of the equipment manufacturer for receiving service requests.</li> </ul>
Implementation requirements	<ul style="list-style-type: none"> <li>- physical installation of equipment on site according to specifications;</li> <li>- installation of OS, drivers, embedded software, software for virtualization, hypervisors, cluster manager and SupportAssist agent;</li> <li>- deployment and configuration of the system in accordance with the requirements described in the manufacturer's documentation;</li> <li>- sending configuration data to the technical support service.</li> </ul>

Table 2 – Requirements for the DPSS equipment located in a separate segregated area

№	Equipment name	Unit	No.	Technical and quality requirements
1	Server	pcs.	2	Number of central processors: 2 pcs.; Central processor: at least 32 cores; RAM: at least 512 Gb; Hard Drive: No worse than 10K RPM SAS 12Gbps 2.5in Hot-plug; Total capacity of hard drives: at least 18 TB; Type of supported disks: SATA/SAS; Size and maximum number of HDD slots: 8x2.5; Number of Gigabit Ethernet ports: 2; Chassis type: Rack; Number of power supply units: 2 pcs.; Power, W: 1000.
2	Server	pcs.	4	Number of central processors: 2 pcs.; Central processor: at least 16 cores; RAM: at least 64 Gb; Hard Drive: No worse than 10K RPM SAS 12Gbps 2.5in Hot-plug; Total capacity of hard drives: at least 12 TB; Type of supported disks: SATA/SAS; Size and maximum number of HDD slots: 8x2.5; Number of Gigabit Ethernet ports: 2; Chassis type: Rack; Number of power supply units: 2 pcs.; Power, W: 1000.



**Backup and recovery system hardware platform requirements.** The software and hardware complex of data backup and recovery should be delivered as an extension of the existing solution with the possibility of data replication from different sites where the equipment is located. The hardware part of the complex (Table 3) must support:

- data invulnerability architecture, which ensures data integrity throughout the entire life cycle;
- an architecture that allows you to reduce the load on the disk subsystem due to the transfer of all data processing processes to the processor and RAM;

- technology that allows for the transfer of only unique data from the PC server or client to the system, and also provides the ability to manage data replication between similar systems;

- use of segments of variable length, which improves the level of deduplication and compression;
- real-time deduplication immediately after the backup flow enters the system and save only unique elements to the disk;
- high recovery speed, process parallelism, verification and recovery of data integrity [9].

Table 3 – Hardware part of the complex

Name	Requirement
Control module	With high-speed deduplication function at the level of variable-sized blocks without the process of buffering non-deduplicated data on disks. Write cache must be duplicated on non-volatile memory. The system must withstand power outages without a UPS and resume operation after extended periods without power.
Software	The system management software should work on the controller of the storage system, without the need to allocate an additional server for this task [10]. GUI over Web, command line interface over SSH protocol must be supported. Support for command scripts.
Scale requirements (no less)	The system must provide copy speeds of at least 15 TB/h for transfer protocols (CIFS, NFS, VTL) and at least 30 TB/h for protocols with a distributed deduplication function. Address the physical capacity of 280 TB of usable space, including hot-swap drives and RAID redundancy [10].
Storage devices	60 discs 4TB or more 7.2K NL-SAS. The system must support hot-swappable disks that are used system-wide. Their number should not be less than the number of disk shelves of the system.
Data protection	RAID-6 and support for checking data integrity using content hash
Connection ports	At least 4 10 Gbps Base-T ports and 8 10 Gbps Ethernet SFP+ ports. At least 8 optical cables OM3/4 LC/LC Fiber Cable 5 meters long.
Support of the main functionality	The deduplication technology should ensure the global exclusion of duplicated blocks and their recording in a single storage pool, regardless of the use of protocols, the type and number of virtual devices, and the type of data storage. The deduplication technology should provide functionality expansion by transferring part of the load to the server of the backup system using protocols compatible with OST. The system must support the function of end-to-end data integrity, including checking the correctness of recorded data in real time. The system must provide a constant background check of data integrity, with the condition that each block must be checked at least once a month. The system must be available 24/7 for backup and recovery. Service procedures should be launched no more than once a week and should not block basic functionality. The system must provide support for a synthetic full copy of the data. The system must have High Availability configuration settings at the controller level. In the absence of such an opportunity, provide for the storage of additional copies of data on a separate system with technical characteristics, licenses and service support similar to the main system.
Support of the additional functionality	Availability of WORM functionality (Retention Lock) of images and data encryption. The system must support the mechanism of quotas and logical isolation of data, which limits the logical volume of backup copies and access to them. The system must provide remote distributed replication of data (replication must be performed over IP channels and must provide simultaneous deduplication: only unique (non-deduplicated) blocks of data from media servers and OS agents must be replicated. The system must support extended functionality for data replication under the control and on demand of backup software using OST-compatible protocols. A replication bandwidth control mechanism must be provided. Support for two-way authentication of users and quotas for folders and all network access protocols. Support for role-based administration of backups and the system as a whole. Support for filtering access by IP and DNS name. Support for encryption of backup and replication traffic.
Support for data access protocols using IP CIFS, NFS, VTL, OST, NDMP without the use of additional devices.	
Support for caching on SSD	To cache metadata and ensure a full start of the VM with backup. The presence of a separately installed hardware adapter responsible for data compression. Availability of at least 2 SSD drives with a volume of at least 3.84TB each for caching.
Monitoring	Statistics of occupied space by customers, auto generation of service requests.
Licensing and service support	- the system must have all necessary licenses to fulfill the above requirements; - all licenses without exception must be given in possession; - technical support for all equipment for a period of 36 months with a service level of 8*5, a response to a service request within the next working day; the system must support installation in a standard rack; - if it is necessary for the organization of the normal functioning of the system or the implementation of system management involving other software products, such as an OS or a database, then all necessary licenses for additional software products must be included in the offer. The term of technical support for such components should not be less than the term of technical support for the disk system for saving backup and archive copies.

The software part of the complex must be from the same manufacturer as the hardware part, and be integrated into a single system or be an extension of the "Veeam" backup platform available to the Customer.

The software part of the complex (Table 4) should provide:

1. Centralized backup and recovery operations for complete control of data protection across multiple computing and storage environments.

- virtual and physical environments;
- critical business applications;
- data storage networks (SAN) [8], network attached

storage (NAS) and direct attached storage (DAS);

- backup storage options, including tape drives and libraries, virtual tape libraries, disk arrays, deduplication storage systems, and cloud object storage.

2. Virtual synthetic full backup.

3. Starting the VM directly from backup.

4. Data replication, namely local, remote and parallel-local and remote with continuous data protection for recovery at any point in time.

5. Management of several software products from one console.

6. Monitoring and analysis and search capabilities.



7. Authorized project administrators, developers and users to order new IT services and manage certain cloud and IT resources based on their roles and privileges.

Table 4 – The software part of the complex

System software functionality for data backup and recovery	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Backup system management support via WEB, GUI and CLI.</li> <li>- Support for VMware and Microsoft Hyper-V virtual infrastructure hypervisors.</li> <li>- Availability of clients for Windows and Linux OS (Cent OS, Debian, Fedora, Oracle Linux, Red Hat, Suse, Ubuntu).</li> <li>- Availability of clients for UNIX systems (AIX, Solaris, HP-UX).</li> <li>- Availability of agents for the following application systems and databases: Exchange, SharePoint, MS SQL, SAP IQ, SAP, SAP HANA, Domino, Oracle, IBM DB2, Informix, Sybase ASE.</li> <li>- Consistent database backup with distributed deduplication and integration with native backup tools.</li> <li>- Availability of backup indexing tools and data search organization for all created backups.</li> <li>- Support for authentication when working with backup storage devices.</li> <li>- Support for encryption of backups and data when transferred to the backup device.</li> <li>- Provision of reading and writing data directly from clients to the backup storage device with the storage of service information on the backup server.</li> <li>- Providing integration with the backup storage platform using data transfer optimization protocols, support for distributed deduplication and creation of virtual (synthetic) full copies.</li> <li>- Support for VM startup technologies directly from the secure backup storage platform, providing simultaneous writing and reading from the secure platform.</li> <li>- Provision of advanced backup and recovery capabilities of VMware virtual environments, such as: changed block tracking technology (CBT), instant access to VMs, granular recovery of objects. To minimize backup and recovery time, the use of modified block tracking technology is mandatory for both backup and recovery.</li> <li>- Ensuring the possibility of continuous data protection for VMware workloads by performing synchronous or close to it (RPO no more than 1 min.) VM replication. Continuous protection of VMware workloads should provide the ability to protect both individual VMs and simultaneous protection of selected VMs collected in protection groups and provide the ability to restore the operation of VMs to any selected recovery point within 24 hours.</li> <li>- Provision of automatic collection and analysis of monitoring data and reporting.</li> </ul>
System software performance	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Providing multi-threaded backup and recovery.</li> <li>- Support for multiplexing data streams when creating backups.</li> <li>- Support for dynamic allocation of file system backup tasks to several threads.</li> <li>- Support for deduplication at the source (before transmission over the network to the backup storage device) with recognition of repeating blocks and support for identification of variable length blocks.</li> </ul>
Reliability and integrity of information	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The software should perform automatic protection of the stored backup directory, provide the possibility of their further recovery, and also be able to notify in case of finding errors in the backup.</li> <li>- Provision of integral backup of application programs and databases.</li> <li>- Support for restoring interrupted backup sessions from a known integrity point.</li> </ul>
Integration with other management interfaces	<ul style="list-style-type: none"> <li>- The solution should provide extensions that allow integration with own management interfaces: VMware vRealize Automation, VMware vCenter, System Center.</li> <li>- Integration with vSphere with the ability to manage backup and restore operations from the virtual environment management console.</li> <li>- Support for data exchange via REST API with other systems.</li> </ul>
Software Licensing, Warranty and Deployment	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Licensing type is per active physical processors (CPU/sockets) or per volume of data to be backed up (FETB).</li> <li>- The minimum number of required licenses are 28 sockets or 160 FETB.</li> <li>- All licenses without exception must be given in possession.</li> <li>- Technical support for a period of 3 years with a service level of 8*5, a response to a service request the next working day.</li> <li>- Provide opportunities to use all types of agents for the OS, databases and application servers listed in the software functionality requirements.</li> <li>- The granted licenses must ensure the protection of productive data, application programs and databases without any restrictions: both functionally and in terms of the number of objects.</li> <li>- Backup system components and/or additional management servers must support Windows or Linux deployment.</li> <li>- If the installation of any components of the backup system requires the involvement of other software products, such as an OS or a database, then all necessary licenses for additional software products must be included in the offer. The term of technical support for such components must not be less than the term of technical support for the backup software.</li> <li>- If for the normal functioning of the software it is necessary to install additional components that may require separate hardware resources (for example, servers performing data deduplication), such hardware resources must be included in the offer, with a technical support term no less than the technical support term for the backup software.</li> </ul>

If the supplier already has a modern backup platform “Veeam” installed and functioning with extensive security and security functions, as well as the ability to access data from anywhere in the world [11], then the company can put forward additional technical requirements for the IT infrastructure, services and equipment, this is Table 5.

### Conclusions

Summarizing what has been said, it should be noted that today corporations and institutions of the global financial market process and store a fairly powerful array of confidential data, such as customer

transactions, account information and private personal data of payment cards, payment processors, etc.

Modernization of the structures and topologies of electronic communication systems and networks of financial institutions is influenced by the development of technologies, changes in the financial security environment, forms, methods and technologies of using cyber influence and new achievements in this. At the same time, this circumstance is complicated by the constant change in the volume, speed and variety of attacks, which vary from denial of service to malicious theft from the inside.

Table 5 – Additional technical requirements for IT infrastructure, services and equipment

Functionality of the backup platform	<p>The backup platform must have a distributed and horizontally scalable backup architecture, have the ability to back up itself to restore settings, provide a Rest API for remote configuration and management, and ensure the use of a central management server as a license distribution server. Backup of VM.</p> <p>The backup platform should provide the ability to back up VMs at the image level, with the ability to copy only changed blocks and save the state of applications, as well as without installing specialized applications inside the VM. The backup platform must support backup transfer, both over the transmission network and over the storage network, including backing up VMs directly from NFS storage. The backup platform must support a mechanism for automatically changing the speed of the backup process when the read response time increases at all levels of the storage system with the ability to define response time thresholds. The backup platform should have deduplication and compression mechanism of backup, the ability to exclude blocks of OS service files, as well as folders and files specified by the user, to speed up the backup process, as well as to reduce the amount of data storage. The backup platform must be able to use DSS hardware snapshots for backup, with the ability to ensure application integrity within the VM. Interaction should be implemented using specialized APIs at the storage level and without installing additional software on them.</p> <p>Testing the integrity and ability to restore VM backups.</p> <p>The backup platform should be able to create an isolated environment for the customer's production infrastructure, with the ability to use it for automatic backup testing or to create test zones. The backup platform should be able to automatically test the functionality of the backup of the VM. Verification should be performed by running associated backup VMs and/or DSS hardware snapshots in an isolated environment on a schedule, with the ability to test the performance of applications and services inside the reserved VMs. It should be possible to use both built-in verification scripts and the ability to use custom scripts.</p> <p>Backup of network resources.</p> <p>Provide the ability to create a backup copy of network resources to which public access is provided via SMB (including SMB v3) or NFS (including NFS v4.1) protocols. Support the ability to create VSS snapshots when backing up data using the SMB v3 protocol to ensure consistency. Have the functionality of storing historical versions of files, with the possibility of downloading the oldest versions to a secondary backup storage. Support the ability to use DSS hardware snapshots as a backup source for file resources, avoiding file locking limitations. Interaction should be implemented using specialized APIs at the storage level and without installing additional software on them [12].</p> <p>Storage of backup of VM.</p> <p>The backup platform must integrate with specialized backup storage solutions (deduplication disk storage device): EMC DataDomain via DDBoost protocol, HPE StoreOnce via Catalyst protocol, as well as Quantum DXi, ExaGrid and Fujitsu. A backup platform should be able to encrypt backups. The backup platform must be able to integrate with Linux-based machines to use them as secure backup repositories, allowing data immutability settings to be set to protect against deletion and modification of backup data blocks for a specified period of time. The backup platform must be able to combine different physical DSS into a logically single scalable backup storage pool, to combine the available space of individual DSS. A backup platform must be able to transfer backups between different repositories with the ability to specify a new storage depth for the backup. When transferring backup copies between repositories, the backup copy platform must be able to restore transfer of backup copies between sites using compression mechanisms and global deduplication of traffic, and hashing of information at both sites on specialized servers. The backup platform must support backup to tape libraries, including multi-streaming, the ability to pool tape drives from different tape libraries. The backup platform must be able to create a synthetic full back up when writing to tape from backups available in the disk storage of an incremental full backup cycle, without creating a temporary synthetic full copy on disk.</p> <p>Possibilities of replication and disaster recovery of VM.</p> <p>The backup platform should support direct VM replication for Microsoft Hyper-V and VMware vSphere platforms, without using intermediate backups, with the ability to ensure the creation of multiple recovery points and the transfer of only changed blocks. The platform must ensure the integrity of applications inside the VM during replication, without installing specialized applications inside the VM. When replicating VMs between repositories, the backup platform must be able to restore replicas between sites using compression mechanisms and global deduplication of traffic, and hashing information on both sites on specialized servers. The backup platform must provide switching to the replicated VM with the possibility of automatic IP address change. The backup platform must provide failover to a VM that is replicated even if the backup server is lost.</p> <p>Continuous replication and disaster recovery for VMware vSphere VMs.</p> <p>The backup platform must support continuous replication of VMware vSphere VMs, without using virtualization snapshots, which ensures minimal data loss within 2 seconds. The platform must continuously replicate the I/O operations of the VM and store them in a special log on the target datastore for several hours specified in the short-term storage policy, in order to ensure the possibility of restoring the VM to a certain point in time with a given step. The platform should provide the possibility of creating additional control points of VM recovery, which go beyond the short-term replication policy, taking into account the state of those working inside the application and ensuring their consistency, without installing specialized applications inside the VM.</p>
Support of virtual infrastructures	<p>Support for backup of virtual infrastructure based on the VMware vSphere 5.5 and higher platform, including VMware vSphere 7.0 U1, availability of VMware Ready for vSAN certification. Support for copying virtual infrastructure based on the Microsoft Hyper-V platform starting from Windows Server 2008 R2 SP1 and higher, including Microsoft Hyper-V 2019 and support for 64 TB VHDX. Support for backing up vApp containers, VMs and their metadata, as well as restoring them directly to the vCloud Director infrastructure. Support for automating tasks and ensuring the ability to work through the self-service portal for VMware vCloud Director.</p>
Integration with other management interfaces	<p>The solution should provide extensions that allow integration with its own management interfaces: VMware vRealize Automation, VMware vCenter, System Center. Support for data exchange via REST API with other systems.</p>
Software Licensing, Warranty and Deployment	<p>Requirements for technical support and updating the backup system.</p> <p>1st level technical support should be available in multiple languages. Technical support should include the possibility of updating to new versions of the basic software. Technical support must be provided 24 hours a day, 7 days a week, 365 days a year. General requirements for the supply of software.</p> <p>The license should not have any technical and functional restrictions, as well as restrictions on the further increase in the number of protected environments. The supplier must have official partner status from the software manufacturer. The supplier must provide an official authorization letter from the manufacturer confirming the possibility of supplying the software as part of the procurement procedure. The supplier must provide a license certificate for the software.</p>

The creation of permanently functioning data centers is a guarantee of business stability in the conditions of martial law. Their implementation will ensure data storage, backup and recovery, guaranteed accessibility to all corporate assets. Therefore, taking

into account the technical requirements for data processing and storage systems of container-type mobile data processing centers of institutions, enterprises and organizations of the financial sector of the state is a requirement of today.

## REFERENCES

1. Platform for effective regulation/Ministry of Economy of Ukraine, About banks and banking activity, [Electronic resource]. – Access mode: <https://regulation.gov.ua/documents/id147305>.
2. Aidina Olha Heorhiivna, State registration of normative legal acts as one of the means of protecting the rights of citizens, [Electronic resource]. – Access mode: [https://minjust.gov.ua/m/str\\_5948](https://minjust.gov.ua/m/str_5948).
3. The Cabinet of Ministers registered a draft law on the protection of technological information, [Electronic resource]. – Access mode: <https://cedem.org.ua/news/kabmin-zareyestravav-zakonoproekt-pro-zahyst-tehnologichnoyi-informatsiyi/>.
4. Resolution of the Board of the National Bank of Ukraine dated September 28, 2017 No. 95 "On approval of the Regulation on the organization of measures to ensure information security in the banking system of Ukraine", (document v0095500-17), [Electronic resource]. – Access mode: [https://bank.gov.ua/ua/legislation/Resolution\\_28092017\\_95](https://bank.gov.ua/ua/legislation/Resolution_28092017_95).
5. Order of the Administration of the State Service of Special Communications and Information Protection of Ukraine dated January 15, 2021, No. 23 "On Approval of Methodological Recommendations for the Categorization of Critical Infrastructure Objects" (document v0023519-21), [Electronic resource]. – Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0023519-21#Text>.
6. Strategy for the development of the financial sector of Ukraine until 2025, [Electronic resource]. – Access mode: <https://bank.gov.ua/ua/about/develop-strategy>.
7. Law of Ukraine "On the National Informatization Program" (document 2807-IX), [Electronic resource]. – Access mode: <http://ru.osvita.ua/legislation/law/3163/>.
8. Data storage and processing systems, [Electronic resource]. – Access mode: <https://www.pronet.ua/sistemi-zberigannya-i-obrobki-danikh/>.
9. Order of the Ministry of Finance of Ukraine dated October 5, 2004 No. 630 "On approval of the conceptual architecture of the information and analytical system of the Ministry of Finance of Ukraine" (document v0630201-04), [Electronic resource]. – Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0630201-04#Text>.
10. DK 021:2015 code 48820000-2 "Servers" (Server equipment as part of a data storage system for the development of the system of public services of the Dnipropetrovsk Regional State Administration for the fulfillment of clauses 2.2 and 4.4 of the tasks of the regional informatization program "Elektronna Dnipropetrovsk" for 2017 -2019 years), [Electronic resource]. – Access mode: <https://prozorro.gov.ua/tender/UA-2018-09-07-000361-a>.
11. How to manage IT infrastructure remotely: settings, data protection, search for vulnerabilities and other nuances, [Electronic resource]. – Access mode: <https://itc.ua/ua/articles/yak-keruvati-it-infrastrukturoyu-viddaleno-nalashtuvannya-zahist-danih-poshuk-vrazlivostej-ta-inshi-nyuansi/>.
12. Technical requirements and quality criteria of the subject of procurement, [Electronic resource]. – Access mode: [https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/tehnichne\\_zavdannya.doc](https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/tehnichne_zavdannya.doc).

Received (Надійшла) 16.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

### Технічні вимоги до фізичної та апаратної інфраструктури системи обробки і зберігання даних мобільного центру обробки даних контейнерного типу фінустанов, підприємств, організацій

Є. О. Живило, В. С. Кузь

**Анотація.** В сучасних умовах обсяг інформації постійно збільшується, і при цьому швидкість ведення бізнесу - збільшується. Згідно з оцінкою Gartner Group, середньосвітовий обсяг призначених для користувача даних, що припадає на одну компанію, становить 120 терабайт. У свою чергу, за розрахунками IDC, в минулому році за одну годину в світі відправлялося 35 млрд. повідомлень. Якщо враховувати ці числа, то виходить, що на одне повідомлення припадає приблизно 3,4 Мб інформації. При цьому, за думкою провідних світових експертів сьогодні в світі існує біля 40 ключових макротехнологій, які визначають рівень економіки. Визначним чином на ці процеси вплинули особливості формування, постійний розвиток і трансформація кіберпростору. В цих сферах прогнозуються проривні досягнення перш за все у штучному інтелекті, хмарних технологіях, інтернет-речах, продуктивності та природі обчислювальних засобів, можливостях зберігання обробки та передачі великих масивів даних та інформації (Big Data), засобах і технологіях їх реалізації на кардинально нових принципах. Можливості і вразливості практично всіх сучасних інфокомунікаційних та кібернетичних систем все більше залежать, крім того, від зростання взаємозв'язків різноманітних інформаційних систем і систем управління між собою в багатопараметричному, багатовимірному кіберпросторі та їх інформаційно-кібернетичного взаємопроникнення, взаємодії і взаємозалежності, тощо. Тому, враховуючи зазначене першочергово необхідно зосередити увагу на створенні стало-функціонуючих центрів обробки даних (дата-центрів), а за умов протистояння нашої держави країні-агресору розробити відповідні системи обробки та зберігання даних на мобільних платформах. Іншою, доволі суттєвою та змістовною складовою є врахування сучасних структур систем захисту інформації та кібербезпеки, які передбачають застосування доволі потужної лінійки інструментів, як на технологічному так і на програмному рівнях, використання розгалужених відповідних архітектур, методів захисту які спрямовані на упередження, виявлення та реагування на потенційні кіберзагрози.

**Ключові слова:** інформація, обробка даних, актив, кіберзагрози, кіберпростір, комунікаційна система.

A. Kapiton<sup>1</sup>, O. Dziuban<sup>1</sup>, R. Talybov<sup>1</sup>, B. Kanivets<sup>1</sup>

<sup>1</sup> National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## COMBINED METHOD FOR PROTECTING USER PRIVACY WHEN USING A WEB BROWSER

**Abstract.** The article examines the issue of digital tracking, which allows users to be identified using cookies and digital fingerprints. A comparative analysis of current web tracking methods shows that approaches based on detecting and blocking web trackers are less effective than methods using value substitution. These approaches do not protect against passive fingerprinting techniques and are easily detected, making them vulnerable to user identification. To solve this problem, a hybrid method of forging transmitted data is proposed, including random generation and data fusion, as well as detecting trackers for immediate protection. Attributes with a wide range of possible values and complex compatibility are proposed to be replaced by real values with minor distortions.

**Keywords:** security, confidentiality, web browser, digital fingerprint, cookie, fingerprint, web tracker.

### Introduction

One of the most common privacy vulnerabilities on the Internet is digital tracking, the slow, constant, and relentless accumulation of user data [1]. The components of this vulnerability are browsing history, application usage, online purchase information, and geolocation information. These insignificant individual data can be combined into a significant whole, which allows you to 'identify the user. Trackers collect data on clicks, views, clicks and transitions and create extensive behavioral profiles, for example, to show targeted ads or optimize website performance. However, this information can reveal political preferences, religious beliefs, race and ethnicity, education level, monthly income, consumer habits, as well as physical and mental health, and in the hands of malefactors can be used for discrimination, blackmail or propaganda [2]. For this reason, the issue of protecting one's own privacy is particularly acute. To increase the confidentiality of user data, various legal, organizational and technical measures are taken. These methods include detection and blocking the execution of the web tracker program code, as well as the substitution of data transmitted to the web resource in order to create a false user profile.

#### Analysis of recent research and publications.

Analysis of the works of leading scientists who expressed their opinions in materials published in magazines, collections of reports of conferences held in our country and abroad, gives confidence in the relevance of the researched issues. I. Sanchez-Rola, I. Santos investigate the problems of automatic analysis of web tracking. C. Giuffrida, S. Bardin, G. Blanc consider features of detection of intrusions and malicious software and vulnerability assessment [1]. G. Gebhart, B. Cypher study aspects of the use of information technologies for corporate tracking [2]. R. Laperdrix, W. Rudametkin, B. Baudry analyze the method of redirecting modern web browsers to create unique browser fingerprints [3].

### Main part

Web tracking mechanisms mainly include two methods of tracking: the use of COO files [3, 4] and the creation of a digital fingerprint of the device (browser).

Sometimes they can be used together to increase the accuracy of identification. A cookie is a piece of data that websites store in the user's browser and process each time they connect to the site. Cookies often store a unique user identifier assigned to him by a web resource, which can later be used to personally identify the user on other web resources. Cookies are classified according to their expiration date: persistent - such cookies can be stored from several months to several years and session cookies, which are deleted after the browser is closed. A cookie-based tracking mechanism consists in hosting a third-party server script on a website by adding a piece of code. Such a script will call JavaScript code hosted on a third-party web server. This code can perform various functions, for example, download and display an advertising banner of an affiliate advertising network or upload a special software library for developers to the site. It can also contain code that allows this server to install third-party files in the user's browser and track them when this script is loaded. Thus, the tracking web server can place its tracker on different websites and receive data about the user's browsing history, time spent on certain pages, and other data that is provided by a website with an embedded tracking script (Fig. 1). The disadvantage of this tracking method is that the files, and therefore the identification information about the user, are stored on the user's side. This feature leaves the user the option to delete coom files, thereby temporarily stopping digital tracking.

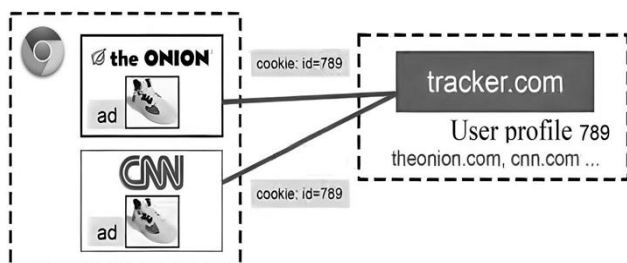


Fig. 1. Cookie-based tracking

Therefore, the mechanism of taking a digital fingerprint or fingerprinting is often used as a web tracker. A digital fingerprint is a set of information about the software and hardware-software configuration

of a client device connected to a web resource. The basic concept of digital fingerprinting is the initial and re-identification of a user based on device-specific information. Sources of information for the formation of digital fingerprint are: data about user settings; equipment characteristics; operating system characteristics; browser characteristics; user behavior.

Digital fingerprints are classified by source and are divided into: passive based on information automatically transmitted by the browser in the content of the HTTP header and active - collected when executing JavaScript code on the client side, to obtain information provided by various web browser programming interfaces (API). In addition, there are modern complex techniques for the formation of digital prints. They are the most efficient, because the result of their work depends on the hardware configuration parameters of the device, for example, on the graphics

accelerator or sound card used in the device. These techniques include Canvas Fingerprint, WebGL Fingerprint, and Audio Fingerprint. software configuration of a client device connected to a web resource. The basic concept of digital fingerprinting is the initial and re-identification of a user based on device-specific information.

Canvas Fingerprint is a method for getting device characteristics that uses the HTML 5 Web Technology Canvas element. This element is a surface capable of displaying 2D graphics in a browser using client-side code. The essence of the method is that some graphic elements and text are drawn on the element hidden from the user. The result of rendering the same code in this case may differ, depending on the operating system, font library, video card, driver version, browser engine, and so on. The resulting image is represented as a string encoded in Base64 (Fig. 2).

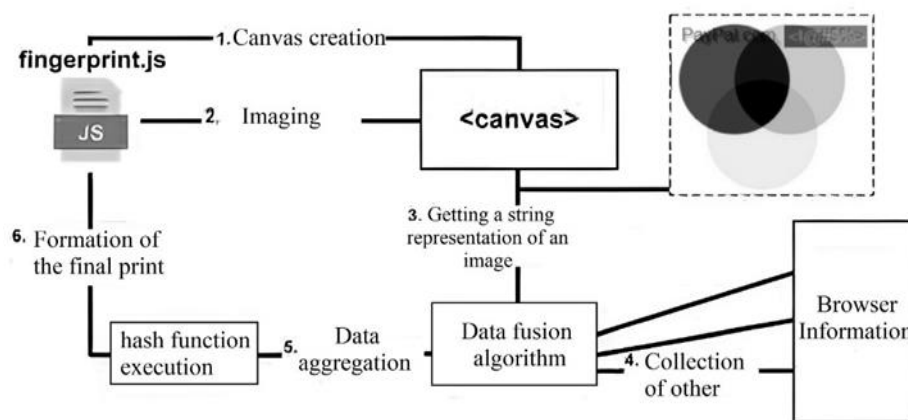


Fig. 2. Canvas Fingerprint

WebGL Fingerprint is an evolution of Canvas Fingerprint. In this case, the web tracker code causes the browser to render scenes using 3D graphics technology, which are also superimposed with various graphic effects. The resulting image is translated into the resulting byte array, which will differ depending on the hardware and software configuration of the device. Audio Fingerprint is to generate audio signals. The characteristics of such signals may also differ due to differences in the hardware or software used. This method is implemented using the Web Audio API web browser interface. In general, this fingerprinting technique is a sequential chain of nodes for working with audio in the browser and occurs in three stages: generating an audio signal, analyzing the characteristics of an audio signal, and hiding an audio signal.

Most browsers do not protect user information by default. This means that they allow you to store cookies, including those received from third parties, and also do not limit in any way the existing interfaces used in the formation of digital fingerprints. Blocking third party cookies will prevent the user from being uniquely tracked by third party websites. The task of increasing the user's protection against fingerprinting is much more difficult, since in this case the countermeasures provided by the browser are very limited and ineffective.

The essence of the method lies in the fact that third parties rely on the stability of digital fingerprints to associate them with one device. By sending random values instead of real ones, the collected fingerprints become so different and unstable that the tracker cannot identify devices on the network. The downside is that randomizing inappropriate combinations of certain parameters can result in lower user privacy.

Unification assumes that the transmitted data is brought to uniformity for each user. The problem of this method is the inability to change some attributes, for example, the characteristics of the hardware configuration of the device. The presence of unmodified unique attributes becomes a serious security vulnerability for the user, especially if they are incompatible with unified data. To solve the problem of counteracting digital tracking, a variant of a hybrid approach to replacing transmitted data is proposed, including both randomization and unification of some data. The choice of the data spoofing method is determined by the fact that it provides protection against all the considered methods of forming digital fingerprints, and it also lacks the stage of detecting a tracker, which allows for instant protection. With the proposed variant, characteristics that have a wider range of possible values and are difficult to unify (Canvas, WebGL, Audio) will be replaced by real ones

with the addition of small distortions. In turn, the attributes that must comply with the value adequacy property and whose change may disrupt the site will be subject to unification [3].

At the same time, it is planned to take into account the connectivity of the parameters with each other, as well as the adequacy of their values. It is proposed to unify the following parameters: HTTP headers (User-Agent, Accept-Language, Content-Language, DNT) and global JavaScript browser settings (navigator.userAgent, navigator.appVersion, navigator.userAgentData, navigator.vendor, navigator.platform, navigator.language, navigator.doNotTrack, screen.height, screen.width, screen.pixelDepth). First of all, before sending an HTTP request with the required headers to the requested web server, the value of the described headers will be replaced and transmitted already in a modified form. Thus, Protection against passive digital fingerprints will be provided.

Then, after the page starts loading, but before any other scripts are loaded and executed, a script will be injected and executed that will replace the values of the globally available JavaScript parameters listed earlier. After that, all other scripts on the site will be loaded. Thus, all web trackers, when trying to get the values of the characteristics through the browser API, will receive already changed values.

The next step is to provide protection against the well-known fingerprinting techniques described earlier. The general principle of protection operation for each method of hiding is the same. The security script will override the JavaScript implementation of the methods used in fingerprint generation. In the future, when a website tries to generate a digital fingerprint, when using methods, the overridden code will be executed.

The algorithm of fingerprinting technology using WebGL is similar to the previous one. However, in this case, noise will be added to the rendered scene data buffer, which is subsequently used to form a fingerprint.

The data buffer can contain the values of the coordinates of the vertices on which the drawing takes place, or the values of the colors. For Audio Fingerprint, it is proposed to replace the software implementation of some nodes that receive the characteristics of the generated audio signals. In particular, it is proposed to change the analyzer node (AnalyserNode) and the output buffer node (AudioBuffer) (Fig. 3).

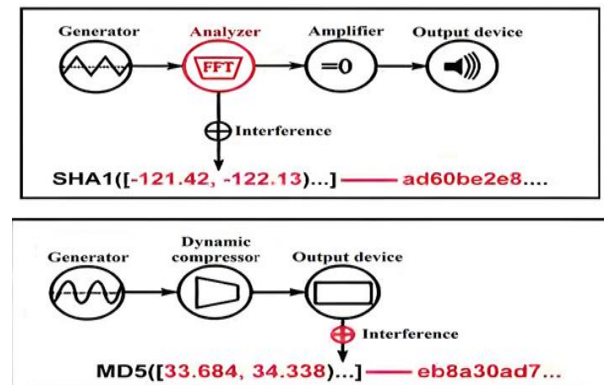


Fig. 3. Audio Fingerprint protection

## Conclusions

The possibility of violating the user's privacy when working with a web browser using web trackers is shown. The main mechanisms of digital tracking are considered, the principles of their operation, varieties and modern implementations are described. It was revealed that tracking using digital fingerprints pose the greatest danger, since they cannot be effectively blocked by the browser. A hybrid method for counteracting fingerprint tracking is proposed, which consists in unifying simple characteristics while observing the relationship and adequacy of values, as well as randomizing complex characteristics that depend on the hardware configuration of the device and are not subject to unification.

## REFERENCES

1. Sanchez-Rola I., Santos I. Knockin' on Trackers' Door: LargeScale Automatic Analysis of Web Tracking. In: Giuffrida, C., Bardin, S., Blanc, G. (eds) Detection of Intrusions and Malware, and Vulnerability Assessment. DIMVA 2018. Lecture Notes in Computer Science, vol. 10885. Springer. doi:10.1007/978-3-319-93411-2\_13
2. Gebhart G., Cyphers B. Behind the One-Way Mirror: A Deep Dive Into the Technology of Corporate Surveillance / Electronic Frontier Foundation. URL: <https://www.eff.org/wp/behind-the-one-waymirror>
3. Laperdrix P., Rudametkin W., Baudry B. Beauty and the Beast: Diverting Modern Web Browsers to Build Unique Browser Fingerprints // Materials 2016 IEEE Symposium on Security and Privacy (SP). C. 878-894, doi:10.1109/SP.2016.57

Received (Надійшла) 23.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

## Комбінований метод захисту конфіденційності користувача під час використання веб-браузера

А. Капітон, О. Дзюбан, Р. Талибов, Б. Канівець

**Анотація.** У статті розглядається проблема цифрового відстеження, яка дозволяє ідентифікувати користувачів за допомогою файлів cookie та цифрових відбитків пальців. Порівняльний аналіз сучасних методів веб-відстеження показує, що підходи, засновані на виявленні та блокуванні веб-трекерів, є менш ефективними, ніж методи, що використовують заміну значень. Ці підходи не забезпечують захист від пасивних методів зняття відбитків пальців і легко виявляються, що робить їх вразливими для ідентифікації користувача. Для вирішення цієї проблеми пропонується гібридний метод підробки переданих даних, включаючи випадкову генерацію та злиття даних, а також виявлення трекерів для негайного захисту. Атрибути з широким діапазоном можливих значень і комплексною сумісністю пропонується замінити реальними значеннями з незначними спотвореннями.

**Ключові слова:** безпека, конфіденційність, веб-браузер, цифровий відбиток, cookie, відбиток, веб-трекер.

O. Kolesnikov, G. Golovko

National University «Yuri Kondratyuk Poltava Polytechnic», Poltava, Ukraine

## THE OBJECTIVE NEED TO IMPLEMENT AN INFORMATION SYSTEM TO AUTOMATE DAILY TASKS IN RECRUITMENT WORKFLOW

**Abstract.** This article emphasizes the demand and significance of the implementation and integration of an information system for the nowadays recruitment process optimization. The article introduces the inherent characteristics and nature of information systems and outlines an essential range of tasks they can perform in the context of recruitment. This research examines and determines the direction of implementation of information technology systems, automation, and regular recruiters' routine tasks and processes optimization using artificial intelligence assistance. The primary objectives of the implementation of the proposed information system are quality improvements, human resources saving, unification of the processes, and introduction of the end-to-end solution for candidate interviewing. The weak sides of existing processes, solutions, and the correlation between the effectiveness of the recruitment workflow and work automation are determined. The article conclusively proves that the introduction and utilization of new information system tools and solutions are indispensable conditions for successful up-to-date recruitment and it would be significant input into business development strategies since it will help to not only save human resources but as well work for the company's market brand, reputation gain and significantly decrease risks of wrong hiring.

**Keywords:** systems, information systems, information technologies, automation, artificial intelligence, recruitment, optimization.

### Introduction

The critical component of every modern company is a person or rather a professional in his field. But professionals do not appear in organizations by themselves, they appear in the recruitment process. Recruitment is an integral and essential part of human resource management. The main task of recruitment is to find, evaluate and further hire candidates most suitable for a specific vacant position. The history of recruitment goes back thousands of years, the first mentions of recruitment date back to ancient Egyptian and Roman times. However, each of the eras of recruitment is united by a common need to modernize processes to adapt to changes in society and technology in order to increase efficiency [1].

In the recruitment process, the interview of the candidate is perhaps the most important stage, because a high-quality interview is an opportunity to determine at an early stage whether the candidate is really suitable for a specific position or not. Unsuccessful selection of a candidate, or a negative impression of the company can lead to derivative financial or time losses, a decrease in team productivity, a deterioration of the working climate, and additional risks. An established candidate interview process is the company's investment in the predictability of mutually beneficial and harmonious cooperation between the company and the potential candidate.

An ideal interview process consists of several stages. According to the best recruitment practices, the interview begins with introductions between present participants and a story from the interviewer about the project and its features. After completing the introductory speech, the candidate can ask questions that interest him. All this makes it possible to reduce the level of stress and mentally prepare the candidate for the most difficult stage of the interview. After completing the answers to the candidate's questions, the most responsible stage for the interviewer and the most difficult for the candidate begins - the determination of

the real level of competencies using a previously created role competency matrix (RCM) [1].

A role competency matrix is a structured tool that companies use to assess and determine skills, actual qualification levels, and competencies relative to specific positions and levels within the company. The main purpose of the role competencies matrix is to help in making mindful and informed decisions regarding the assessment of the level of qualifications of the subsequent hiring, and promotion, as well as for the construction of a further self-development roadmap [9].

**Analysis of existing information systems.** Usually, every company has a number of tools that are used to create a bank of candidates and further manage them, prepare for interviews, directly conduct interviews, etc. But the main problem with these tools is that they are not united in one single system that would allow you to do the work from start to finish in one environment, and also have structured historical data. Based on our own experience and according to the survey of recruiters in several IT companies, we can conclude that the following tools are mostly used:

- a bank of candidates is usually created using internal CRM systems or using "Google Sheets";
- for the management of the role competency matrices and the subsequent creation of a unique instance of the interview by copying the document of a specific RCM, "Google Sheets" is the most used; Fig. 1 shows an example;
- various pre-trained Large Language Models (LLMs) are used to generate texts relevant to the interview process. The Large Language Model is a neural network model deeply trained on a large dataset, which is capable of fast and efficient analysis and processing of linguistic structures. The main advantage is the ability to recognize and generate human-understandable texts [7];
- "Google Calendar" or any other alternative such as "Outlook Calendar" is usually used for meeting deadlines, reminders, and scheduling.



	A	B	C	D
1	Question	Question Notes	Answer Scores (0-5)	Answer Notes
2	How can we <b>test React projects</b> ?			
3	How to <b>block browser "back"</b> click?			
4	How to do <b>"forceUpdate" with hooks</b> ?			
5	When <b>callback refs</b> might be useful?			
6	What can you tell about <b>performance</b> in React? How can we <b>measure and improve</b> it?			
7	What is it <b>useImperativeHandle</b> ?			
8	How would you implement <b>SSR with React</b> ?			
9	If you have component which takes children and let's imagine that inside of the component you need to <b>assign specific className for each children</b> . How would you do it?			
10	How to do <b>expensive calculations only once when component mounted</b> ?	useMemo vs useState		

Fig. 1. Example of the interview instance based on RCM in "Google Sheets" (first 10 rows)

Each of the above-mentioned tools performs its atomic task well, but due to the lack of interconnection between them, problems arise at each stage of the interview that reduces the efficiency and productivity of the process as a whole.

**The research purpose.** The purpose of this article is to analyze existing best practices in the recruiting and hiring process, identify weaknesses and bottlenecks, and search for innovative technical solutions to improve and/or automate processes.

### Main part

Taking into account the results of the analysis of existing processes, solutions, and best practices, this article proposes to improve the interview process by implementing an information system that will allow organizing an end-to-end interview process, which will significantly positively affect the quality of each of stages of this process for each of the participants in this process, including the candidate. The proposed technology solution in this article will be a web application that will include the following key features:

- management of the bank of candidates (profiles), including the possibility of reviewing the history of previous interviews for each specific candidate;
- management of role competency matrix instances;
- creation of a unique instance of the interview based on the candidate's profile and competency matrix;
- the possibility of filling out and editing a unique instance of the interview;
- the possibility of automatic generation of feedback and a road map of further development based on the results of the interview powered by generative artificial intelligence;
- the possibility of sending feedback directly from the application using contact data from the candidate's profile;
- regular automatic reminders about the feedback deadline for the recruiter and interviewer.

Candidate bank management is necessary to be able to create an individual profile per each candidate. The candidate's profile will contain full name, e-mail, an optional field for phone, a CV in the form of an uploaded file, and a "Notes" field for other notes. It will also be possible to view the history of previous interviews and start a new interview on each candidate's profile.

Each company has its own standards of requirements for different specialties and different skill

levels, even more, each specialist has his own vision. In order to unify the requirements for candidates for specific positions and for specific levels, companies use the role competency matrices. Also, RCM tends to change over time. According to the aforementioned information, we can conclude that we will need to develop the feature for creating and editing role competency matrices. One of the advantages of our solution will be that all the company's role competency matrices will be in a centralized place, which will make it possible to unify quality standards at the company level and facilitate the interviewer's preparation for the interview. Also due to the fact that instead of a large number of different not connected with each other matrixes in "Google Sheets", the company will have unified role competency matrices for different roles and skill levels, which will allow companies to cooperate in the development of common high-quality RCMs, instead of many matrices of the average quality of each individual interviewer which will lead to significant quality improvements.

The combination of the candidate's profile and competency matrices within one information system will allow system users to create a unique copy of the interview very quickly and conveniently. In order to start an interview, the user needs to select a candidate, go to the candidate's profile, click the "Create interview" button, in the dialog, select the competency matrix corresponding to the candidate's position from the drop-down list and click the "Start interview" button.

According to interview best practices, before starting with the atomic questions from the competency matrix, the interview should start with general questions about past experience and relevant questions from both the interviewer and the candidate sides. This allows the candidate to reduce the level of stress, thereby minimizing the side effect of emotional fluctuations during the answers to questions from the competency matrix. But this initial stage of the interview is no less important because this stage helps to understand candidates' patterns of thinking, how the candidate resolves real business problems and interacts with the team, etc. All these details of the discussion should always be noted down. Quite often, interviewers keep notes separate from the interview, which leads to the fact that these notes are quite often lost. To resolve this problem, the interview instance will have a built-in separate field for summary notes, which will allow the notes to be saved directly with the other answers, rather than in a third-party document that will not be directly related to the interview.

After the introductory stage of the interview, the most responsible stage of evaluating the candidate's competence begins with the help of a series of questions predetermined in the company's role competence matrix, which helps the interviewer to determine how deep the candidate's knowledge relative to the specific position and level. When creating an instance of an interview, a copy of the RCM with additional columns "Scores" and "Answer notes" will be created from the competency matrix, which will allow the interviewer to assign a score to each answer and add answer notes during the interview or after its completion. Those two fields are needed to allow further analysis and evaluation of the candidate's suitability or unsuitability to a certain level in his specialty. This step is extremely important not only to reduce risks and provide a better evaluation for the company itself but also to be able to preserve historical artifacts after the interview. These historical artifacts first of all will give an opportunity to create high-quality feedback and also if the candidate does not pass the interview the first time, the artifacts will allow for subsequent attempts to compare the results of the last interview with historical data, so the company can make constructive conclusions about the candidate's developmental progression or lack thereof.

After the interview is over, regardless of whether the candidate is a good fit for the position or not, it is important to provide feedback to the interviewer. Feedback usually consists of two parts combined in one message: feedback from the recruiter and feedback from the interviewer. Usually, recruiters are more accurate and responsible in terms of providing feedback, because it is in their direct interest to close the position. Interviewers, in turn, quite often do not take feedback seriously enough and provide very low-quality and superficial feedback or do not provide it at all. Even though interviewers are usually experienced professionals in their field, there are many reasons why problems can arise during the interviewer's feedback stage, the main ones being:

- the consistently high workload on the interviewer, which forces the interviewer to save time for the main projects, or, on the contrary, to sacrifice the time allocated for the main tasks for the sake of writing detailed feedback;
- the human factor in the form of laziness or lack of attention;
- lack of knowledge and understanding that providing feedback at the end of the interview is a sign of professionalism for the company and as well of an interviewer.

In the last few years, it was absolutely proven in practice that businesses without unification, optimization, and automation of the processes would be less competitive and non-efficient in the market. Even traditional business models such as restaurant business nowadays require modernization by information systems introduction in all processes, especially in regular routine tasks to be able to supply high-quality service with fewer resource consumption [5]. In recent years, artificial intelligence technologies have turned into everyday assistants. Recruitment is no exception because the use of technologies and various tools allows for significantly increased productivity, accuracy and quality with less expenditure of both time and resources [2].

This article offers a solution to the above-mentioned problem of lack of detailed feedback using modern

generative artificial intelligence technologies. Generative artificial intelligence in the modern world has become a powerful assistant in every field of society in the form of chatbots such as: "ChatGPT" from OpenAI, "Bing" from Microsoft, "Bard" from Google, and many others [6]. These assistants are only the tip of the iceberg in the form of a convenient user interface. Taking as an example one of the most popular chatbots today, "ChatGPT", you can see that behind the scenes of this user-friendly solution is a large language model that has its own API, thanks to which the "ChatGPT" service helps people solve everyday problems of varying complexity using a familiar chat interface. Since creating a Large Language Model is an extremely resource-intensive and expensive process, we suggest using already trained neural networks, namely one of the language models from OpenAI. To solve the task of automating the creation of feedback, we will take the LLM model from OpenAI and the corresponding API for integration with our product as a basis. One of the many examples of the use of LLM, namely "gpt-3.5-turbo", is the scientific study "Large Language Models (GPT) for automating feedback on programming assignments", which was conducted in 2023. This study fully and completely confirms the effectiveness and appropriateness of involving artificial intelligence to automate the generation of feedback for programmers based on initial data. In our case, we will have different input data and expected final output results [10].

Thanks to the integration with the API of the "gpt-3.5-turbo" large language model, we will create for the interviewer and the recruiter the possibility of generating a "draft" version of the feedback, which will save the major part of the time for writing the feedback. It is important to note that the "gpt-3.5-turbo" model will perform the role of an intelligent assistant and is not designed to completely replace a person, because artificial intelligence does not guarantee an ideal result, so there is a need for final moderation by an interviewer and recruiter and, if necessary, making changes. "gpt-3.5-turbo" API allows the definition of the detailed context before the request of the output. We're going to define the context based on the interview instance and then request detailed feedback (Listing 1). The interviewer should be the first one to complete his feedback because based on it, the recruiter and CEO will analyze and make further decisions about the candidate. However, the recruiter will be able to edit the interviewer's feedback before sending it to the candidate, because they have the necessary best practices of communication and soft skills that make feedback not only constructive but also pleasant for the candidate, taking into account various psychological aspects.

Due to the presence of the candidate's profile, in which there will be a mandatory field "E-mail", we propose to implement the possibility for the recruiter to send final feedback from our web application from the page of the interview instance. The integration of sending email letters to candidates will allow recruiters to always use unified branded letter templates, and replace manual copy-paste of the before prepared in the system feedback because manual copying increases the probability of errors and enforces recruiters to do manual formatting for each individual feedback in the email clients they use. In our case, feedback text is going to automatically fit into the predefined email letter template, so no extra formatting is needed which will save a significant amount

of time. This functionality will allow not only to make the process more reliable and resources saving but also, due

to standardization, to maintain consistently high-quality feedback and work for the company's reputation.

```
import openai

openai.ChatCompletion.create(
    model="gpt-3.5-turbo",
    messages=[
        {"role": "system", "content": "Automated Interview Feedback"},
        {"role": "user", "content": "Candidate: John Doe"},
        {"role": "assistant", "content": "Interviewer: Jane Smith"},
        {"role": "user", "content": "Technical Question 1: Explain object-oriented programming."},
        {"role": "assistant", "content": "Candidate's Response: ..."},
        {"role": "user", "content": "Technical Question 2: What is the purpose of a constructor in a class?"},
        {"role": "assistant", "content": "Candidate's Response: ..."},
        {"role": "user", "content": "Technical Question 3: Implement a binary search algorithm."},
        {"role": "assistant", "content": "Candidate's Response: ..."},
        ...
        {"role": "user", "content": "Feedback Request: Please provide feedback on the candidate's responses."},
    ]
)
```

**Listing 1.** Example of the OpenAI's "gpt-3.5-turbo" API usage

Sending feedback can be considered the end of the interview lifecycle, after which the interview instance becomes read-only even for the interviewer and recruiter to prevent post-facto changes.

In addition to the quality of the feedback, it is equally important to provide it in a timely manner within the terms agreed in advance with the candidate. Feedback delays sometimes lead to significant candidate stress due to uncertainty, which also affects the subsequent impression of the company, so it's really important to meet agreed deadlines [8].

Even if the feedback is extensive and detailed, but sent with a significant delay, this will be a sign of unprofessionalism, and it will also be a blocking factor for the further steps of the recruiter regarding this candidate because the recruiter cannot take responsibility for the results of the interview with the interviewer without provided feedback by the interviewer. Also, the delay in feedback imposes the risk that the candidate will accept an offer from a company that reacted faster and provided feedback with an offer for further cooperation.

Given that it is important not only to meet deadlines but also to provide feedback as soon as possible to minimize the chance of accepting an offer from another company, there is a need to constantly remind both the interviewer and the recruiter that a specific interview instance is still not completed and waiting for feedback. Of course, you could delegate the responsibility of reminders to a recruiter, but there is nothing more valuable than a person's time that can be put to far greater benefit than constant reminders. To solve this problem, we suggest using cron jobs to solve this routine task. Cron jobs are tasks or programs that run on a regular basis at a predetermined time interval [3].

In our case, utilizing cron jobs, we will be able to implement the automation of regular reminders to the interviewer and the recruiter about the presence of interview instances that are waiting for sending of the final feedback to the candidate. The daily interval will be selected as the default value but can be changed in the system settings. The inevitability of regular systematic reminders about the deadlines for providing feedback will also be a psychological incentive for the interviewer and the recruiter not to postpone the process for a long time.

Every information system which works with sensitive user data takes responsibility for secured data storage. In our case, the system is going to have sensitive data about the company's standards and at the same time private data of candidates (contacts, CVs, history of interviews, etc.). To protect confidentiality and privacy, our application will be secured by following industry standard best practices such as Advanced Encryption Standard (AES) encryption. AES encryption is the proven way to remain the user's and business data safe. AES encryption is used worldwide including by the US government. One of the most usual use cases for AES encryption in web projects is the usage of the Secure Sockets Layer (SSL) which is the most basic but still very important best practice to protect user's data. SSL helps to encrypt transmitted data between the user and the browser. SSL helps to prevent a wide range of cyber-attacks, where Man-in-the-Middle (MitM) Attack is one of the most often used to attack web projects without SSL [4].

## Conclusion

Every solution should have its objectives. Based on the research we have made we have found that some of the recruitment processes need to be modified and automated. Our primary objective of the information system developed to be applied for recruitment interviews is end-to-end flow organization including automation of the regular routine, but still very important parts of the process such as feedback generation through AI GPT models. Those innovations should rapidly enhance business efficiency, and decrease time and money consumption per each interview with remaining high-quality standards. Also, the implementation of this system benefits both the interviewer and the candidate because of the streamlined user experience and great final result.

By integrating generative artificial intelligence, the company gains much quicker, more accurate evaluations of the candidates. Also even if the candidate was not the best fit for the specific position, automation will help to leave the candidate with the impression of a professional company because of expanded feedback which leads the company to a bolstered reputation in the market.

This automated information system offers multiple fundamental advantages compared to classic processes. The combination of the bank of candidates, matrixes of competencies, interviewing, and feedback generation

helps to build relative relationships between entities which leads to the swift processing of candidates, seeing the history of evaluations, and in general resolves regular issues of unconnected between each other services used for recruitment. If we go deeper, as a positive side effect we receive advanced coordination and predictability ensuring that staff involved in the interview process has a standardized and fair evaluation process per each candidate. The history of the interviews helps to analyze historical data to detect whether candidates made any progress since the last interview.

A detailed review of existing articles and literature relative to the field of recruitment defined the objective demand and driving influence of AI and technologies on up-to-date recruitment processes. Based on analyzed information we've found the growing trend of automation to streamline evaluations and AI usage for further feedback. That proves that our idea of automation and incorporating AI into the interview and feedback loop is actual and will help to make recruiters' and interviewers' daily jobs easier.

The product proposed in this article would be possible to scale further to be used not only in the recruitment processes of new candidates evaluation and hiring but as well for regular performance reviews of the employees to evaluate their knowledge changes and further self-development roadmaps generation on a regular basis. So there's a perspective area for further research and development in this area to cover not only the recruitment but wider human resources tasks relative to knowledge evaluation which exists in nowadays companies.

In conclusion, the information technology system designed for the organization of the end-to-end flow of interviews and final feedback generation empowered by AI – is definitely beneficial for any forward-looking organization. The core of its significance is in its ability to save both financial and human resources, but at the same time enhance the quality, accuracy, and efficiency of candidate evaluation and of the process itself. Through the integration of this solution, companies would be able to optimize their processes and get great people onboarded quicker with fewer risks.

#### REFERENCES

1. Tegze J. *Full Stack Recruiter: The Ultimate Edition* / Jan Tegze. — [S. l.] : Print2print, 2020. — 762 p.
2. Collier K. *Robot-Proof Recruiter: A Survival Guide for Recruitment and Sourcing Professionals* / Katrina Collier, Shannon Pritchett. — [S. l.] : Kogan Page, Limited, 2019. — 232 p.
3. *Running Linux* / Matthias Kalle Dalheimer [et al.]. — 4th ed. — [S. l.] : O'Reilly Media, 2002. — 692 p.
4. Golovko G. *Практичне застосування методу шифрування aes* / G. Golovko, M. Tolochyn // Системи управління, навігації та зв'язку. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 4 (70). – С. 71-74. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.071>.
5. Golovko G. *Необхідність впровадження автоматизації та інформаційної системи в процес управління ресторанним бізнесом* / G. Golovko, M. Borozdin, Y. Tokar // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2021. – Т. 2 (64). – С. 67-69. – doi: <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2021.2.067>.
6. Marr B. *Boost Your Productivity with Generative AI* [Electronic resource] / Bernard Marr // Harvard Business Review. — 2023. — Mode of access: <https://hbr.org/2023/06/boost-your-productivity-with-generative-ai>.
7. *Extracting Training Data from Large Language Models* [Electronic resource] / Nicholas Carlini [et al.] // USENIX Security Symposium. – 2021. – Vol. 6. – URL: <https://www.usenix.org/conference/usenixsecurity21/presentation/carlini-extracting..>
8. Lyons M. *So You Haven't Heard Back After a Job Interview...* [Electronic resource] / Marlo Lyons // Harvard Business Review. — 2022. — Mode of access: <https://hbr.org/2022/07/so-you-havent-heard-back-after-a-job-interview>.
9. Kuruba M. *The Role Competency Matrix* [Electronic resource] / Mahesh Kuruba // Springer. — 2019. — Mode of access: [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-7972-7\\_5](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-981-13-7972-7_5).
10. Pankiewicz M. *Large Language Models (GPT) for automating feedback on programming assignments* [Electronic resource] / Maciej Pankiewicz, Ryan S. Baker // ICCE 2023 (31st International Conference on Computers in Education). — 2023. — Vol. 13. — Mode of access: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.00150>.

Received (Надійшла) 18.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

#### Об'єктивна необхідність впровадження інформаційної системи для автоматизації щоденних завдань у робочому процесі рекрутингу

О. Колесніков, Г. Головко

**Анотація.** Ця стаття підкреслює необхідність та важливість впровадження та інтеграції інформаційної системи для оптимізації сучасного процесу рекрументу персоналу. Стаття знайомить із властивими характеристиками та природою інформаційних систем, а також окреслює спектр важливих завдань, які вони здатні виконувати у контексті підбору та найму персоналу. У цьому дослідженні розглядається та визначається шлях впровадження інформаційних технологій та систем, автоматизації, а також оптимізації буденних задач та процесів рекрутерів за допомогою штучного інтелекту. Основними завданнями впровадження запропонованої інформаційної системи є підвищення якості, економія людських ресурсів, уніфікація процесів та впровадження наскрізного рішення для проведення співбесід з кандидатами. Визначено слабкі сторони існуючих процесів, рішень, а також виявлено пряму залежність ефективності робочого процесу рекрутера та автоматизації роботи. Стаття переконливо доводить, що запровадження та використання нових інструментів, рішень та інформаційних систем є неодмінною умовою успішності сучасного процесу рекрументу та стане великим внеском у стратегії розвитку бізнесу, оскільки це дозволить не лише заощадити людські ресурси, але і працювати задля розвитку ринкового бренду та покращення репутації компанії, а також значно зменшувати ризики невдалого найму. Стаття переконливо доводить, що запровадження та використання нових інструментів і рішень інформаційної системи є неодмінною умовою для сучасного підбору персоналу та стане великим внеском у стратегії розвитку бізнесу, оскільки допоможе не лише заощадити людські ресурси, але й працювати на ринковий бренд компанії, підвищення репутації та зниження ризиків поганого найму.

**Ключові слова:** системи, інформаційні системи, інформаційні технології, автоматизація, штучний інтелект, рекрумент, оптимізація.

А. С. Коростельов, М. І. Гученко, А. Л. Перекрест, А. В. Нікітіна, К. О. Вадурін

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

## МОДЕЛЬ КОРПОРАТИВНОЇ МЕРЕЖІ БАЗОВАНОЇ НА ТЕХНОЛОГІЯХ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ ПІДПРИЄМСТВА З ЕКОЛОГІЧНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Анотація.** Зараз у світі фіксуються значні екологічні зміни. Особливо екологічні зміни відчутні в Україні, де наразі триває війна та відбулася екологічна катастрофа у зв'язку з руйнуванням Каховської ГЕС. У зв'язку з війною та зміною русла Дніпра відбувається міграція населення та релокація бізнесу, що викликають зміни у концентрації та локаціях викидів у атмосферне повітря. Тому збільшуються вимоги до якості, кількості та масштабу проведення досліджень екологічного стану повітря. Для забезпечення поставлених вимог до екологічних досліджень, а також для збільшення рівня автоматизації збору, збереження, обробки та напівавтоматичного формування звітів про дані з станцій, постів спостереження, актуальною задачею є створення програмно-апаратної інформаційної системи. Це дослідження зосереджене на створенні моделі апаратної частини інформаційної системи у вигляді мережі у Cisco Packet Tracer, що підтримує інтеграцію розумних пристроїв, для провадження процесу екологічного моніторингу. Об'єктом цього дослідження є процес моделювання корпоративної мережі. Предметом дослідження є моделювання архітектури корпоративної мережі з підтримкою технологій Інтернету речей за допомогою Cisco Packet Tracer. Метою дослідження є відтворення моделі аналітично розрахованої корпоративної мережі за допомогою Cisco Packet Tracer, що дозволить протестувати мережу у різних режимах роботи та сформувати пул рекомендованих налаштувань перед її фізичною реалізацією. У ході дослідження використано метод моделювання фізичного об'єкту в Cisco Packet Tracer та практично розподілено адреси між локальними обчислювальними пристроями. Наукова новизна роботи полягає у тому, що у перше розроблено модель корпоративної мережі з підтримкою технологій Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень, що, на відміну від інших, має дві деревоподібні топології об'єднані у початкових вузлах бездротовою мережею, що дозволяє облаштувати два відокремлені фізично блоки підприємства, без необхідності монтажу Інтернет-дротів приватними приміщеннями. У ході дослідження за аналітичними розрахунками побудовано модель мережі у Cisco Packet Tracer, визначено пул статичних адрес необхідних для підключення локальних пристроїв та сформовано алгоритм подальшого монтажу мережі.

**Ключові слова:** LAN, Комп'ютерна мережа, TCP/IP, Wi-Fi, Ethernet, IoT, Cisco Packet Tracer.

### Вступ

**Постановка проблеми.** У сучасному світі спостерігається значні екологічні зміни, що особливо помітні в Україні, де триває війна і сталася екологічна катастрофа внаслідок руйнування Каховської гідроелектростанції. В Україні внаслідок війни та зміни русла Дніпра відбувається міграція населення та перенесення бізнесу, що впливає на концентрацію та місця викидів у атмосферне повітря. Це призводить до зростання вимог щодо якості, кількості та масштабу досліджень екологічного стану повітря.

З метою задоволення вимог до екологічних досліджень та забезпечення автоматизації збору, зберігання, обробки та формування звітів за даними станцій та постів спостереження, стає актуальною задачею розробка програмно-апаратної інформаційної системи екологічних досліджень. Перед реалізацією програмної частини інформаційної системи необхідно спроектувати, провести моделювання та реалізувати апаратну частину мережі, яка задовольнятиме поставлену задачу з автоматизації.

**Мета та задачі досліджень.** Метою дослідження є відтворення моделі аналітично розрахованої корпоративної мережі за допомогою Cisco Packet Tracer, що дозволить протестувати мережу у різних режимах роботи та сформувати пул рекомендованих налаштувань перед її фізичною реалізацією.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз існуючих рішень;
- здійснити аналітичні розрахунки корпоративної мережі;

- створити власну модель проекрованої комп'ютерної мережі у Cisco Packet Tracer;

- визначити основні особливості розгортання мережі, перед її фізичною реалізацією.

**Об'єкт та предмет досліджень.** Об'єктом дослідження є процес моделювання корпоративної мережі з підтримкою технологій Інтернету речей. Предметом дослідження є моделювання архітектури корпоративної мережі з підтримкою технологій Інтернету речей за допомогою Cisco Packet Tracer.

**Методи дослідження.** У ході дослідження використано метод моделювання фізичного об'єкту в Cisco Packet Tracer та практично розподілено адреси між локальними обчислювальними пристроями.

**Наукова новизна роботи.** Новизна роботи полягає у тому, що у перше розроблено модель корпоративної мережі з підтримкою технологій Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень, що, на відміну від інших, має дві деревоподібні топології об'єднані у початкових вузлах бездротовою мережею, що дозволяє облаштувати два відокремлені фізично блоки підприємства, без необхідності монтажу Інтернет-дротів приватними приміщеннями.

**Практична цінність отриманих результатів.** Практична цінність отриманих результатів полягає у створенні повнофункціональної моделі корпоративної мережі, її налаштуванні, як для експлуатаційного режиму, та оптимізації роботи окремих пристроїв для сумісної взаємодії у одному локальному інформаційному просторі. Моделювання мережі призначене для попередньої оцінки оптимальності проекрованої мережі перед її фізичною реалізацією на підприємстві з екологічних досліджень.



## Аналіз подібних рішень

Завдяки мережам реалізується широка кількість ІТ-задач, але дослідивши матеріали у наукометричних базах за останні п'ять років виявлено мало актуальних праць пов'язаних з проектуванням комп'ютерних мереж для конкретних задач.

У подібному дослідженні, проведеному Фаті Альмушхадані [1], була розроблена комп'ютерна система електронного архівування для Департаменту охорони здоров'я Ніневії. Метою цього дослідження було створення електронної системи архівування на основі комп'ютерної мережі для організаційного використання. Дослідження показало, що ця система має позитивний вплив на адміністративну роботу, спрощуючи процес архівування та зберігання документів і офіційної кореспонденції, звільняючи простір, який раніше займали паперові файли.

Проте, дане дослідження не може повністю використовуватися для реалізації мережі підприємства з екологічного моніторингу, оскільки не передбачено використання окремих серверів для автоматичного збирання та зберігання даних зі станцій моніторингу повітря. Також не враховані апаратні потужності для проведення розрахунків та прогнозування змін екології в досліджуваному середовищі.

Наведене дослідження має свою цінність у контексті розробки апаратної частини мережі екологічного підприємства, але потрібна додаткова реконфігурація мережі згідно вимог до структури відділів та інтерпретація наведених підходів для підключення пристроїв до мережі, щоб забезпечити достатню смугу пропускання для підключення віддалених станцій дослідження повітря.

Подібним до цього є дослідження з назвою «Розробка інформаційної системи управління комп'ютерною мережею Олександрівської Загальноосвітньої Школи І-ІІІ ступенів №1 Олександрівської районної адміністрації Кіровоградської області» [2].

У першому розділі автор розглядає загальні принципи побудови локальної мережі, аналізує різні структури, включаючи одногранні та ієрархічні, і надає основні характеристики технологій ЛОМ. Також проводиться огляд наявного мережевого обладнання, розглядаються різні типи з'єднань і надається опис мережевих операційних систем.

Другий розділ дослідження присвячений опису програмно-апаратного комплексу корпоративної локальної мережі та надає рекомендації щодо планування інформаційної безпеки, визначення необхідного обладнання та налаштування обладнання для реалізації мережі.

Проте, спроектована мережа не враховує наявність серверів для зберігання та опрацювання даних від зовнішніх станцій екологічних досліджень, а також не передбачає наявність інформаційної системи для автоматичного формування звітності.

## Теоретична база дослідження

Ураховуючи розглянуті дослідження з проектування комп'ютерних мереж, для розробки мережі підприємства з екологічних досліджень було вико-

ристано навчально-методичні посібники та монографію, які містять описи та структури комп'ютерних мереж і принципи їх розробки.

Основним джерелом для проектування програмної частини інформаційної системи є монографія авторства Купіна [3]. У цій монографії розглянуті ефективні критерії, методи та моделі для керування буровибуховими роботами з використанням комп'ютерної підтримки прийняття рішень. Принципи та методи висвітлені у роботі мають значний потенціал для інтерпретації та використання при розробці ефективної інформаційної системи екологічного моніторингу, яка буде функціонувати на спроектованій апаратній мережній інфраструктурі.

Для проектування апаратної частини локальної мережі підприємства з екологічних досліджень використовувалися праці Микитишина [4, 5], які охоплюють основні напрямки комп'ютерингу, зокрема проектування, розробку та моделювання різноманітних типів комп'ютерних мереж. Ця література використовувалася на попередньому етапі роботи з проведення аналітичних розрахунків корпоративної мережі базованої на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень [6].

Для моделювання спроектованої мережі, у даному дослідженні, з використанням віртуального середовища Cisco використано методику, яка описана в посібнику Кеньо [7]. Цей посібник надає базові принципи організації, підключення, функціонування та моніторингу технології Інтернету речей за допомогою середовища моделювання Cisco Packet Tracer. Також у ньому розглядаються методи захисту сервісів Інтернету речей і надаються теоретичні відомості про екосистему Розумного Будинку та методичні вказівки щодо фізичних об'єктів або речей, які можуть бути підключені через мережу в середовищі Cisco Packet Tracer.

## Матеріали дослідження

На попередньому етапі досліджень [6] створено фізичну структуру мережі екологічного підприємства (рис. 1). Моделювання комп'ютерної мережі в даній роботі проводиться в програмі Cisco Packet Tracer (рис. 2).

Застосування серверів для хмарних обчислень у моделі корпоративної мережі дозволяє зберігати та обробляти великі обсяги даних, що зібрані з віддалених автоматичних станцій дослідження складу атмосферного повітря. Це дасть змогу реалізувати програмне забезпечення для провадження статистичного аналізу, виявляти тенденції та закономірності, що пов'язані з викидами підприємств та населення у атмосферу. Створена модель корпоративної мережі дозволяє забезпечити централізований збір даних з станцій та постів досліджень.

Фахівці технологічного відділу, за такої реалізації мережі, зможуть віддалено калібрувати автоматизовані станції екологічних досліджень, порівнювати їх показники з сусідніми, здійснювати віддалене технічне обслуговування, планувати встановлення додаткових датчиків для розширення кількості моніторингових міток.

Це спрощує процес керування віддаленим обладнанням підприємства та дозволяє ефективно використовувати його потенціал.

IP-адреси використовуються для ідентифікації пристроїв в мережі. Для взаємодії з іншими пристроями у мережі IP-адреса має бути призначена кожному мережевому пристрою (в тому числі комп'ютерам, серверам, маршрутизаторам і іншим). Такі пристрої в мережі називають хостами.

За допомогою маски підмережі визначається максимально можливе число хостів у конкретній мережі.

Крім цього, маски підмережі дозволяють розділити одну мережу на декілька підмереж.

Для коректного моделювання інтерфейсів хостів присвоєно статичні IP адреси модельованому обладнанню. Це вкрай необхідно для адекватного розподілення обчислювальних задач між серверами обробки даних та прогнозування екологічних змін. Присвоєні статичні IP адреси наведено у табл. 1.

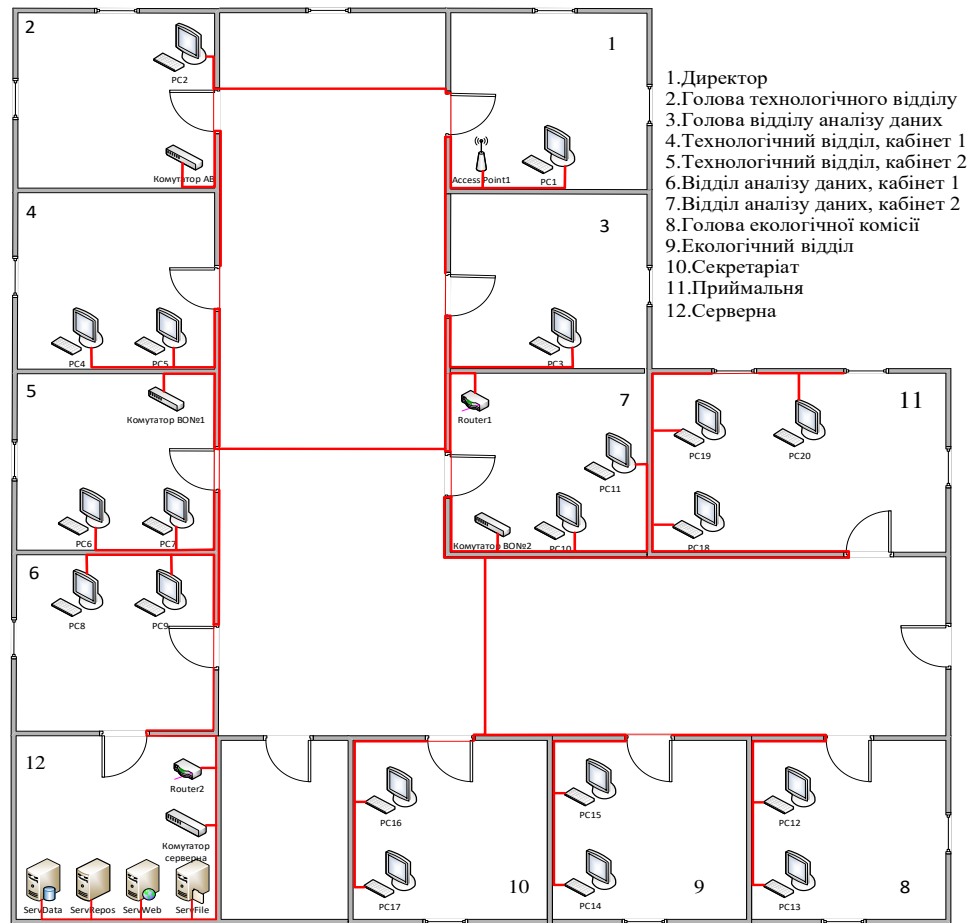


Рис. 1. Фізична структура мережі екологічного підприємства

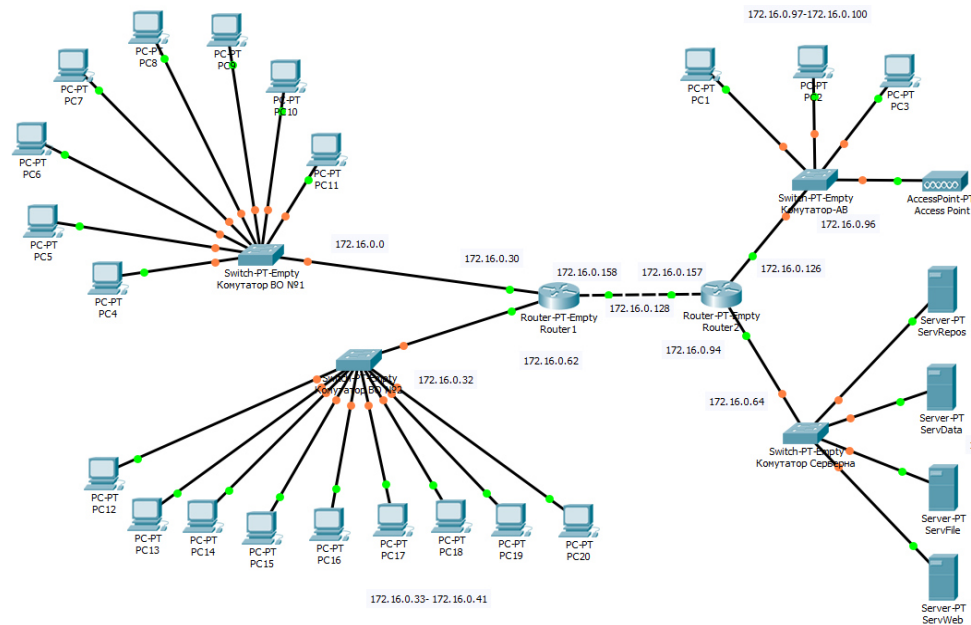


Рис. 2. Модель проєктованої комп'ютерної мережі у середовищі Cisco Packet Tracer

Таблиця 1 – Таблиця використаних IP адрес

Ім'я підмережі	Кількість обладнання	Адреса підмережі	Діапазон адрес	Мас-ка
1	8	172.16.0.0	172.16.0.1-172.16.0.30	/27
2	9	172.16.0.32	172.16.0.33-172.16.0.62	/27
3	4	172.16.0.64	172.16.0.65-172.16.0.94	/27
4	4	172.16.0.96	172.16.0.97-172.16.0.126	/27
5	2	172.16.0.128	172.16.0.129-172.16.0.158	/27



Слід зазначити, що передбачені особливості розгортання модельованої мережі при фізичній реалізації є такими:

- кабелі повинні бути захищені від фізичних пошкоджень, втручання неуповноважених осіб та впливу навколишнього середовища;
- обладнання мережі необхідно зберігати у спеціально відведених місцях захищених від впливу зовнішнього середовища та неуповноважених осіб;
- обладнання мережі необхідно регулярно обслуговувати.

Відповідальними за обслуговування та усунення проблем роботи мережі є уповноважені працівники технологічного відділу екологічного підприємства.

Серед їх обов'язків є:

- налаштування та підтримка роботи мережі та усіх її компонентів;
- підтримка працездатності робочих станцій;
- модернізація програмного та апаратного забезпечення, а також планування його удосконалення.

## Висновки та обговорення

Використання технологій IoT при проектуванні програмно-апаратної інформаційної системи дозволить автоматизувати процеси збирання, обробки, прогнозування та формування звітності за показниками автоматичних станцій екологічного моніторингу. Це сприятиме забезпеченню ефективного керування процесами підприємства з екологічних досліджень.

У даній роботі змодельовано частину такої інформаційної системи у вигляді комп'ютерної мережі у середовищі Cisco Packet Tracer. Також проведено розподіл IP адрес між локальним обладнанням, що є основою подальшої розробки програмного забезпечення для розподілених обрахунків на серверних потужностях.

У подальшій роботі планується фізична реалізація серверної частини цієї комп'ютерної мережі. Також заплановано початок проектування інтерпретації програмної частини інформаційної системи, що ґрунтуватиметься на принципах та методах висвітлених у роботі Купіна [3].

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Fathi Almushhadani A., & Khalil Alanezi M. Designing a Computer-Based Electronic Archiving System for Nineveh Health Department. *AL-Rafidain Journal of Computer Sciences and Mathematics*, 2018. 12(2). 39-48. doi: <https://doi.org/10.33899/csmj.2018.163580>
2. Торбенко О.С. Проектування комп'ютерної мережі ... Кіровоградської області / О.С. Торбенко. – Полтава: Нац. ун-т ім. Ю. Кондратюка, 2021. – 69 с. <http://reposit.nupp.edu.ua/handle/PoltNTU/10237>.
3. Купін А.І., Музика І.О. Комп'ютерна підтримка прийняття рішень для автоматизованого керування буровибуховими роботами з мінімізацією енерговитрат. *Кривий Ріг*, 2013. 200 с.
4. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д., Пасічник В.В. Комп'ютерні мережі. Навчальний посібник. Книга 1, Львів, «Магнолія 2006», 2022. 256 с.
5. Микитишин А.Г., Митник М.М., Стухляк П.Д., Пасічник В.В. Комп'ютерні мережі. Навчальний посібник. Книга 2, Львів, «Магнолія 2006», 2017. 327 с.
6. Коростельов А.С., Гученко М.І., Перекрест А.Л., Чорна О.А., Вадурін К.О. Аналітичні розрахунки корпоративної мережі базованої на технологіях Інтернету речей підприємства з екологічних досліджень.
7. Кеньо Г.В., Хома В.В. Моделювання розумного будинку в середовищі Cisco Packet Tracer, 2022. 104 с.

Received (Надійшла) 25.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

## A model of a corporate network based on iot technologies of an environmental research enterprise

Arsenii Korostelov, Mykola Guchenko, Andrii Perekrest, Alyona Nikitina, Kyrylo Vadurin

**Abstract.** Significant environmental changes are being recorded around the world. Environmental changes are particularly noticeable in Ukraine, which is currently experiencing a war and an environmental disaster due to the destruction of the Kakhovka hydroelectric power station. Due to the war and the change in the Dnipro riverbed, population migration and business relocation are taking place, causing changes in the concentration and location of air emissions. As a result, requirements for the quality, quantity and scope of air quality studies are increasing. To meet the requirements for environmental research, as well as to increase the level of automation of data collection, storage, processing and semi-automatic generation of reports on data from stations and observation posts, the creation of a software and hardware information system is an urgent task. This study focuses on creating a model of the hardware part of the information system in the form of a network in Cisco Packet Tracer, which supports the integration of smart devices, for the environmental monitoring process. The object of this study is the process of modelling a corporate network. The subject of the study is modelling the architecture of a corporate network supporting IoT technologies using Cisco Packet Tracer. The purpose of the study is to recreate the model of an analytically calculated corporate network using Cisco Packet Tracer, which will allow testing the network in different modes of operation and forming a pool of recommended settings before its physical implementation. In the course of the study, the method of modelling a physical object in Cisco Packet Tracer was used and the addresses were practically distributed among local computing devices. The scientific novelty of the work lies in the fact that for the first time a model of a corporate network with support for IoT technologies of an environmental research enterprise has been developed, which, unlike others, has two tree-like topologies connected at the initial nodes by a wireless network, which allows to equip two physically separate blocks of the enterprise, without the need to install Internet wires in private premises. In the course of the study, based on analytical calculations, a network model was built in Cisco Packet Tracer, a pool of static addresses required to connect local devices was determined, and an algorithm for further network installation was formed.

**Keywords:** LAN, Computer network, TCP/IP, Wi-Fi, Ethernet, IoT, Cisco Packet Tracer.

А. І. Кулягін

Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ», Харків, Україна

## ВИКОРИСТАННЯ РОЗПІЗНАНОЇ ЕМОЦІЇ ЯК НЕЯВНОГО ФІДБЕКУ ДЛЯ РЕКОМЕНДАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

**Анотація. Актуальність.** Через зростання цифровізації мистецтва постають задачі покращення імерсивності під час взаємодії користувача з системами extended reality мистецтвом. **Методи дослідження.** Глибока нейронна мережа з шарами занурення, 3D згортова нейронна мережа. **Мета статті:** Покращення відбору найбільш релевантних відео за допомогою використання розпізнаних емоцій користувача як неявного фідбеку в рекомендаційній системі віртуальних арт-композицій. **Отримані результати.** Було розроблено систему для класифікації емоцій користувача на відео, подальшої калькуляції емоційного скорингу та використанні отриманого значення в якості неявного фідбеку для рекомендаційної системи відбору найбільш релевантних відео для створення віртуальних арт композицій. Поєднання представлених методів дозволить покращити персоналізації рекомендацій та її збільшити імерсивність час взаємодії користувача з віртуальними арт-композиціями. **Висновок.** Розроблений у роботі підхід може бути використаний для покращення імерсивності та персоналізації рекомендацій під час взаємодії користувача з системами extended reality мистецтвом.

**Ключові слова:** глибока нейронна мережа з шарами занурення, extended reality, імерсивність, 3D згортова нейронна мережа.

### Вступ

У результаті зростаючої цифровізації мистецтва, новітніх способів взаємодії користувача з творами мистецтва, виникають проблеми з покращенням ефекту занурення під час взаємодії користувача з системами розширеної реальності (XR). Імерсивність, або ступінь занурення в середовище, є ключовим елементом систем XR мистецтва, особливо коли мова йде про мобільні додатки.

Перспективним напрямком є поєднання живопису та технологій VR/AR/MR в рамках XR [1-3].

Поєднуючи традиційні техніки малювання з технологіями віртуальної, доповненої або змішаної реальності, художники та розробники можуть створювати імерсивні та захопливі враження для користувачів. Це злиття дозволяє користувачам зануритися у віртуальний світ, де вони можуть взаємодіяти з цифровими творами мистецтва, досліджувати віртуальні галереї або навіть брати участь в інтерактивному мистецтві. Завдяки використанню XR межі між фізичним і цифровим мистецтвом стираються, відкриваючи нові можливості для творчості та художнього вираження [4].

Одним із аспектів покращення ефекту занурення в мистецькі системи є адаптація контенту та інтерфейсу до потреб і вподобань користувача. Зокрема, використання неявного зворотного зв'язку з користувачем може сприяти підвищенню ефекту занурення та спрощенню інтерфейсу користувача. Між тим, перенасичення системи явним зворотним зв'язком може знизити рівень занурення та переважати інтерфейс [5-7].

Наша ціль — розробити мобільний додаток, який би дозволяв користувачеві сканувати зображення-маркер за допомогою камери, яке б слугувало AR-якорем і відображало відео, завантажене з сервера, на місці даного якоря.

Картини в музейній композиції виконуватимуть роль маркерних зображень. Сукупність зображення та доданого до нього відео будемо називати вірту-

альною художньою композицією. Розпізнавання зображення маркера відбувається на сервері. Після розпізнавання система повинна вибрати відео, яке найбільше відповідає вподобанням користувача (за жанром, колірною гамою, композицією тощо). Відбір здійснюється з урахуванням явних (сподобалася композиція чи ні, рейтингова оцінка, додаткова анкета) і неявних (чи користувач додивився відео до кінця, як довго користувач зосереджувався на композиції тощо) фідбеків користувачів. Для цього ми використовуємо гібридну рекомендаційну систему [8].

Початкове визначення вподобань користувача здійснюється за допомогою анкетування, яке користувач може заповнити на початку використання програми. За результатами цього анкетування до профілю користувача додаються дані, які можуть вказувати на його переваги, такі як: стать, вік, улюблений колір, улюблені жанри живопису та інші [9]. Задача вибору відеоролика, який найбільше відповідає вподобанням користувача, буде вирішена за допомогою рекомендаційних систем.

У цій роботі ми припускаємо, що покращення відбору найбільш релевантних відео для створення віртуальної арт-композиції за допомогою рекомендаційних систем можна досягти шляхом використання розпізнаних емоцій користувача як неявного зворотного фідбеку користувача.

**Мета статті:** ідея даного дослідження полягає в наступному: покращити вибір найбільш релевантних відео за допомогою використання розпізнаних емоцій користувача як неявного фідбеку в рекомендаційній системі віртуальних арт-композицій.

### Виклад основного матеріалу

Неявні фідбеки користувачів — це цінна інформація про поведінку користувачів, яка дозволяє визначити їхні вподобання та інтереси. Вони можуть включати різноманітні показники, такі як тривалість відео, його завершеність перегляду, частота натискань на ті чи інші рекомендації, аналіз відгуків і багато іншого [10].

Ефективне використання неявних відгуків користувачів може революціонізувати роботу рекомендаційної системи. Надаючи більше інформації про вподобання користувача, ніж явні відгуки, наприклад оцінки чи відгуки, вони створюють вищий рівень персоналізації. Ці додаткові дані дозволяють системі отримати глибше розуміння вподобань користувачів і, отже, надавати більш точні та цілеспрямовані рекомендації.

Під час впровадження збору неявних користувачьких фідбеків необхідно ретельно розглянути деякі важливі аспекти. Давайте розглянемо деякі з них.

*Контекст.* Неявний фідбек може залежати від контексту, в якому користувач взаємодіє з продуктом або контентом. Час доби, день тижня або поточні події можуть по-різному впливати на інтереси користувачів.

*Тип взаємодії.* Різні типи неявного фідбеку можуть мати різне значення для рекомендаційної системи. Наприклад, додавання продукту в кошик може свідчити про більший інтерес користувачів, ніж просто перегляд сторінки продукту.

*Нормалізація фідбеку.* Користувачі можуть взаємодіяти із системою по-різному, і це слід врахувати під час оцінки значення неявного фідбеку. Системи рекомендацій можуть нормалізувати неявний зворотний зв'язок, порівнюючи поведінку окремого користувача із сукупною статистикою або порівняно з іншими користувачами.

*Моніторинг змін у поведінці користувачів.* Важливість неявного фідбеку може змінюватися з часом залежно від поточних інтересів користувачів.

*Ваги для різних джерел фідбеку.* У гібридних рекомендаційних системах, які використовують як явний, так і неявний фідбеки, може бути важливо надавати різні ваги різним типам фідбеків.

Y. Hu, Y. Koren і C. Volinsky у своїй статті «Collaborative Filtering for Implicit Feedback Datasets» (2008) [11] досліджують цю тему, розробляють модель, яка використовує неявний фідбек для визначення вподобань користувача, і представляють нові методи оцінки для таких систем.

Неявні відгуки користувачів є потужним інструментом для вдосконалення систем рекомендацій, але їх слід ретельно проаналізувати, враховуючи контекст, різні типи взаємодії, необхідність нормалізації відгуків, зміни в поведінці користувачів і потребу у вагових коефіцієнтах для різних джерел відгуків. Це дозволить налаштувати систему таким чином, щоб надавати користувачам найбільш актуальні рекомендації. Ці принципи відіграють ключову роль у впровадженні та оптимізації використання неявних відгуків користувачів у рекомендаційних системах.

У нашому дослідженні ми обмежуємося використанням відеоданих для розпізнавання емоцій, хоча пристрої для сканування обличчя, такі як системи розпізнавання обличчя (TrueDepth) на смартфонах, стають все більш поширеними в наш час. Ці пристрої можуть надати більш детальну інформацію про міміку та емоційний стан користувача.

Однак для наших конкретних цілей, рекомендацій AR сесій для мистецтва, лише відеоданих не-

достатньо. Наша система рекомендацій спрямована на вибір і рекомендацію AR сесій, які найкраще відповідають емоційному стану користувача під час перегляду арт-відео.

Таким чином, хоча пристрої для сканування обличчя можуть бути потенційно корисними для отримання детальніших даних про емоційний стан користувача, вони не потрібні для наших конкретних цілей. Замість цього ми зосереджуємось на використанні 3D згорткової нейронної мережі для аналізу відеоданих і класифікації емоцій, які вже надають достатньо інформації для системи рекомендацій AR-сесій мистецтва.

Вираз обличчя сильно корелює з рухом обличчя. Залежно від того, чи використовується часова інформація про рух обличчя, риси обличчя можна класифікувати як статичні або динамічні. Перший, який в основному включає геометричні об'єкти та особливості зовнішнього вигляду, можна отримати за допомогою згортки або інших фільтрів навчання; останні, які спрямовані на моделювання динамічних властивостей руху обличчя, можуть бути розраховані відповідно за допомогою оптичного потоку або інших методів.

Коли вводяться тривимірні згорткові нейронні мережі (3D CNN), вилучення двох різних типів ознак, згаданих вище, стає легшим [12].

Наша мета — адаптувати тривимірну згорткову нейронну мережу для класифікації відео, відому зі статті «A Closer Look at Spatiotemporal Convolutions for Action Recognition» [13], щоб виявляли емоції та інтерпретувати їхню послідовність як неявний відгук користувача в нашій системі рекомендацій.

На рис. 1 показані шари оригінальної 3D моделі CNN, яку ми прагнемо адаптувати для розпізнавання емоцій.

Ця модель працює з відеопотоком, який дискретизується на окремі кадри для подальшого аналізу. Кожне відео обробляється за допомогою тривимірної згорткової нейронної мережі (3D CNN) для класифікації емоцій користувача та визначення важливості класифікованих емоцій. Використовуючи 3D CNN, можна використовувати тривимірний фільтр для виконання згортки і просторово-часової обробки відеоданих.

На етапі попередньої обробки ми налаштували частоту кадрів відео, розміри (змінивши ширину та висоту відео до 224 пікселів) і сегментували його на відрізки по 2 секунди. Вибір оптимальної частоти кадрів відіграє вирішальну роль у нашій системі, оскільки це допомагає мінімізувати затримку розпізнавання та покращити загальну продуктивність. При цьому частота кадрів повинна бути достатньою, щоб оцінити зміни в обличчі користувача.

Обрано 5 кадрів в секунду як задовільну для нашої моделі.

Потрібно адаптувати 3D CNN для аналізу послідовностей кадрів, де кожен кадр вважається одним «часовим кроком». Це дозволяє моделі розпізнавати інформацію, яка поширюється з часом, наприклад динаміку виразу обличчя, що є критично важливим для розпізнавання емоцій.

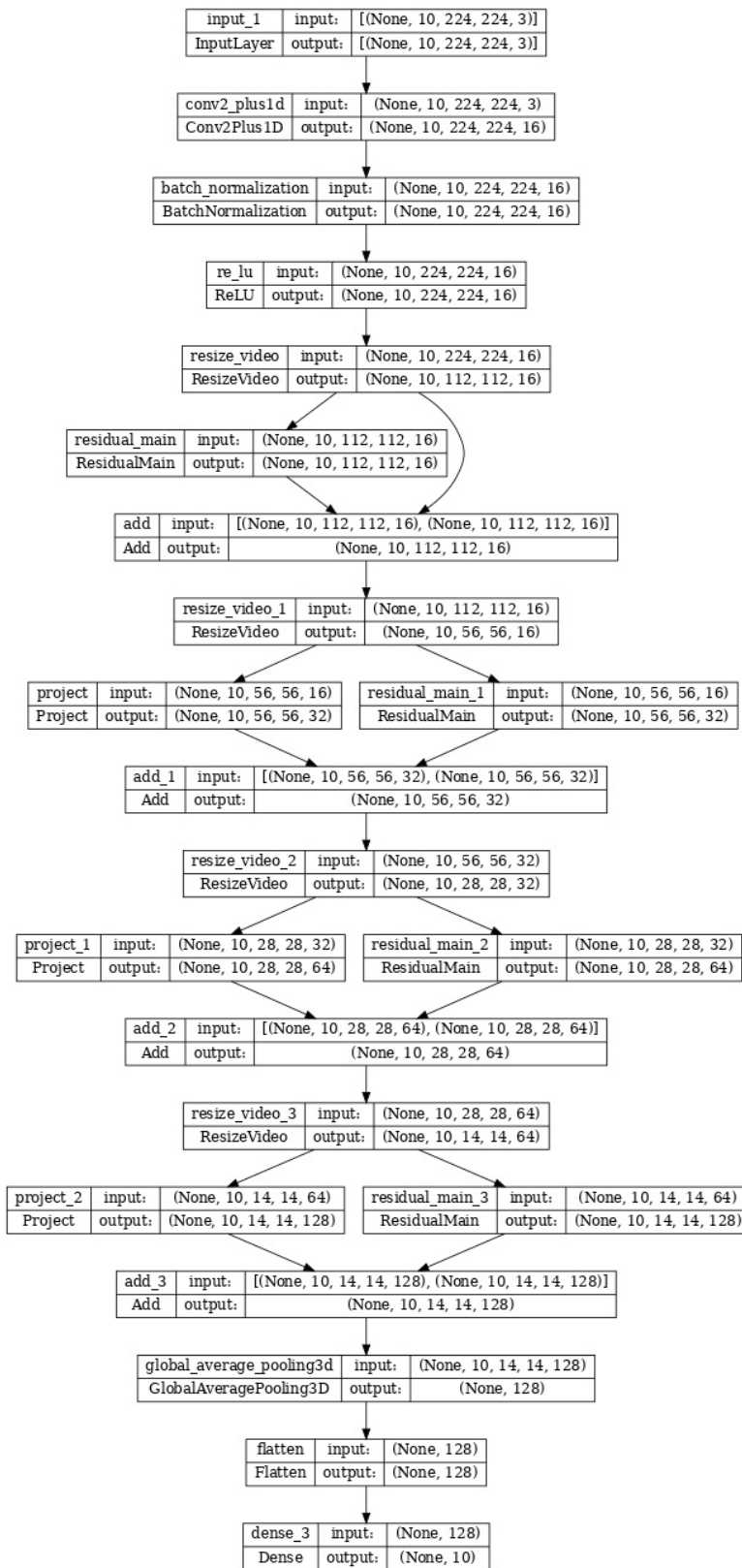


Рис. 1. Шари оригінальної 3D CNN

Набір даних FER (Facial Expression Recognition) – це набір даних, який широко використовується для навчання та оцінювання моделей для завдань розпізнавання виразу обличчя. Він складається з колекції зображень у відтінках сірого з виразами обличчя людей. Основні проблеми, які виникають під час розробки системи FER, стосуються неявних особливостей

і зміщень, спричинених різними культурами та умовами збору. Поточний набір даних має сильне вбудоване зміщення, а відповідні запропоновані методи показують, що умовний розподіл ймовірностей між навчальними та тестовими наборами даних відрізняється [14].

Обличчя на відео аналізується 3D CNN, який навчений розпізнавати емоції за допомогою CMU-MOSI. Набір даних Multimodal Corpus of Sentiment Intensity (CMU-MOSI) — це колекція 2199 відеокліпів, що висловлюють думки. Кожне відео з думкою додається в діапазоні [-3,3].

Оскільки ми адаптували оригінальний 3D CNN до моделі, яка може класифікувати емоції, ми використовуємо його для обробки коротких сегментів відео (2 секунди кожен) для підвищення точності, окремо алгоритмічно обробляючи результати класифікації кожного сегмента. Ми виконуємо цю дію для відео з передньої камери користувача під час кожного сеансу AR.

Набір даних суворо анотований мітками для суб'єктивності, інтенсивності настроїв, анотованих візуальних характеристик за кадром і кожною думкою, а також анотованих звукових характеристик за мілісекунди [15].

Результатом цього кроку є визначення емоції та її інтенсивності для обличчя користувача в кадрі. Щоб перетворити ці дані на неявний зворотний зв'язок, ми розробляємо емоційну оцінку для кожного сеансу AR, у якому ми підсумовуємо вимірювання емоцій користувача в одне числове значення для сеансу, яке може бути позитивним, нейтральним або негативним. Модель, що представляє вхідні дані, показана на рис. 2.

Щоб перетворити вихідні дані моделі в емоційну оцінку (ES) сеансу AR з N кадрами, ми можемо використати таку формулу:

$$ES = (\sum_{i=1}^N e_i * s_i) / N, \quad (1)$$

де  $e_i$  — значення емоцій (-1 для негативних, 0 для нейтральних, 1 для позитивних) для кадру  $i$ ,  $s_i$  — важливість емоцій для кадру  $i$  (від 0 до 1).



Рис. 2. Модель вхідної послідовності

Наш процес базується на розділенні відеопотоку на окремі кадри, які обробляються за допомогою 3D

CNN для класифікації емоцій обличчя користувача за допомогою набору даних CMU-MOSI. За результатами цього етапу ми отримуємо визначення емоції та її інтенсивності для обличчя користувача в кадрі. Щоб перетворити ці дані на відгуки, ми будемо використовувати систему підрахунку емоційних балів для кожної сесії AR, у якій ми підсумовуємо вимірювання емоцій користувача в одне числове значення за

сеанс, яке може бути позитивним, нейтральним або негативним. Отже, на основі цієї частини ми можемо сформулювати набір емоційних вимірювань, який може слугувати ефективним інструментом для забезпечення неявного зворотного зв'язку в системі рекомендацій. Це, у свою чергу, може збільшити здатність системи краще реагувати на вподобання та потреби користувачів. Повний процес показано на рис. 3.

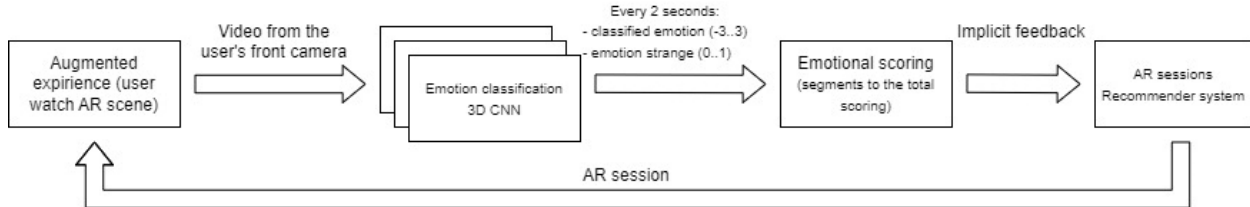


Рис. 3. Повна послідовність системи

Нейронні мережі, які аналізують відеодані користувача та розпізнають емоції, можуть покращити результати рекомендаційних систем. Використовуючи 3D CNN для виявлення емоцій у відео, ми створюємо основу для генерування неявних користувацьких фідбеків. Такий підхід допомагає зібрати важливу інформацію про емоційну реакцію користувачів на різний контент. За допомогою формули емоційного скорингу для кожної AR сесії ми можемо кількісно оцінити емоційну реакцію користувача на кожну рекомендовану AR сесію.

Ми модифікували нашу стару модель гібридної рекомендаційної системи, яка поєднує в собі метод спільної фільтрації, метод рекомендацій, заснований

на знаннях, і глибоку нейронну мережу з тонучими шарами [8], включивши значення емоційного скорингу як неявний фідбек у входні дані.

Завдяки гнучкості сучасного апарату нейронних мереж стало можливим поєднати різні підходи до створення рекомендаційних систем в рамках однієї моделі. Ми додали дві окремі глибокі нейронні мережі до моделі Neural Collaborative Filtering, які використовують інформацію про властивості AR сесії та інформацію профілю користувача для вибору відео. Це дозволило нам покращити якість рекомендацій, які ми отримуватимемо від системи.

Шари старої гібридної моделі, яку ми адаптуємо, показані на рис. 4.

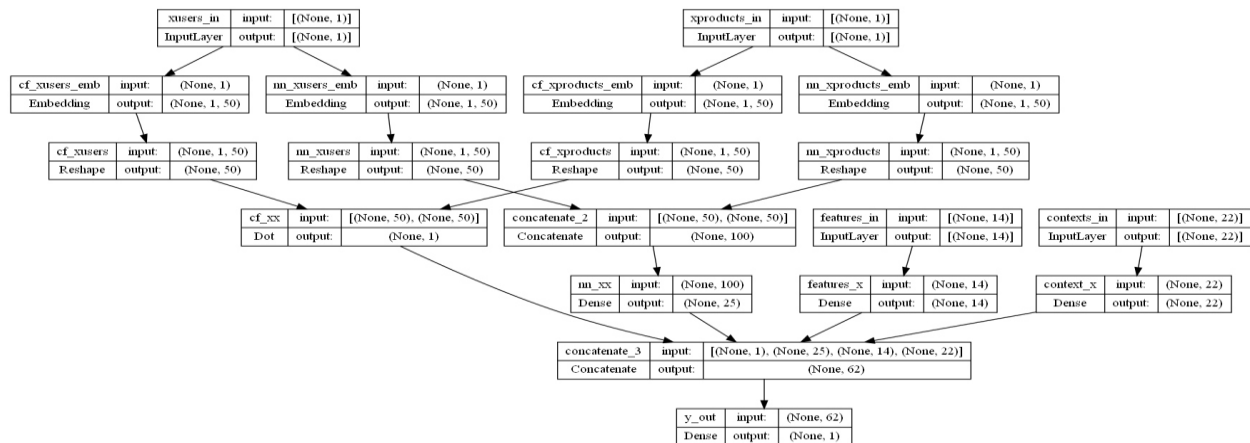


Рис. 4. Шари гібридної моделі

Таким чином, після обробки результатів 3D CNN для розпізнавання емоцій у відео з оцінкою емоційності для кожної сесії AR ми додаємо результат як неявний фідбек до входньої моделі нашої рекомендаційної системи. Наша мета — розширити модель, додавши новий входній параметр емоційного скорингу, щоб використовувати його як неявний фідбек.

Використання трьох можливих варіантів емоційного фідбеку (негативний, нейтральний, позитивний) на відміну від двох (негативний, позитивний) дасть нам більше гнучкості при визначенні ваги цього відгуку. Адже нейтральний емоційний фідбек виключає помилкові оцінки під час невизначеності

чи відсутності емоцій, що, у свою чергу, не вимагатиме значного коливання ваги фідбеку, а також загрози встановлення великих ваг.

Ми очікуємо, що в результаті наших досліджень і оновлення системи рекомендацій вдасться отримати підвищення точності рекомендацій. Використання оцінки розпізнаних емоцій на відео як неявного зворотного зв'язку також дозволить системі краще зрозуміти вподобання користувачів і реакцію на вміст. Це може допомогти системі рекомендацій створити більш детальний профіль користувача та надати більш персоналізовані рекомендації, які відповідають його емоційному стану.

## Висновки

Було запропоновано використовувати результати тривимірної згорткової нейронної мережі (CNN) для аналізу відео та розпізнавання емоцій користувача як даних для алгоритму оцінки емоційної сесії.

Подальше застосування емоційної оцінки як неясного фідбеку для гібридної рекомендаційної системи.

Також пропонується використовувати три можливі варіанти емоційного зворотного зв'язку (негативний, нейтральний, позитивний) замість двох (нега-

тивний, позитивний), що дасть більшу гнучкість при визначенні ваги цього відгуку.

Розроблений підхід може бути використаний для покращення імерсивності та персоналізації рекомендацій під час взаємодії користувача з системами extended reality мистецтвом.

**Подальші дослідження** доцільно проводити у напрямі поєднання існуючої системи з генерацією віртуальних арт-композицій з метою збільшення вибірки рекомендацій та нівелювання обмеженої кількості мануально створених віртуальних арт-композицій.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. F. Ye, "Image Art Innovation based on Extended Reality Technology," 2022 7th IEEE International Conference on Data Science in Cyberspace (DSC), Guilin, China, 2022, pp. 584-587, doi: 10.1109/DSC55868.2022.00087.
2. Gironacci, Irene. (2021). State of the Art of Extended Reality Tools and Applications in Business. 10.4018/978-1-7998-4339-9.ch008.
3. Caarls, Jurjen & Jonker, Pieter & Kolstee, Yolande & Rotteveel, Joachim & Eck, Wim. (2009). Augmented Reality for Art, Design and Cultural Heritage—System Design and Evaluation. EURASIP J. Image and Video Processing. 2009. 10.1155/2009/716160.
4. Lai, Chi-Hui & Chen, Chun-Chih & Wu, Shu-Ming. (2023). Analysis of Key Factors for XR Extended Reality Immersive Art Experience. International Journal of Social Sciences and Artistic Innovations. 3. 24-36. 10.35745/ijssai2023v03.01.0004.
5. Wang, Fei. (2023). Research on the application of immersive art in digital technology scene. Advances in Education, Humanities and Social Science Research. 5. 88. 10.56028/aehtsr.5.1.88.2023.
6. Zhang, Ying. (2023). Immersive Multimedia Art Design Based on Deep Learning Intelligent VR Technology. Wireless Communications and Mobile Computing. 2023. 1-8. 10.1155/2023/9266522.
7. Ha, Taejin & Kim, Yeongmi & Ryu, Jeha & Woo, Woontack. (2006). Enhancing Immersiveness in AR-Based Product Design. 4282. 207-216. 10.1007/11941354\_22.
8. Kuliakin, A. & Narozhnyi, V. & Tkachov, V. & Kuchuk, H.. (2022). Study of methods of building recommendation system for solving the problem of selecting the most relevant video when creating virtual art compositions. Control, navigation and communication systems. Collection of scientific papers. 4. 94-99. 10.26906/SUNZ.2022.4.094.
9. Zhao, Qian & Harper, Franklin & Adomavicius, Gediminas & Konstan, Joseph. (2018). Explicit or implicit feedback? engagement or satisfaction?: a field experiment on machine-learning-based recommender systems. SAC '18: Proceedings of the 33rd Annual ACM Symposium on Applied Computing. 1331-1340. 10.1145/3167132.3167275.
10. Yang, Zhen. (2022). Research on Personalized Product Recommendation Algorithm for User Implicit Behavior Feedback. 10.1007/978-981-19-6901-0\_149.
11. Hu, Yifan & Koren, Yehuda & Volinsky, Chris. (2008). Collaborative Filtering for Implicit Feedback Datasets. Proceedings - IEEE International Conference on Data Mining, ICDM. 263-272. 10.1109/ICDM.2008.22.
12. Zhao, Jianfeng & Mao, Xia & Zhang, Jian. (2018). Learning deep facial expression features from image and optical flow sequences using 3D CNN. The Visual Computer. 34. 10.1007/s00371-018-1477-y.
13. D. Tran, H. Wang, L. Torresani, J. Ray, Y. LeCun and M. Paluri, "A Closer Look at Spatiotemporal Convolutions for Action Recognition," 2018 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Salt Lake City, UT, USA, 2018, pp. 6450-6459, doi: 10.1109/CVPR.2018.00675.
14. Umer, Saiyed & Rout, Ranjeet & Hossain, Sanoar & Asari, Vijayan. (2021). A Unified Framework of Deep Learning-Based Facial Expression Recognition System for Diversified Applications. Applied Sciences. 11. 10.3390/app11199174.
15. Zadeh, A., Liang, P.P., Poria, S., Vij, P., Cambria, E., & Morency, L.P. (2016). CMU-MOSI Dataset (Version 1.0) [Data set]. CMU Multimodal SDK. <http://multicomp.cs.cmu.edu/resources/cmu-mosi-dataset/>.

Received (Надійшла) 24.04.2022

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

## Using recognized emotion as implicit feedback for a recommender system

A. Kuliakin

**Abstract. Topicality.** Due to the growing of digitalization of art, the tasks of improving immersiveness during user interaction with extended reality art systems arise. **Research methods.** Deep Neural Network with Immersion Layers, 3D Convolutional Neural Network. **The purpose of the article:** Improving the selection of the most relevant videos by using recognized user emotions as implicit feedback in the recommender system of virtual art compositions. **The results obtained.** A system was developed for classifying the user's emotions in the video, further calculating the emotional scoring and using the obtained value as implicit feedback for the recommender system for selecting the most relevant videos for creating virtual art compositions. The combination of the presented methods will allow to improve the personalization of recommendations and increase its immersiveness during user interaction with virtual art compositions. **Conclusion.** The approach developed in the work can be used to improve the immersiveness and personalization of recommendations during user interaction with extended reality art systems.

**Keywords:** deep neural network with immersion layers, extended reality, immersiveness, 3D convolutional neural network.

О. І. Лактіонов, Б. Р. Боряк, Н. М. Педченко, О. А. Двірна, О. В. Михайліченко

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка», Полтава, Україна

## ОГЛЯД АЛГОРИТМІВ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ НЕБЕЗПЕЧНИХ ОБ'ЄКТІВ ДРОНАМИ

**Анотація.** Здійснено теоретичний огляд алгоритмів класифікації для побудови відповідних моделей дослідження небезпечних об'єктів. Сформовано формальну постановку завдання класифікації небезпечних об'єктів для побудови класифікаційних моделей. Вказане завдання вирішується шляхом побудови класифікаційних моделей інструментами машинного навчання або нейронних мереж. Складністю дослідження є вибір архітектури нейронної мережі зорієнтовану на класифікацію зображень, що подаватимуться на її вхід. Графічне представлення архітектури нейронної мережі здійснено за допомогою бібліотек `networkx` та `matplotlib`. Це дозволило осмислити загальну постановку завдання до створення класифікаційних моделей. Моделі будуть використані у майбутніх дослідженнях як одна з функцій дрона для виявлення небезпечних об'єктів в умовах бойових дій.

**Ключові слова:** комп'ютерний зір, дрон, нейронні мережі, розмінування, відновлення, бойові дії

### Вступ

**Постановка проблеми.** Наша держава потребує розробки нових взірців технологій на основі штучного інтелекту.

Однією з найбільш вагомих проблем використання штучного інтелекту є збір високоякісних даних й створення відповідних моделей комп'ютерного зору з мінімальною витратою часу [1].

Процес створення моделей штучного інтелекту, де вхідними даними є зображення громіздкий й потребує значних витрат ресурсів. Існують ситуації наявності незбалансованих даних [2], що породжують збільшення кількості задач й додаткових умов, котрі потрібно врахувати [3].

Науковцями здійснюється пошук й розробка нових класифікаційних методів, зокрема для розпізнавання об'єктів на зображеннях [4].

Запропоновані методи алгоритмізують та оцінюють [5] для покращення виявлення та класифікації відеооб'єктів на платформах необмеженої мобільності.

Існують навіть цілі екосистеми, де спостерігається синергії налаштувань обладнання, самостійного прийняття рішень дроном, взаємозв'язку між дронами або дроном та землею й гнучкого проектування модулів [6]. Проте вказані системи збільшують кількість обчислювальних процесів, де необхідно удосконалити програмне й апаратне забезпечення.

Саме тому [7] запропоновано нові архітектурні рішення, котрі підвищують продуктивність роботів-дронів, за рахунок їх комунікації й розвантаження обчислювальних процесів. Розвантаження обчислювальних процесів є чудовою ідеєю при наявності дронів та роботів, які працюють у групі. Це дозволяє ефективніше приймати рішення, здійснювати прогнози подій тощо.

Але в умовах бойових дій необхідно передбачати системи кібербезпеки дронів та роботів.

Крім класичного використання алгоритмів класифікації у [8] виділяють нейронауку, котра зорієнтована на процес прийняття рішень робототехнічними засобами.

Робот може приймати рішення за допомогою інструментів навчання з підкріпленнями. Втім, цей процес потребує наявності висококваліфікованих експертів й є дуже фінансово затратним.

Існуючі дослідження не мають однозначного підходу та рекомендацій щодо використання алгоритмів класифікації небезпечних об'єктів дронами. Обмеження пояснюються відсутністю якісних датасетів, значною витратою часу на побудову моделі, не підтримкою умов балансу класів небезпечних об'єктів.

Саме тому актуалізується питання щодо огляду класифікаційних алгоритмів та підходів використання вказаних алгоритмів на дронах, котрі використовуватимуться в умовах бойових дій для розвідки, розмінування об'єктів тощо.

**Мета дослідження.** Аналіз існуючих алгоритмів машинного навчання для класифікації небезпечних об'єктів. Це дасть змогу сформулювати «мінімальні вимоги» до інструментарію досліджень такого типу та необхідного часу для підготовки зображень, побудови моделей й розробки системи підтримки прийняття рішень визначення типів небезпечних, безпечних об'єктів роботом-дроном.

### Інструменти дослідження задачі класифікації небезпечних об'єктів дронами

Серед найбільш обговорюваних напрямів комп'ютерного зору виділяють класифікацію, розпізнавання образів та сегментацію.

Розпізнавання образів (об'єктів, сигналів, ситуацій, явищ або процесів) – це завдання ідентифікації об'єкта або визначення будь яких його властивостей або за його зображенням (оптичне розпізнавання), або аудіозаписом (акустичне розпізнавання) і іншими характеристиками [9].

Сегментація – процес пошуку однорідних областей на зображенні [9]. Відповідно до програми дослідження «Огляд алгоритмів комп'ютерного зору для виявлення небезпечних об'єктів дронами» на 2022 – 2024 роки перший етап дослідження передбачає ознайомлення з базовими алгоритмами класифікації.



Це дозволить зрозуміти базові аспекти дослідження й виявити проблемні місця.

За допомогою класифікації вирішується завдання приналежності об'єктів до одного зі заздалегідь відомих класів [10]. Об'єкт має різну фізичну природу [11], зокрема у задачі класифікації небезпечних об'єктів об'єктами є зображення небезпечних об'єктів, котрі необхідно створити або завантажити існуючі.

Одним із способів отримання вхідних оцінок є репозиторії [12].

Розглянемо формальну математичну постановку завдання класифікації.

Нехай набір  $D = \{(x_i, y_i)\}$ , де  $x_i$  – зображення небезпечного об'єкта,  $y_i$  – клас небезпечного об'єкта, містить  $N$  зображень об'єкта дослідження.

Необхідно створити класифікаційну модель  $f(x)$ , котра у якості вхідних даних прийматиме зображення об'єктів дослідження та класифікуватиме їх на безпечні і небезпечні.

Прогнозовані об'єкти аналізуватиме людина котра приймає рішення за конкретними критеріями.

Цю задачу розв'язати можна різними методами машинного навчання, де можна виокремити такі методи [10]:

метричні (ближнього сусіда та його модифікації),

опорних векторів,

дерева рішень,

статистичні (байєсівський класифікатор, логістичну регресію),

нейронні мережі,

колективи методів або ансамблі (бустінг, бегінг).

Також й різними нейронними мережами, котрі диференційовані за [13]:

типом вхідної інформації;

типом функції активації нейронів;

типом графа міжнейронних зв'язків;

типом структур нейронів;

кількістю шарів нейронів;

типом дискримінантної функції;

принципом синтезу;

топологією зв'язків;

характером зв'язків;

характером поділу зв'язків;

типом методу навчання;

характером навчання;

методом навчання;

типом часу;

залежністю від врахування попереднього стану мережі;

типом розв'язуваних задач;

областю застосування.

Серед архітектур нейромереж виділяють мережі (табл. 1) [14]:

багатошаровий перцептрон,

мережа з радіальними базисними функціями,

нейронні мережі, що самонавчаються,

ймовірнісні нейронні мережі,

рекурентні нейронні мережі,

мережі адаптивної резонансної теорії, табл. 1.

Таблиця 1 – Категорії архітектур нейромереж [13, 14]

№	Назва архітектури мережі	Належність до класу архітектури
1	багатошаровий перцептрон	єдина архітектура
2	мережа з радіальними базисними функціями	єдина архітектура
3	нейронні мережі, що самонавчаються	клас архітектури
4	ймовірні нейронні мережі	клас архітектури
5	рекурентні нейронні мережі	клас архітектури
6	мережі адаптивної резонансної теорії	клас архітектури
7	глибинні нейронні мережі	клас архітектури

Кожен клас архітектур нейромереж нараховує підкласи. Для розуміння структури нейромереж розглянемо принцип створення графічного подання архітектури нейромережі перцептрон [14], яка має вхідний, вихідний та прихований шари.

Формальна постановка завдання полягає у створенні графа за допомогою бібліотеки `networkx`, котрий демонструватиме взаємозв'язки між елементами архітектури.

Структура нейромережі складається з  $X_1, X_2, Y_1, Y_2$  входи і виходи відповідно, приховані нейрони  $H_1, H_2$  з функціями активації ReLU (Rectified Linear Activation).

Структура нейромережі передбачає існування вагових коефіцієнтів. На основі значень вихідних

сигналів можуть прийматися рішення, в тому числі й стосовно типів небезпечних об'єктів.

Просту програму створення архітектури нейронної мережі можна розробити за допомогою бібліотек `networkx` та `matplotlib` [15].

Залежно від завдань дослідження щодо побудови класифікаційних моделей для дослідження небезпечних об'єктів графічна схема архітектури нейронної мережі дозволить сформувати вихідну структуру архітектури мережі.

### Рекомендації до формування базового інструментарію дослідження

Обрати архітектуру нейронної мережі зорієнтовану на завдання класифікації небезпечних об'єктів.

Оскільки вхідними об'єктами до моделей є зображення, необхідно визначити шляхи роботи з фото. Побудовані моделі можна використовувати за допомогою засобів персональних комп'ютерів або завантажувати безпосередньо до контролера і проводити експеримент роботи.

### Висновки

Проведено аналіз інструментів класифікації небезпечних об'єктів дронами.

Визначено класи категорій архітектур нейронних мереж.

Розглянуто графічне представлення структури нейромережі засобами `networkx` та `matplotlib`.

Отримані результати дослідження є теоретичною основою для проведення майбутніх досліджень у напрямі класифікації небезпечних об'єктів дронами, котрі використовуватимуться в умовах бойових дій. В цьому й полягає практична значимість дослідження.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Soori M. Artificial Intelligence, Machine Learning and Deep Learning in Advanced Robotics, A Review [Electronic resource] / Mohsen Soori, Behrooz Arezoo, Roza Dastres // *Cognitive Robotics*. – 2023. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cogr.2023.04.001> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
2. Panibratov R. Decision support system for estimating and forecasting state of insurance company [Electronic resource] / Roman Panibratov // *System research and information technologies*. – 2022. – No. 1. – P. 61–72. – Mode of access: <https://doi.org/10.20535/srit.2308-8893.2022.1.05> (date of access: 20.08.2023). – Title from screen.
3. Multi-task learning for dangerous object detection in autonomous driving [Electronic resource] / Yaran Chen [et al.] // *Information Sciences*. – 2018. – Vol. 432. – P. 559–571. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.ins.2017.08.035> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
4. Improving handgun detection through a combination of visual features and body pose-based data [Electronic resource] / Jesus Ruiz-Santaquiteria [et al.] // *Pattern Recognition*. – 2022. – P. 109252. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2022.109252> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
5. Report on UG2+ challenge Track I: Assessing algorithms to improve video object detection and classification from unconstrained mobility platforms [Electronic resource] / Sreya Banerjee [et al.] // *Computer Vision and Image Understanding*. – 2021. – Vol. 213. – P. 103297. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cviu.2021.103297> (date of access: 27.08.2023).
6. Towards a framework of key technologies for drones [Electronic resource] / Réda Nouacer [et al.] // *Microprocessors and Microsystems*. – 2020. – Vol. 77. – P. 103142. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.micpro.2020.103142> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
7. Dynamic computation offloading for ground and flying robots: Taxonomy, state of art, and future directions [Electronic resource] / Rihab Chaâri [et al.] // *Computer Science Review*. – 2022. – Vol. 45. – P. 100488. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2022.100488> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
8. Lee S. W. Decision-making in brains and robots – the case for an interdisciplinary approach [Electronic resource] / Sang Wan Lee, Ben Seymour // *Current Opinion in Behavioral Sciences*. – 2019. – Vol. 26. – P. 137–145. – Mode of access: <https://doi.org/10.1016/j.cobeha.2018.12.012> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
9. Аналіз систем розпізнавання образів структури композитів : монографія / Добротвор І.Г., Стухляк П.Д., Микитишин А.Г., Митник М.М. – Тернопіль : Тернопільський національний технічний університет імені І. Пулюя, 2018. – 224 с.
10. Кононова К. Ю. Машинне навчання: методи та моделі: підручник для бакалаврів, магістрів та докторів філософії спеціальності 051 «Економіка» / К. Ю. Кононова. – Харків: ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2020. – 301 с.
11. Мацуга, О.М. Навчальний посібник до вивчення курсу «Інформаційні технології розпізнавання образів» [Текст] / О.М. Мацуга, Ю.М. Архангельська, Н.М. Єрещенко. – Д.: РВВ ДНУ, 2016. – 60 с.
12. European Environment Agency's home page [Electronic resource] // European Environment Agency's home page. – Mode of access: <https://www.eea.europa.eu/en> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.
13. Субботін С. О. Нейронні мережі: теорія та практика: навч. посіб. / С. О. Субботін. – Житомир: Вид. О. О. Євенок, 2020. – 184 с.
14. Терейковський І. Штучні нейронні мережі: базові положення [Електронний ресурс] / І. Терейковський, Д. Бушуєв, Л. Терейковська. – Режим доступу: <https://ela.kpi.ua/bitstream/123456789/50135/1/ANN.pdf> (дата звернення: 27.08.2023).
15. DiGraph - Directed graphs with self loops – NetworkX 2.0.dev20161129121305 documentation [Electronic resource] // NetworkX documentation – NetworkX 2.0.dev20161129121305 documentation. – Mode of access: <https://pelegm-networkx.readthedocs.io/en/latest/reference/classes/digraph.html> (date of access: 27.08.2023). – Title from screen.

Received (Надійшла) 15.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

### Overview of computer vision algorithms for detecting hazardous objects by drones

Oleksandr Laktionov, Bohdyan Boryak, Nazar Pedchenko, Oleksiy Mykhailichenko

**Abstract.** A theoretical overview of classification algorithms has been conducted to construct relevant research models for the detection of hazardous objects. The formal problem statement for the classification of hazardous objects has been formulated to build classification models. This task is addressed by constructing classification models using machine learning tools or neural networks. The complexity of the research lies in selecting a neural network architecture tailored for image classification, which will be used as input. The graphical representation of the neural network architecture is implemented using the `networkx` and `matplotlib` libraries. This allows for a comprehensive understanding of the overall task in creating classification models. The models will be used in future research as one of the functions of a drone for detecting dangerous objects in combat conditions.

**Keywords:** computer vision, drone, neural networks, demining, reconstruction, combat operations.

А. І. Левтеров, Г. А. Плехова, М. В. Костікова, С. В. Очеретенко

Харківський національний автомобільно-дорожній університет, Харків, Україна

## АНАЛІЗ ВРАЗЛИВОСТЕЙ ПЛОЩИНИ ДАНИХ SDN І ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ЗАСОБІВ МАРШРУТИЗАЦІЇ ЩОДО ПРОТИДІЇ МОЖЛИВИМ АТАКАМ

**Анотація.** Проведений аналіз вразливостей площини даних SDN і функціональних можливостей засобів безпечної маршрутизації щодо протидії можливим атакам. Розглянуті у межах площини даних основні типові проблеми безпеки, вказані їх причини та можливі об'єкти атак. Описані існуючі технології захисту площини даних SDN. Надана узагальнена класифікація вразливостей та їх характеристики.

**Ключові слова:** SDN, метрика, безпека, вразливість, CVSS.

### Вступ

В сьогоденні все більш використовують такі мережні архітектури, як програмно-конфігуровані мережі (*Software-Defined Networking, SDN*). У сучасному світі розгортаються нові загрози кібербезпеки для таких мереж, що вимагає розробку та дослідження нових спеціалізованих рішень щодо підвищення рівня мережної безпеки. В роботі проводиться дослідження функціонування архітектур *SDN* з урахуванням збільшення кількості потенційних мережних атак які приводять до нових проблем безпеки.

**Аналіз публікацій.** На сучасному етапі розвитку архітектур *SDN*, вітчизняні та іноземні дослідники вважають, що типові проблеми безпеки у програмно-конфігурованих мережах перш за все проявляються в таких аспектах: шкідливе програмне забезпечення, вразливість контролера, легітимність та узгодженість правил потоків, проблема стандартизації північного інтерфейсу, безпека комунікації в процесі використання південного інтерфейсу та ін [1 – 4].

**Мета та постановка задачі.** Метою статті є необхідність проаналізувати вразливості які виникають в площини даних *SDN* використовуючи аналітичні та порівняльні методи. Провести аналіз типових проблем безпеки, вказати причини та об'єкти атак.

Вказати на вразливості в функціональних засобах при безпечної маршрутизації щодо протидії можливим атакам. Постановка задачі – удосконалити безпечну маршрутизацію, за рахунок зниження типових проблем безпеки.

### Виклад основного матеріалу

У роботі проаналізовано наведені у табл. 1 типові проблеми безпеки та об'єкти атак у межах площини даних - мережних пристроїв, що керуються контролером *SDN*. Очевидно, що об'єктами атаки можуть бути різні пристрої мережі. Вони можуть бути розташовані на різних рівнях мережі. Архітектура *SDN* багаторівнева, тому можна класифікувати загрози безпеці на різних рівнях. В роботі аналізуються загрози та наданий аналіз об'єктів атак і потенційних рішень щодо підвищення рівня мережної безпеки у площині даних *SDN*.

Таким чином, можна зробити висновок, що площина даних складається з комутаторів та інших мережних пристроїв. Основною функцією є те, що вона відповідає за обробку даних, їх пересилання, відкидання, а також збір статистики. Площина даних працює на основі правил потоків, які надаються контролером мережі. Розглянемо проблеми безпеки у площині даних відповідно до [1] (табл. 1):

Таблиця 1 – Типові проблеми безпеки, об'єкти атак і причини [1]

Проблема безпеки	Об'єкт атаки	Причина
Авторизована автентифікація	Мережне обладнання	Управління доступом
Правомірність правил потоків	Правила потоків	Управління доступом
Узгодженість правил потоків	Правила потоків	Архітектура <i>SDN</i>
<i>DoS/DDoS</i> -атаки	Таблиці потоків	Архітектура <i>SDN</i> , зловмисна атака
Атака сторонніми каналами	Конфіденційність даних	Зловмисна атака

1. Авторизована автентифікація. По суті, на рівні площини даних відсутній ефективний механізм автентифікації між мережним обладнанням і контролером. Таким чином, можуть виникнути деякі проблеми, а саме видавання особи за іншу особу та незаконний доступ. Зловмисний *SDN*-комутатор може генерувати підроблений або фальшивий потік даних у мережі, маніпулювати або перевіряти вміст пакетів даних і відхиляти дозволені пакети даних. Це може призвести до порушення цілісності даних і вплинути на доступність площини даних.

Крім того, якщо комутатор встановлює з'єднання з контролером без автентифікації, комутатором може керувати зловмисний контролер, що може призвести до фальсифікації інформації таблиці потоків, що призведе до витоку даних та інших проблем безпеки. Не відповідні керуючі інструкції можуть спричинити плутанину в таблицях потоків комутаторів та безпосередньо збільшити ризики порушення безпеки.

2. Правомірність і узгодженість правил потоків є одними з головних проблем на рівні площини

даних. Правомірність правил потоків стосується зловмисного або невірнього впровадження правил потоків. Зі свого боку узгодженість правил потоків в основному включає три аспекти [1]. Під час процесу генерації функціонування значної кількості застосунків може викликати конфлікти або перевизначення правил потоків. Під час процесу випуску правил потоків затримка передавання або зловмисне втручання може також спричинити їхню неузгодженість між контролером і комутаторами. Зі свого боку процес оновлення ініціоє синхронізацію правил потоків між різними комутаторами. Слід зазначити, що до оновлення правил потоків в *SDN* призводять, наприклад, відмови вузлів мережі, передача службового навантаження або технічне обслуговування мережі, через що пакети бачитимуть неузгоджені уявлення мережі щодо її поточного стану. Таким чином, якщо пакети даних передаються відповідно до нових і старих правил потоків, то можуть виникнути такі проблеми, як «чорні діри», циклічні шляхи або перевантаження мережі.

3. *DoS/DDoS*-атаки. Простір таблиці потоків обмежений, проте за звичайних обставин розмірність таблиці потоків комутатора відповідає вимогам пересилання пакетів даних. Однак в умовах *DoS/DDoS*-атак зловмисник створює низку незаконних доступів, і простір таблиці потоку переповнюється недійсними правилами трафіку [1]. У разі цього буде спожито значну кількість ресурсів таблиці потоків, а звичайні правила потоків не мають достатньо місця для

обробки. Отже, *DoS/DDoS*-атаки можуть значно погіршити продуктивність мережі.

4. Атака сторонніми каналами. *SDN* весь час переносить приватну та конфіденційну інформацію [1]. У *SDN* атрибути процесу (наприклад, атрибут часу) кожної дії виконання різні. Використовуючи атаки сторонніми каналами, зловмисник може отримати пов'язану з мережею інформацію про стан (наприклад, інформацію таблиці потоків), перевіряючи час виконання конкретного типу пакета даних. Тому таблиця потоків може спричинити проблеми з витоком даних. Хоча атаки через сторонні канали безпосередньо не впливають на доступність, конфіденційність або цілісність даних, вони можуть викликати подальші атаки.

Таким чином, вважаємо необхідним акцентувати, що причинами проблем безпеки є власне архітектура *SDN*. Коли виникають зовнішні атаки, ми отримуємо недостатність контролю доступу та засобів шифрування.

Технології та підходи захисту площини даних *SDN* уявляють базуючись на дослідженнях типових проблем безпеки, стає очевидним, що централізоване керування та функції програмованості *SDN* надають зловмисникам потужні та зручні канали атак. Отже, поширене використання архітектур *SDN* на практиці робить питання безпеки все більш помітними. Основні існуючі технології захисту площини даних *SDN* наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Існуючі технології безпеки у площині даних *SDN* [1]

Технологія захисту	Проблема безпеки
Виявлення помилок у мережі	Помилка конфігурації
Класифікація правил потоків	Правомірність правил потоків
Формальний математичний аналіз	Правомірність правил потоків
Виявлення зв'язності	Узгодженість правил потоків
Модуль автентифікації й авторизації	Авторизована автентифікація

1. Виявлення помилок мережі може бути реалізовано за допомогою алгоритмів виявлення. Так, наприклад, *NICE* [1] надає тестову схему, засновану на символічній моделі виконання з метою перевірки, чи створює програма верхнього рівня неузгоджений стан мережі. Однак ці методи не є рішеннями в реальному часі, мають велику затримку обробки та високий рівень запитів. Такі рішення не можуть принципово усунути вплив конфігураційних конфліктів на мережу.

2. Поділ правил потоків. Розподіл дозволів додатків на основі ролі та пріоритету об'єкта є основним методом вирішення правомірності та узгодженості правил потоків. Дозвіл правил потоків поділяється за такими методами, як цифровий підпис, розподіл ролей і класифікація функцій.

3. Виявлення зв'язності може бути реалізовано різними засобами, наприклад, шляхом використання технології віртуалізованого обміну з метою розділення мережі на ізольовані фрагменти і таким чином запобігання конфлікту правил потоків у них; механізмів виявлення цілісності пакетів на основі поєднан-

ня правил потоків з номером версії тощо [1].

4. Модуль автентифікації й авторизації може використовувати сервер *RADIUS* для автентифікації ідентифікатора хоста. Крім того, можливе застосування квантової криптографії для розробки надлегкої верифікації цілісності [1]. Зазначається, що квантові паролі є більш безпечними, ніж традиційні, проте їхнє впровадження може бути дорогим.

5. Захист від *DoS/DDoS*-атак у площині даних може бути трансформована в задачу оптимізації таблиці потоків.

Для підвищення мережної безпеки, що також стосується мереж *SDN*, особливе місце надається протоколам маршрутизації. Протоколи потребують системної та скоординованої взаємодії одночасно множини мережних елементів. Такими елементами є *SDN*-комутатори, а також контролери мережі під час формування (розрахунку) шляхів і правил потоків. Коли ми використовуємо поняття потоків, то маємо на увазі ті, вздовж яких має забезпечуватися необхідний рівень безпеки за обраними показниками або критеріями.

Безпечної маршрутизації приділено багато уваги в наукових виданнях. Велика кількість теоретичних досліджень та наукових робіт присвячена цьому напрямку. Для розв'язання таких задач використовувались як найпростіші емпіричні варіанти рішень так і системні оптимізаційні підходи.

Так, у роботі [2] розроблено та досліджено модель безпечної маршрутизації з балансуванням навантаження в мережах на основі *SD-WAN*. Технологічне завдання безпечної маршрутизації з балансуванням навантаження було сформульовано у формі оптимізаційної задачі з квадратичним критерієм оптимальності. Така форма критерію дозволяє збалансувати частки потоків, що передаються в мережі. Представлена модель безпечної маршрутизації збалансуванням навантаження з адитивною метрикою враховує продуктивність і безпеку мережі, дозволяє ефективніше використовувати наявні мережні ресурси, також враховує ймовірність компрометації каналів зв'язку під час прийняття маршрутних рішень.

У роботах [2, 3] пропонуються поточкові моделі маршрутизації з урахуванням ризиків інформаційної безпеки за допомогою базових метрик критичності вразливостей. Основу моделі складають умови реалізації одно- та багатошляхової маршрутизації, збереження потоку та запобігання перевантаженню каналів зв'язку мережі, а задача безпечної маршрутизації також сформульована як оптимізаційна.

Важливим є аналіз стандарту *CVSS* щодо кількісного розрахунку рівня вразливості. Виявлення й ідентифікація вразливостей – це процес виявлення вразливостей, які можуть бути використані загрозами для заподіяння шкоди активам. Вразливість – це слабе місце або недолік у процедурах безпеки системи, проектуванні, реалізації або внутрішніх засобах контролю, які можуть бути випадково активовані або навмисно використані під час виявлення загрози. В роботі розглянуто категорії вразливостей та проаналізовано підходи до ідентифікації та документування вразливостей, а також обговорено використання національної бази даних вразливостей – *National Vulnerability Database (NVD)*.

Узагальнена класифікація вразливостей може бути представлена наступним чином [5]:

1. Технічні вразливості: недоліки в розробці, реалізації та/або конфігурації програмного забезпечення та/або апаратних компонентів, включно з прикладним програмним забезпеченням, системним програмним забезпеченням, комунікаційним програмним забезпеченням, обчислювальним обладнанням, комунікаційним обладнанням і вбудованими пристроями.

2. Вразливості, спричинені діяльністю людини: залежність від певних осіб, прогалини в обізнаності та навчанні, прогалини в дисципліні та неправомірне обмеження доступу.

3. Фізичні вразливості та вразливості середовища: недостатній контроль (фізичного) доступу, невдале розміщення обладнання, невідповідний контроль температури/вологості та неналежне кондиціонування у приміщеннях, де знаходиться обладнання.

4. Операційні вразливості: відсутність керування змінами, неналежний розподіл обов'язків, відсут-

ність контролю за встановленням програмного забезпечення, відсутність контролю над обробкою та зберіганням медіафайлів, відсутність контролю над системним зв'язком, неналежний контроль доступу або недоліки в процедурах контролю доступу, неналежний запис та/або перегляд записів системної діяльності, неадекватний контроль над ключами шифрування, неадекватне звітування, обробка та/або вирішення інцидентів безпеки, а також неадекватний моніторинг та оцінка ефективності засобів контролю безпеки.

5. Вразливості безперервності бізнесу та дотримання нормативних вимог: недоречні, відсутні або невідповідні процеси для належного управління бізнес-ризиками; неадекватне планування безперервності бізнесу та дій у разі виникнення надзвичайних ситуацій; а також неадекватний моніторинг та оцінка відповідності керівним політикам і нормам.

У багатьох сферах, перерахованих тут, виявлення вразливості критично залежить від ініціативи керівництва та подальших дій. Такі методи, як інтерв'ю, анкетування, перегляд попередніх оцінок ризиків та аудиторських звітів, а також контрольні списки – усі вони сприяють створенню ефективного уявлення ландшафту вразливості.

Розглянемо більш детально сферу технічних вразливостей. Видатним ресурсом є національна база даних про вразливості *NIST – National Vulnerability Database (NVD)*, і відповідна загальна система оцінки вразливостей – *Common Vulnerability Scoring System (CVSS)*, описана в *NISTIR 7946*, Посібник із впровадження *CVSS* [3 – 9]. *NVD* – це вичерпний список відомих технічних вразливостей систем, апаратного та програмного забезпечення. *CVSS* забезпечує відкриті структуру для передачі характеристик вразливостей. *CVSS* визначає вразливість як помилку, недолік, слабкість або відкритість програми, системного пристрою чи сервісу, що може призвести до збою конфіденційності, цілісності чи доступності.

Отже, модель *CVSS* намагається забезпечити повторювані та точні вимірювання, одночасно дозволяючи користувачам переглядати базові характеристики вразливості, які використовуються для створення числових оцінок. *CVSS* надає загальну систему вимірювання для галузей промисловості, організацій та урядів, які вимагають точних і послідовних оцінок використання вразливостей та їхнього впливу.

Розуміння *CVSS* дозволяє оцінити широкий спектр вразливостей, які впливають на системи. Крім того, систематизована схема для оцінки вразливостей у *CVSS* є корисною для розробки подібного системного підходу до інших вразливостей, таких як ті, що пов'язані з організаційними питаннями, політикою та процедурами, а також фізичною інфраструктурою. На сьогоднішній день *CVSS* широко прийнятий і використовуваний підхід. Наприклад, використання *CVSS* рекомендується для кількісного розрахунку рівня вразливості мережного обладнання [3, 4].

Кожен запис *NVD* містить такну інформацію [2]:

- унікальний словниковий ідентифікатор вразливостей і ризиків – *Common Vulnerabilities and Exposure (CVE)*;
- опис вразливості;

- посилання на веб-сайти та інші посилання з інформацією, пов'язаною з вразливістю;

- метрики CVSS.

Метрики загальної системи оцінки вразливостей – CVSS. Існує 14 метрик CVSS, розділених за трьома групами [5]. У табл. 3 перелічені окремі показники та показано рівні, визначені для кожного з них. У кожному випадку рівні вказані від найвищого до найнижчого. По суті, підрахунок балів здійснюється таким чином: для кожної виявленої вразливості NVD надає рівень для кожного показника в базовій групі

на основі характеристик вразливості. Наприклад, метрика вектора атаки вказує, чи можна атаку запустити віддалено через мережу чи через Інтернет, запустити лише через мережу, до якої підключено як джерело атаки, так і цільову систему, має бути здійснено за допомогою локального входу, або вимагає фізичного доступу до машини. Чим віддаленіша атака, тим більше джерел атаки можливе, а отже, тим серйозніша вразливість. Ця інформація є безцінною, оскільки дозволяє користувачам зрозуміти характеристики вразливості.

Таблиця 3 – Загальна класифікація метрик CVSS [5]

Група базових метрик		Група часових метрик	Група метрик середовища
Можливість використання	Вплив		
<p><i>Вектор атаки:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Мережа</li> <li>- Прилеглий</li> <li>- Локальний</li> <li>- Фізичний</li> </ul> <p><i>Складність атаки:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Низька</li> <li>- Висока</li> </ul> <p><i>Необхідність привілеїв:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Немає</li> <li>- Низька</li> <li>- Висока</li> </ul> <p><i>Взаємодія з користувачем:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Немає</li> <li>- Вимагається</li> </ul> <p><i>Область застосування:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Без змін</li> <li>- Змінена</li> </ul>	<p><i>Вплив на конфіденційність:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високий</li> <li>- Низький</li> <li>- Немає</li> </ul> <p><i>Вплив на цілісність:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високий</li> <li>- Низький</li> <li>- Немає</li> </ul> <p><i>Вплив на доступність:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Високий</li> <li>- Низький</li> <li>- Немає</li> </ul>	<p><i>Зрілість коду експлоїту:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначений</li> <li>- Високий</li> <li>- Функціональний</li> <li>- Доказ концепції</li> <li>- Недоведений</li> </ul> <p><i>Рівень виправлення:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначений</li> <li>- Обхідний шлях</li> <li>- Тимчасове виправлення</li> <li>- Офіційне виправлення</li> </ul> <p><i>Достовірність звіту:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначена</li> <li>- Підтверджена</li> <li>- Обґрунтована</li> <li>- Невідома</li> </ul>	<p><i>Вимоги конфіденційності:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначені</li> <li>- Високі</li> <li>- Середні</li> <li>- Низькі</li> </ul> <p><i>Вимоги цілісності:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначені</li> <li>- Високі</li> <li>- Середні</li> <li>- Низькі</li> </ul> <p><i>Вимоги доступності:</i></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Не визначені</li> <li>- Високі</li> <li>- Середні</li> <li>- Низькі</li> </ul>

Як показано в табл. 3, кожен рівень метрики має описову назву [5]. Крім того, CVSS призначає числове значення за шкалою від 0,0 до 10,0, де 10,0 є найсерйознішою проблемою безпеки. Числові оцінки для показників у групі базових показників поміщаються в рівняння, визначене в CVSS, яке створює сукупний базовий показник безпеки в діапазоні від 0,0 до 10,0.

Базова група метрик представляє внутрішні характеристики вразливості, які є незмінними протягом часу та серед користувачів. Вона складається з трьох наборів показників [5]:

1. *Можливість використання (Exploitability)*: ці показники відображають легкість і технічні засоби, за допомогою яких використовується вразливість. Показники:

- Вектор атаки, який вказує, наскільки віддаленим може бути зловмисник від уразливого компонента.

- Складність атаки передає рівень складності, необхідний зловмиснику для використання вразливості після ідентифікації цільового компонента. Складність оцінюється як висока, якщо зловмисник не може здійснити атаку за власним бажанням, але повинен докласти певних зусиль для підготовки або виконання.

- Необхідні привілеї характеризують доступ, потрібний зловмиснику для використання вразливості. Значення: «*немає/none*» (привілейований доступ не

потрібен), «*низький/low*» (базові привілеї користувача) і «*високий/high*» (права адміністратора).

- Взаємодія з користувачем вказує, чи має брати участь інший користувач, крім зловмисника, для успішної атаки.

2. *Вплив (Impact)*: ці показники вказують на ступінь впливу на основні цілі безпеки – конфіденційність, цілісність і доступність. У кожному з цих випадків оцінка відображає найгірший результат, якщо уражено більше ніж один компонент. Для кожної з трьох цілей вводяться аналогічні значення впливу: «*високий/high*» (повна втрата конфіденційності, цілісності або доступності), «*низький/low*» (певні втрати) і «*немає/none*» (відсутність впливу).

3. *Сфера застосування (Scope)*: цей показник знаходиться в групі базових показників, хоча він є дещо незалежним від решти груп. Він стосується здатності вразливості в одному компоненті програмного забезпечення впливати на ресурси, що виходять за межі його можливостей, або на привілеї. Прикладом є вразливість у віртуальній машині, яка дозволяє зловмиснику видаляти файли в операційній системі хоста.

Зазвичай базові та часові метрики визначаються аналітиками бюлетенів вразливостей, постачальниками програмних засобів безпеки або програмного забезпечення, оскільки вони мають кращу інформацію щодо характеристик вразливостей, ніж користувачі. Однак показники, що стосуються середовища,

визначаються користувачами, оскільки вони найкраще можуть оцінити потенційний вплив вразливості у своєму власному середовищі.

Група часових метрик представляє характеристики вразливості, які змінюються з часом, але не в середовищі користувача. Він складається з трьох показників. У випадку, коли значення такої метрики «не визначено», цей показник слід пропустити в рівнянні оцінки.

Зрілість коду експлойту оцінює поточний стан методів експлойту або доступність коду. Загальнодоступний простий у використанні код експлойта збільшує кількість потенційних зловмисників, включаючи некваліфікованих осіб, тим самим підвищуючи серйозність вразливості. Рівні відображають ступінь доступності та придатності експлойта для використання вразливості. Рівень виправлення вимірює ступінь доступності виправлення.

Достовірність звіту вимірює ступінь впевненості в існуванні вразливості та достовірність відомих технічних деталей.

Група метрик середовища фіксує характеристики вразливості, пов'язані з ІТ-середовищем користувача. Це дає змогу аналітику налаштувати оцінку CVSS залежно від важливості враженого ІТ-активу для організації користувача, вимірюючи з точки зору конфіденційності, цілісності та доступності.

## Висновки

Таким чином, в роботі проведений аналіз стандарту CVSS щодо кількісного розрахунку рівня вразливості мережного обладнання та доведена доцільність його використання під час розробки та дослідження перспективних підходів до безпечної маршрутизації у площині даних програмно-конфігурованих мереж.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Liu Y., Zhao B., Zhao P., Fan P., Liu H. A survey: Typical security issues of software-defined networking. *China Communications*. 2019. № 16 (7). pp. 13-31. DOI: <https://doi.org/10.23919/JCC.2019.07.002>.
2. Sagare A. A., Khondoker R. Security Analysis of SDN Routing Applications. In: Khondoker, R. (eds) *SDN and NFV Security. Lecture Notes in Networks and Systems*, vol. 30. Springer, Cham, 2018, pp. 1-17. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-319-71761-6\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-71761-6_1).
3. Yeremenko O., Persikov M., Lemeshko V., Altaki B. Research and development of the secure routing flow-based model with load balancing. *Проблеми телекомунікацій*. 2021. № 2 (29). pp. 3-14. URL: [https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/12/212\\_yeremenko\\_secure.pdf](https://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/12/212_yeremenko_secure.pdf).
4. Євдокименко М. О., Шаповалова А. С., Шаповал М. М. Потокова модель маршрутизації із врахуванням ризиків інформаційної безпеки за допомогою базових метрик критичності вразливостей. *Проблеми телекомунікацій*. 2020. № 1 (26). С. 48-62. URL: [http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/03/201\\_yevdokimenko\\_security.pdf](http://pt.nure.ua/wp-content/uploads/2021/03/201_yevdokimenko_security.pdf).
5. Yevdokymenko M., Yeremenko O., Shapovalova A., Shapoval M., Porokhniak V., Rogovaya N. Investigation of the Secure Paths Set Calculation Approach Based on Vulnerability Assessment. *Workshop Proceedings of the MoMLeT+DS 2021: 3rd International Workshop on Modern Machine Learning Technologies and Data Science*, June 5, 2021, Lviv-Shatsk, Ukraine. pp. 207-217. URL: <http://ceur-ws.org/Vol-2917/paper19.pdf>.
6. Stallings W. *Effective Cybersecurity: Understanding and Using Standards and Best Practices*, Addison-Wesley, 2019. 800 p.
7. Common Vulnerability Scoring System v 3.0: Examples, *Forum of Incident Response and Security Teams*, URL: <https://www.first.org/cvss/examples>.
8. Lou W., Kwon Y. H-SPREAD: A Hybrid Multipath Scheme for Secure and Reliable Data Collection in Wireless Sensor Networks. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*. 2006. Vol. 55, No. 4. pp. 1320-1330. DOI: <https://doi.org/10.1109/TVT.2006.877707>.
9. Snihurov A., Chakrian V. Improvement of EIGRP Protocol Routing Algorithm with the Consideration of Information Security Risk Parameters. *Scholars Journal of Engineering and Technology*. 2015. Vol. 3, No. 8. pp. 707-714.

Received (Надійшла) 26.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.08.2023

## Analysis of vulnerabilities of the SDN data plane and the functional capabilities of the routing tools in relation to preventing potential attacks

A. Levterov, G. Pliekhova, M. Kostikova, S. Ocheretenko

**Abstract. Problem.** The article is devoted to the analysis of the vulnerabilities of the SDN data plane and the functionality of secure routing tools in terms of countering possible attacks. The main typical security problems, their causes and possible targets of attacks are considered within the data plane. Existing SDN data plane protection technologies are described. A generalized classification of vulnerabilities and their characteristics is provided. **Goal.** The purpose of the article is to analyze the vulnerabilities of the SDN data plane and the functionality of secure routing tools to counter possible attacks. **Methodology.** Analytical modeling, formalization and comparison. Task statement – To improve secure routing taking into account the basic metrics of the criticality of vulnerabilities. **Results.** An analysis of the vulnerabilities of the SDN data plane and the functionality of secure routing tools against possible attacks, as well as the existing technologies and approaches to protect the SDN data plane, has been carried out. Conclusions: Thus, the paper analyzes the CVSS standard for quantitative calculation of the level of vulnerability of network equipment and proves the feasibility of its use during the development and research of promising approaches to secure routing in the data plane of software-configured networks. **Originality.** Systematized and analyzed the vulnerabilities of the SDN data plane and their functionality in terms of secure routing and countermeasures against possible attacks. **Practical value.** Computer-configured SDN networks are considered within the data plane, the main typical security problems are found, their causes and possible objects of attacks are indicated.

**Keywords:** SDN, metrics, security, vulnerability, CVSS.



I. Nevliudov<sup>1</sup>, S. Maksymova<sup>1</sup>, O. Klymenko<sup>2</sup>, M. Bilousov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine

<sup>2</sup> «Kapelou» LLC, Kyiv, Ukraine

## DEVELOPMENT OF A MOBILE ROBOT PROTOTYPE WITH AN INTERACTIVE CONTROL SYSTEM

**Abstract.** One of the most urgent tasks of robotics is to perform work in conditions where a person cannot work, in extreme conditions. At the same time, the goal is to find a person at a distance, often a considerable distance, in safe conditions. From this follows the need to create robots that will be able to work by themselves either in autonomous mode or in remote control mode. At the same time, the task of detecting sources of combustion, which can be solved by a mobile robot equipped with specific sensors, is extremely urgent. Therefore, the task of developing an interactive control system for such a robot becomes urgent. The subject of this study is a mobile robot control program. The **purpose** of this article is to improve the efficiency of the fire safety system through the development of a mobile robot with appropriate sensors, as well as an interactive control system. To achieve the goal, it is necessary to solve the following **tasks**: analyze the methods of creating prototypes of mobile robots, develop a structural diagram of a mobile robot, choose components, choose the necessary sensors based on the goals of ensuring fire safety, develop an automated control system based on a modern single-board computer and intuitively develop clear operator interface. **Conclusions:** as a result of research, a structural diagram of a mobile robot was developed, its components were selected, it was assembled, equipped with sensors, and software was created that allows you to control it interactively. The developed prototype of a mobile robot will reduce the risk of fires and the need for human intervention, ensuring an operational response to danger. In addition, a mobile robot with the ability to independently navigate and recognize danger will ensure the optimization of work processes at various enterprises, or to check dangerous areas, improve the safety of workers or people around and reduce material costs. The result of the work is a functioning robot prototype with an implemented interactive control system

**Keywords:** mobile robot, ignition source, control system, fire sensor.

### Introduction

In modern production, considerable attention is paid to ensuring human safety and reducing the risks of emergencies, including reducing the risk of fire due to various causes. In order to prevent the spread of fire, explosions in general, as well as explosions of equipment, damage to workers, and minimize costs, it is necessary to extinguish a fire as quickly as possible, or even better, to prevent it. For this purpose, it is advisable to use mobile robots equipped with temperature and fire detection sensors. Such robots should constantly monitor industrial premises and transmit information to the operator in real time.

The aim of this work is to improve the efficiency of the fire safety system by developing a mobile robot with appropriate sensors and an interactive control system.

A prototype of such a mobile robot will be developed, as well as an interactive control system for the mobile robot based on the Arduino board and the use of sensors that will enable the mobile robot to perform its tasks. The idea is to create a robot that can move independently and recognize dangerous situations, such as the onset of a fire and rising temperatures.

The developed prototype of a mobile robot will reduce the risk of fires and the need for human intervention by providing a rapid response to danger. In addition, a mobile robot with the ability to independently navigate and recognize hazards will optimize workflows at various enterprises or to inspect hazardous areas, improve the safety of employees or people around them, and reduce material costs.

The result of the work will be a prototype of a mobile robot with interactive control. It is a functional

device capable of moving in the environment and interacting with the user. The mobile robot will be able to receive commands from the user, as well as respond to them, perform tasks and provide useful information. An important aspect is a user-friendly interface that will allow easy and intuitive interaction with the robot. In addition, the prototype will have additional functions related to monitoring the temperature in an industrial room and detecting open flames in it.

#### Analysis of recent studies and publications.

There is a growing trend of emergencies in Ukraine and the world [1].

The main areas of fire safety are the elimination of fire conditions and minimization of its consequences. Facilities must have fire safety systems aimed at preventing exposure of people and material assets to fire hazards, including their secondary manifestations [2].

Based on the requirement to ensure the safety of people as much as possible, a progressive idea was the use of mobile robots to detect abnormally high temperatures and sources of fire in production. Many authors offer their own experience in developing both such robots and remote, preferably interactive, control systems for them [3-7].

A whole galaxy of researchers [8-11] suggest using the Arduino board to create firefighting robots, as well as those that detect fires. That is why we chose the Arduino Mega 2560 board in our work.

**Purpose of the work.** Improving the efficiency of the fire safety system by developing a mobile robot with appropriate sensors and an interactive control system.

The result of the work will be a prototype of a mobile robot with interactive control. It is a functional device capable of moving in the environment and interacting with the user. The mobile robot will be able

to receive commands from the user, as well as respond to them, perform tasks and provide useful information. An important aspect is a user-friendly interface that will allow easy and intuitive interaction with the robot. In addition, the prototype will have additional functions related to monitoring the temperature in an industrial room and detecting open flames in it.

### 1. Selection of mobile robot components

This article proposes the development of a mobile robot with interactive control that can be used in industrial, warehouse, or residential premises to monitor and obtain information about temperature or fire.

The central component of the system is the Arduino Mega 2560 R3, which provides sufficient computing power and the ability to control various aspects of the robot. It serves as the basis and "brain" of the project, allowing you to program the logic of the robot and process data from sensors or sensors.

An example of the board is shown in Fig. 1.

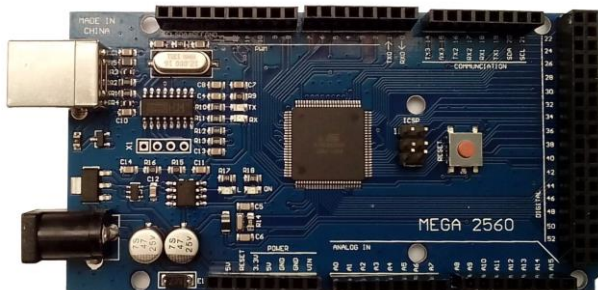


Fig. 1. Arduino Mega 2560 board

The Arduino Mega 2560 board is one of the key components selected for the development of a mobile robot with interactive control. An important advantage of the board is its functionality. It is equipped with a powerful Atmega2560 microcontroller, which provides enough computing resources to implement complex algorithms and control various devices. The board also has a large number of digital and analog I/Os, which allows you to connect various sensors, actuators, and other peripherals.

The Arduino Mega 2560 supports a variety of software libraries and the Arduino IDE, which simplifies the programming and development process. It is also compatible with a large number of extensions and modules, which allows you to expand the functionality and capabilities of the system. It also has a fairly low cost. This board is widely available on the market.

The next important component for a mobile robot is the platform on which all the elements are located. We chose a mobile 3-wheeled transparent robot platform for robotics. Its appearance is shown in Fig. 2.

The platform is equipped with two motors with a deceleration ratio of 48:1. These motors provide enough power and torque to move the robot. They operate at 3-6V and have low current consumption, which is an energy-efficient solution. Three wheels, of which two are drive and sliding motors, provide stability and maneuverability of the robot. This allows for efficient movement in different directions and turns.



Fig. 2. Single deck robotic platform

This platform also has a battery compartment, which simplifies the integration of the power supply system into the robot structure itself. This ensures convenient and compact battery placement, which is especially important for mobile robots.

The next element will be the MB-102 solderless breadboard with 400 points. One of the key advantages of the MB-102 breadboard is its convenient design. The breadboard is shown in Fig. 3.

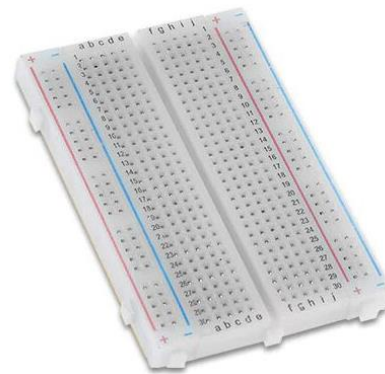


Fig. 3. MB-102 solderless circuit board

The board has 400 contact points, which provides enough space to connect various components, wires, and connections. This allows you to conveniently arrange circuit elements and make the necessary connections for testing and design. The breadboard also has high contact reliability and stability. Each contact point on the board provides a reliable electrical connection, which helps to avoid malfunction problems and ensures stable operation of the circuit.

The bridge driver plays an important role in the management and control of motors. The L293D bridged motor driver was selected to control two bridged motors. An example of a bridge driver is shown in Fig. 4.

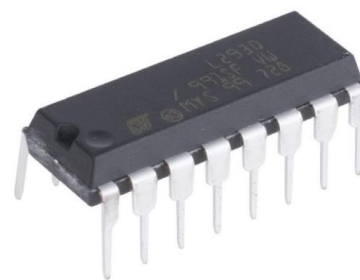


Fig. 4. L293D bridge motor driver for collector motors

The bridge driver ensures smooth and precise movement of the robot. The L293D provides stable and reliable motor control. It has built-in overload and back EMF protection to help prevent damage to components when changing direction or braking the motors. The bridge driver also allows you to control the direction of rotation of the motors and adjust their speed.

To connect all the components to the board, you also need a set of mother-to-mother and father-to-mother jumpers. An example of a set is shown in Fig. 5.



Fig. 5. Jumpers set

Next, we selected the necessary sensors. First, let's look at the ultrasonic sensor. This is a component that allows you to measure the distance to objects based on the principle of ultrasonic wave reflection. The HC-SR04 we have chosen is one of the most popular distance sensors and is widely used in various robotics projects. Its appearance is shown in Fig. 6.



Fig. 6. HC-SR04 sensor

The sensor consists of a transmitter and a receiver module. The transmitting module generates ultrasonic pulses that travel to the object and then are reflected back. The receiving module registers the reflected pulses and determines the time of sound wave travel. Based on the sound travel time and knowing the speed of air, the distance to the object can be calculated. The HC-SR04 can measure the distance to objects in the range of a few centimeters to several meters. This makes it versatile and applicable in a variety of scenarios. The sensor also has a simple connection and communication interface with a microcontroller. It works on the basis of the echolocation protocol, which simplifies programming and integration into projects. The selected instance is available at a low price and is readily available on the market. This makes it an attractive option for developing projects with a limited budget.

For communication and connection to wireless networks in the mobile robot project, the ESP8266 Wi-Fi module of the ESP-01 version was chosen (Fig. 7). This module provides a wireless Internet connection, which opens up a wide range of possibilities for remote control and data exchange.



Fig. 7. Wi-Fi module ESP8266 version ESP-01

The ESP8266 ESP-01 is a compact and cost-effective Wi-Fi module that offers sufficient performance and functionality to implement Wi-Fi communications. It is equipped with a microcontroller and a built-in antenna, which ensures its autonomous operation. The module allows remote control of the mobile robot using a smartphone, tablet, or computer. It can also be used to collect data from various sensors on the robot, such as distance, temperature, humidity, and other sensors. The collected data can be transferred to a remote server or cloud storage for further analysis and processing.

The KY-033 line sensor (Fig. 8) is a device specially designed to detect and follow lines on a surface. It is equipped with infrared sensors that respond to reflected light from the surface and allow you to determine the position of the line.

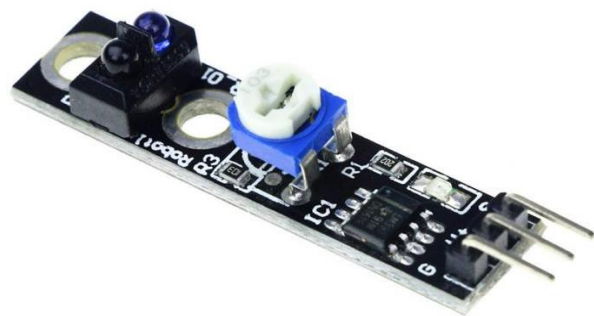


Fig. 8. KY-033 line sensor

The line sensor allows the robot to detect and follow a line on the floor or other surface. This can be useful, for example, for creating a linear route or an automatic navigation solution. It can be used to detect obstacles in the robot's path. If the line is interrupted or changed, the robot can react by changing its direction or taking appropriate action. If the robot is moving on a platform with edges or cliffs, the KY-033 line sensor can help it avoid falling or colliding. The robot can react to changes in surface color and adjust its movement to stay in the safe zone of the platform



The next sensor we chose was the KY-026 flame sensor (Fig. 9). It is a module designed to detect the presence of a flame, based on a photo-sensitive element that responds to changes in the intensity of light created by the flame.

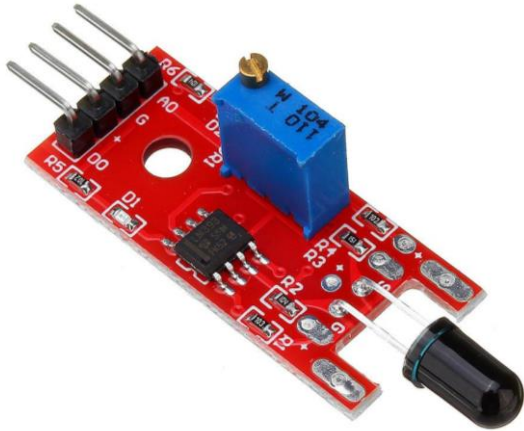


Fig. 9. Fire sensor

A sensor can be mounted on the robot for early detection of fire or other sources of flame in the environment. If flames are detected, the robot can activate appropriate safety systems or take action to prevent the spread of the fire. If the robot is used in areas where fires or dangerous situations are possible, the flame sensor can be integrated into a warning system.

When flames are detected, the robot can activate sirens, flash lights, or send an alarm to alert others to the presence of danger.

The last module to be installed on our mobile robot is an infrared thermometer (Fig. 10).

An infrared thermometer is designed to measure the temperature of objects using infrared radiation emitted by them.

It can work together with the KY-026 flame sensor to more accurately detect and measure heat or flame sources. In our case, the use of these two sensors allows us to measure the exact temperature of the flame source,

complementing the information received from the flame sensor. This can be useful for determining flame intensity or monitoring temperature changes in the environment. The thermal module can also help detect hot spots or objects with elevated temperatures in the environment. This can be useful for detecting obstacles that could cause damage to the robot or other objects, as well as for determining temperature changes within certain areas.



Fig. 10. Infrared thermal module

## 2. Assembling a mobile robot

The structure of mobile robots depends on the tasks that the robot solves, but regardless of the tasks being solved, the main components of the mobile robot structure can be identified.

A block diagram is shown in Fig. 11.

*Development of a circuit diagram.* This circuit was created using the online tool Tinkercad, which allows you to design electronic circuits in a virtual environment. The main components of the circuit are two motors that are responsible for driving the robot's wheels.

The circuit also includes two ultrasonic sensors that are connected to a breadboard and then to an Arduino Mega 2560 R3 board.

The circuit is shown in Fig. 12.

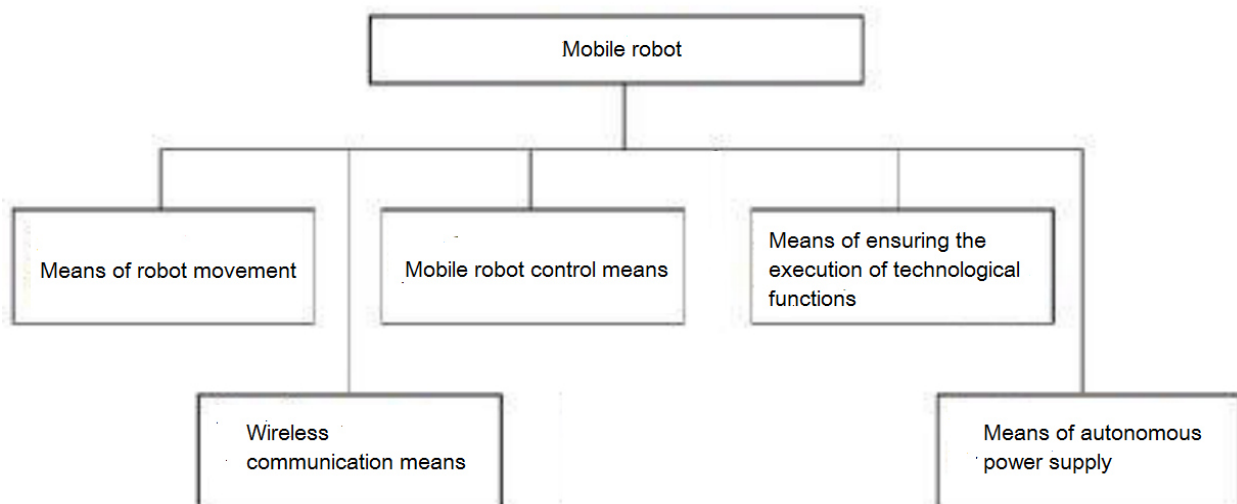


Fig. 11. Block diagram of a mobile robot

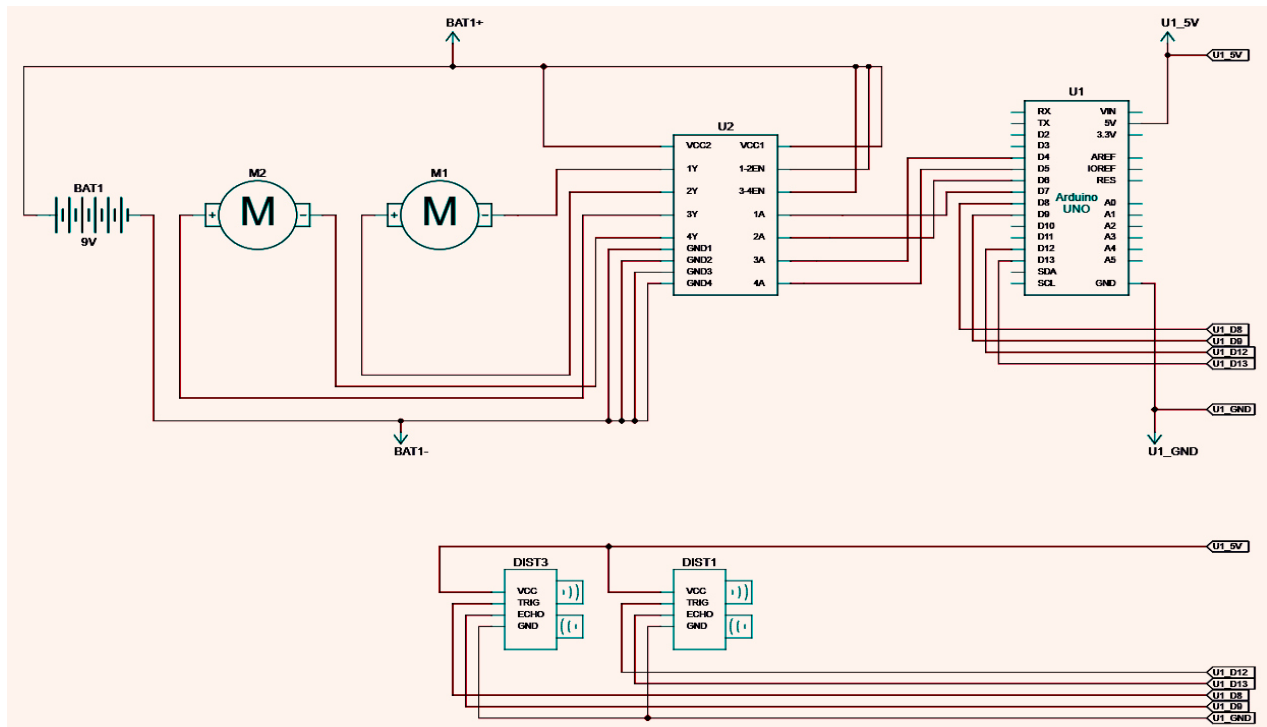


Fig. 12. Schematic diagram of the circuit

The connection to the prototype board is shown in Fig. 13 and 14.

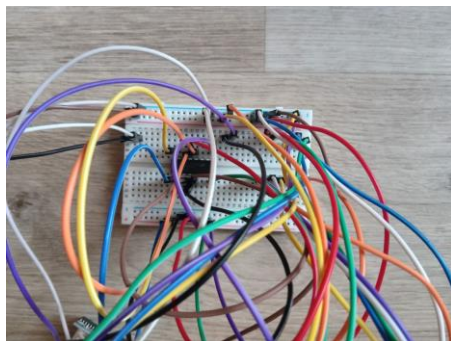


Fig. 13. Connecting to the prototype board

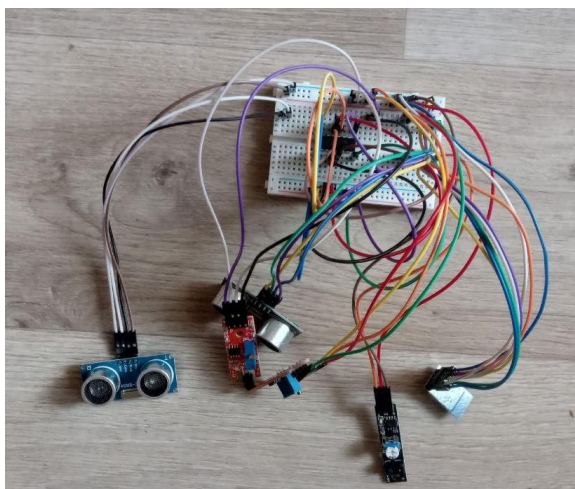


Fig. 14. Connection with sensors

Thanks to the Wi-Fi module ESP8266, we can theoretically realize the control of a mobile robot

through a browser. The user, being in a local Wi-Fi network, opens a browser on his device. The mobile robot equipped with the ESP8266 module creates a web server on the module that listens for incoming HTTP requests. A web page with the robot's control interface is displayed in the user's browser. The user clicks buttons on the web page to control the robot. The browser sends a corresponding HTTP request to the robot's IP address and port. The ESP8266 module receives the request and interprets it as a command to control the robot's motors. The module transmits signals to the L293D bridge driver, which controls the robot's motors. The robot moves according to the commands received from the user via the browser. Thus, the user can control the mobile robot in real time (interactively) by clicking buttons on a web page in the browser, and the ESP8266 module transmits commands to the robot's motors through the bridge driver. The developed interface is shown in Figure 15.

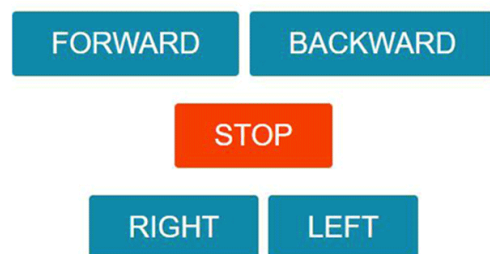


Fig. 15. Example of a robot control interface

### Conclusions

As a result of the above research, a prototype of a mobile robot has been developed that will reduce the risk of fires and the need for human intervention by providing a rapid response to danger.

In addition, this mobile robot has the ability to independently navigate and recognize hazards, which will optimize workflows at various enterprises or to inspect hazardous areas. Such a robot will improve the safety of employees or people around them and reduce material costs.

## REFERENCES

1. Кузик, А. Д.; Товаряньський, В. І. Дослідження пожеж зернових культур з використанням комп'ютерного моделювання. *Пожежна безпека*, 2022, 41: 67-72. <https://doi.org/10.32447/20786662.41.2022.08>
2. Кодекс цивільного захисту України від 02.10.2012 № 5403-VI (редакція станом на 16.10.2020)
3. Zhu, J., Li, W., Lin, D. et al. Intelligent Fire Monitor for Fire Robot Based on Infrared Image Feedback Control. *Fire Technol* 56, 2089–2109 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00964-4>
4. ZHU, Jinsong, et al. Intelligent fire monitor for fire robot based on infrared image feedback control. *Fire Technology*, 2020, 56: 2089-2109. <https://doi.org/10.18196/jrc.1104>
5. ZHANG, Shuo, et al. Design of intelligent fire-fighting robot based on multi-sensor fusion and experimental study on fire scene patrol. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 154: 104122. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104122>
6. AN, Qing, et al. A robust fire detection model via convolution neural networks for intelligent robot vision sensing. *Sensors*, 2022, 22.8: 2929. <https://doi.org/10.3390/s22082929>
7. WU, Changzhong, et al. Design and development of intelligent fire-fighting robot based on stm32. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. p. 062019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1748/6/062019>
8. SURESH, Monica P., et al. An Arduino Uno Controlled Fire Fighting Robot for Fires in Enclosed Spaces. In: *2022 Sixth International Conference on I-SMAC (IoT in Social, Mobile, Analytics and Cloud)(I-SMAC)*. IEEE, 2022. p. 398-402. <https://10.1109/I-SMAC55078.2022.9987432>
9. M. R. A. Rahat, M. M. Rashid, M. C. Dey and T. Banik, "Design and Implementation of a Safety Fire Fighter (SAFF) Robot with Dual Controlling Mechanism," *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYPMP)*, Dhaka, Bangladesh, 2020, pp. 937-940, doi: <https://10.1109/TENSYPMP50017.2020.9230709>
10. RAJESH, M., et al. A Review-Fire Fighting Robot based on Arduino. *Journal of Power Electronics and Devices*, 2022, 8.3: 25-29.
11. M. Diwanji, S. Hisvankar and C. Khandelwal, "Autonomous Fire Detecting and Extinguishing Robot," *2019 2nd International Conference on Intelligent Communication and Computational Techniques (ICCT)*, Jaipur, India, 2019, pp. 327-329, <https://10.1109/ICCT46177.2019.8969067>
12. Attar, H., & et al.. (2022). Zoomorphic Mobile Robot Development for Vertical Movement Based on the Geometrical Family Caterpillar. *Computational Intelligence and Neuroscience*, 2022, Article ID 3046116, <https://doi.org/10.1155/2022/3046116>.
13. Nevludov, I., Yevsieiev, V., Maksymova, S., Demka, N., Kolesnyk, K., & Miliutina, O. (2022, September). Object Recognition for a Humanoid Robot Based on a Microcontroller. In *2022 IEEE XVIII International Conference on the Perspective Technologies and Methods in MEMS Design (MEMSTECH)* PP. 61-64. DOI: 10.1109/MEMSTECH55132.2022.10002906
14. A Small-Scale Manipulation Robot a Laboratory Layout Development / Yevsieiev V., Starodubcev N., Maksymova S., Stetsenko K. // *International independent scientific journal*, №47, 2023. P.18-28
15. Yevsieiev, V. ., Maksymova, S. ., & Starodubcev, N. . (2022). A ROBOTIC PROSTHETIC A CONTROL SYSTEM AND A STRUCTURAL DIAGRAM DEVELOPMENT. Collection of Scientific Papers «ΛΟΓΟΣ», (August 12, 2022; Zurich, Switzerland), 113–114.

Received (Надійшла) 12.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

### Розробка прототипу мобільного робота з інтерактивною системою керування

I. Ш. Невлюдов, С.С. Максимова, О. М. Клименко, М. Ю. Білоусов

**Анотація.** Однією з найактуальніших завдань робототехніки є виконання робіт в умовах, де не може працювати людина, в екстремальних умовах. При цьому мається на меті знаходження людини на відстані, часто на значній, в безпечних умовах. З цього випливає необхідність створення роботів, які будуть здатні самі працювати або в автономному режимі або в режимі віддаленого керування. В той же час надзвичайно гостро стоїть завдання виявлення місць займання, яке може вирішити мобільний робот, оснащений специфічними датчиками. Отже, актуальною стає задача розробки інтерактивної системи керування для такого робота. **Предметом** даного дослідження є програма керування мобільним роботом. **Метою** даної статті є підвищення ефективності системи забезпечення пожежної безпеки за рахунок розробки мобільного робота із відповідними датчиками, а також інтерактивної системи керування. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**: проаналізувати способи створення прототипів мобільних роботів, розробити структурну схему мобільного робота, обрати комплектуючі, обрати необхідні датчики, виходячи із цілей забезпечення пожежної безпеки, розробити автоматизовану систему керування на базі сучасного одноплатного комп'ютера і розробити інтуїтивно зрозумілий інтерфейс оператора. **Висновки:** в результаті досліджень було розроблено структурну схему мобільного робота, обрано його комплектуючі, зібрано його, обладнано датчиками та створено програмне забезпечення, яке дозволяє інтерактивно керувати ним. Розроблений прототип мобільного робота дозволить знизити ризик виникнення пожеж та необхідність людського втручання, забезпечивши оперативну реакцію на небезпеку. Крім того, мобільний робот зі здатністю самостійно навігувати та розпізнавати небезпеку забезпечить оптимізацію робочих процесів на різних підприємствах, або для перевірки небезпечних ділянок, покращить безпеку працівників або людей навколо та зменшить матеріальні втрати. Результатом роботи є функціонуючий прототип робота з реалізованою інтерактивною системою керування.

**Ключові слова:** мобільний робот, місце займання, система керування, датчик вогню.

M. Starodubtsev, V. Nevlyudova, M. Vzesnevsky, S. Shibanov

Kharkiv National University of Radioelectronics, Kharkiv, Ukraine

## DEVELOPMENT OF AN INTELLIGENT ROBOT CONTROL SUBSYSTEM

**Abstract.** The subsystem should provide the following functionalities: planning of trajectories of movement of an intelligent robot in an a priori uncertain dynamic environment of operation: representation of opposing objects of the environment and functional and executive nodes of a mobile robot using a fuzzy configuration space; formation of a movement trajectory with a fixed level of confidence; updating the environment map when exploring new areas of the operating environment; real-time operation of the scheduler; modularity and scalability of the subsystem. To successfully navigate in space, the robot control system must be able to build a route, control movement parameters, correctly interpret information about the world around it received from sensors, and constantly track its own coordinates. The paper investigates the development of control subsystems for an intelligent robot. To achieve this goal, the initial data were analyzed, the general principle of building a simulation model of the robot was described, and a structural diagram of the control system of an intelligent robot was developed.

**Keywords:** intelligent robot, sensor, navigation system, interface.

### Introduction

The subsystem under development is designed to plan the targeted actions of an intelligent mobile robot in an a priori uncertain environment [1]. It is difficult to develop such a subsystem based only on a rigid algorithm for working out a given trajectory of movement of the robot's executive subsystems (RS). The absence of feedback on the operations performed indicates a low flexibility of the system as a whole, which significantly reduces the possibility of using the RP in real conditions of automated production. The direct operation of such a system faces the following problems

- the need to create a flexible distributed structure of flexible production modules;
- solving the problem of time coordination of several robots performing a single task;
- the need to change the control program when moving to new unstructured production areas, where it is difficult to enter the trajectory of the robot's technological operation.

The main disadvantage is the strict requirement for the accuracy of the reference trajectory, the violation of which during operation leads to a disruption of the entire technological process (TP), and this situation is difficult to automatically correct, requiring intelligent action planning [2–5]. The subsystem should provide the following functionalities:

a) planning of trajectories of movement of an intelligent robot in an a priori uncertain dynamic environment of operation:

- 1) representation of opposing objects of the environment and functional and executive nodes of a mobile robot using a fuzzy configuration space;
- 2) formation of a movement trajectory with a fixed level of confidence;
- 3) updating the environment map when exploring new areas of the operating environment;

- b) real-time operation of the scheduler;
- c) modularity and scalability of the subsystem.

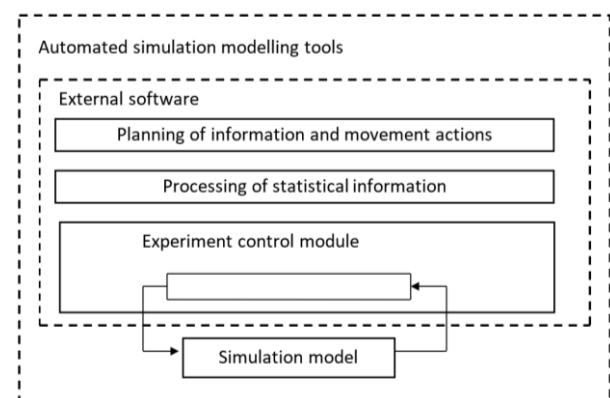
When filling the knowledge base, the operator is responsible for selecting the general characteristics (name, code, etc.) of known objects. Object traversal parameters are recorded as additional object parameters. Changes to the trajectory in the object knowledge base

are made only by the subsystem itself; the operator cannot change these characteristics manually.

The subsystem should provide for updating decision-making methods due to the object-oriented structure of the information and modeling complex, i.e., recomposition without changing the basic relationships between modeling objects.

### 1 General principle of building a robot simulation model

In accordance with the traditional model of modeling organization, when information flows are exchanged between the researcher-designer and the simulation model, feedback on the results of the simulation is provided by a chain external to the simulation modeling system - a person with the involvement of auxiliary tools and software methods. At the same time, the researcher-designer performs the function of information transformation, which consists in interpreting the results and making decisions on managing experiments and generalizing information to the knowledge base of an intelligent robot. Automation of experiment management involves the creation of a closed software-implemented control loop of the simulation model within the framework of external software [6–9]. The structure of the model is shown in Fig. 1.



**Fig. 1.** Structure of the information and control model

Targeted series of experiments, in accordance with the set goal of the robot's functioning and taking into account the constraints of the configuration parameters, are organized by modules that are specifically included



in the external software. In general, these modules must set the initial data sets, initiate model runs as a whole, process the results, and make decisions about the further development of experiments in accordance with the implemented modeling control algorithm.

Such an algorithm, directing the experiments, searches for such a combination of parameters in the field of permissible values of parameters that would ensure the optimum of a given quality indicator, i.e., essentially solves the optimization task:

$$f(\bar{x}) \xrightarrow{\bar{x} \in X} \max, \quad (1)$$

where  $f$  – the objective function represented by the algorithmic simulation model;  $\bar{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  – vector of parameters of the modeling object;  $X$  – a set of valid values of input parameters.

Thus, a set of algorithmic and software tools that provides the process of automated modeling forms a simulation automation modeling system (SAMS). Since the user does not enter each set of initial data for the next run of the simulation model and only specifies the goal or criterion and the range of parameter variation, while the search for valid solutions to simulation problems is performed automatically by the SAMS, the definition of an intelligent simulation system can be applied to the latter. For example, the functions of the SAMS in the control loop of a flexible production system generally consist in analyzing alternative options for robot behavior after making a particular possible decision on dispatching and operational planning of information and motion actions, etc.

The effectiveness of these functions is due to the replacement of the rigid control logic of an intelligent robot, which involves the use of specified and fixed heuristics in certain situations, with a flexible and dynamic mechanism that ensures decision-making not only on the basis of a similar analysis of the current state of the robot, but also taking into account the prospects for its development. The problem of automating the management of experiments, synthesizing knowledge and building a knowledge base can be represented by the logical structure of the step-by-step solution of individual tasks of an intelligent robot, as shown in Fig. 2. At the first stage of automating the control of experiments, two tasks are solved:

- structural and algorithmic construction of the control module itself is performed;
- forming the substantive basis and formal requirements for the organization of information exchange with the simulation model.

The task of structural and algorithmic construction of the experiment control module and synthesis of the knowledge system is solved in the following sequence: the composition and structure of the module are determined (the conditions of interaction of its components and position in the overall structure of the SAMS are developed).

When performing a series of simulation model runs, a targeted variation of parameter values occurs, which can affect the value of the objective function not only through direct influence on the functioning of the modeling

object, but also indirectly through other elements of the object (robot) that are connected. As a result, cost and other indicators change. In addition, restrictions can be imposed on the values of some parameters, in particular, some of them can be fixed, i.e. set declaratively. This can be reflected in the formation of initial data sets and initialization of the initial states of the knowledge system modeling process.

Considering a simulation model as a means of purposeful transformation of information in accordance with a certain system of prescriptions, it makes sense to talk about a simulation modeling algorithm. Then the formal interpretation of the requirements under consideration can be written as follows:

$$S \in Q; S \in C, \quad (2)$$

where  $S$  – input word of the simulation modeling algorithm;  $Q$  – a set of valid sets of robot parameter values;  $C$  – the scope of the simulation modeling algorithm definition.

The input word  $S$  specifies a set of initial data of a particular data set, i.e.  $S = (i, \xi_j, \dots, \xi_z)$ , where each value  $\xi_j$  corresponds to a certain value of a certain parameter of the modeling object. The domain is determined by the software implementation of the simulation algorithm, and it can be formed by the set  $D_{in}$  of input alphabet sets. All values  $\xi_j$  that have a permitted realization of the modeling object  $U$ . Thus, expressions (1) respectively define the conditions for matching  $S$  with the simulation model and algorithm. The task is to develop an apparatus for formal analysis of the consistency of changes in semantically interrelated parameters to ensure that the variation does not violate condition (1) and does not lead to changes in fixed parameters. At the second stage, the automation of experiment management and the construction of a knowledge system is carried out, and the following stages are solved:

- development of principles, interaction of the logical inference system and numerical optimization procedures;
- selection (development) of an apparatus for implementing logical inference from combined algorithms for managing experiments;
- development of effective inference algorithms based on the proposed apparatus, taking into account the specifics of interaction with numerical optimization procedures.

This stage solves the problem of developing optimization procedures used in planning extreme

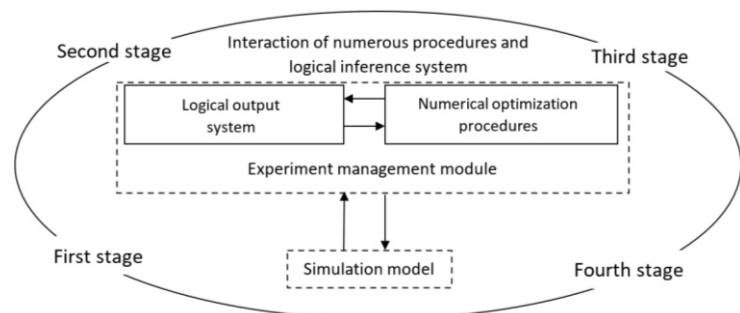


Fig. 2. Automated modeling of an intelligent object

actions. At the same time, the issue of developing algorithmic support can be considered for specific aspects of object modeling, namely

- automation of experiments management under conditions of linguistic uncertainty of parameters, for example, "degree of similarity/difference..." has no natural numerical measurement;

- organization of extreme experiments in the problems of one-parameter optimization with a significantly uneven location of points in the middle of the interval, for example, a unimodal response function, and fixing the corresponding states in the model of the knowledge system;

- reduction of search time with a significant duration of the simulation model run, which is important for multi-iterative search algorithms, full search of options, etc.

## 2 Block diagram of the robot control system

The main task of an intelligent control system (ICS) is to physically implement various movements of an

intelligent robot, with an adequate response to uncontrolled environmental changes and unpredictable drift of the robot's parameters. To fulfill the main task of the ICS during operation, it is necessary to solve many additional tasks that interact with each other. The analysis of these tasks and the specifics of controlling an intelligent robot led to the construction of a control system in the form of a three-level hierarchical structure, shown in Figure 3.

At the first level, the ICS makes a decision on the possibility or impossibility of movement, determines the composition of electromechanical devices (EMDs) used for movement, and builds a general plan of movement (maneuver). At the second level, EMD control programs are formed, their control models are determined, the current situation is recognized, and self-learning is performed during operation. At the third level, controlling influences are formed to perform movements in an optimal way: for a minimum time, with a given accuracy, quality of transients, etc. with the necessary adjustment (adaptation) of EMD control models.

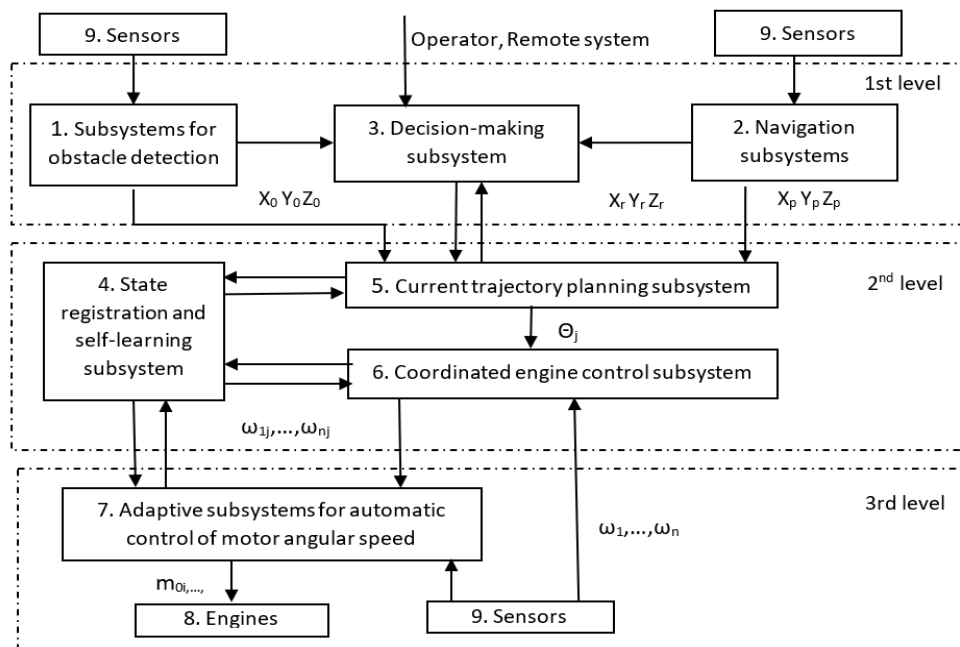


Fig. 3. Structure of an intelligent control system for an intelligent robot

The structure is focused on the realization of IR movements in real time, in which the interaction between levels occurs according to a limited number of movement parameters: linear speed  $V$ ; position coordinates  $X$ ,  $Y$ ; heading angle  $Z$  (angle between the main axis of the IR and one of the coordinate axes); angular velocities of wheels and motors  $\omega$ . In the proposed system for controlling the movements of the IR, the current goal of the movement or movements is received from the upper-level control system (external computer) in the form of parameters  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$ , or parameters defined regarding the obstacle  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ .

The movements are controlled as follows. Block 3 receives a request to perform the movement of the IP (movement of the IR in the workspace, location of the working body of the attachment, or performing these actions simultaneously). Based on the data of blocks 1 and 2 on the current location of the intelligent robot and

obstacles to movement in the workspace, as well as information from the second and third levels of control, block 3 determines whether the specified movement can be performed or not. In case of a positive decision, the coordinates of the points of the trajectory ending at the target point  $X_r$ ,  $Y_r$ ,  $Z_r$  are calculated. These coordinates are transmitted to the second level block 5.

In block 5, according to the incoming coordinates and knowledge about the properties of the current working space of the intelligent robot and the location of fixed obstacles in it, as well as knowledge about how this goal was achieved in the past, the desired linear speed  $V_g$  and the desired steering angle  $\omega_g$  of the steering device (if any) for the next point of the trajectory are determined. For this purpose, the information coming from the navigation system  $X_p$ ,  $Y_p$ ,  $Z_p$  or the subsystem for determining the position of the robot relative to the obstacle  $X_o$ ,  $Y_o$ ,  $Z_o$ , as

well as the knowledge accumulated in block 4 by experts during the design of the system and during the period of operation of the robot is used. In the absence of navigation subsystems and an obstacle positioning subsystem, the current trajectory planning subsystem uses its own path calculator to determine the coordinates of its position based on data from wheel rotation sensors, motors, or special travel distance sensors.

If  $V_g$  and  $\theta_g$  are calculated, then in block 4, based on information from the upper-level systems and the internal state of the robot, the current situation is recognized and adaptive EMD control models adequate to the current situation are selected. These models are sent to block 6. In block 6, the angular velocities of the motors  $\omega_{1g}, \dots, \omega_{ng}$ , participating in the movement, are calculated. The sequence  $\omega_{1g}, \dots, \omega_{ng}$  in time represents the control program for the corresponding motor (motors) and is stored in block 4. Thus, block 4 accumulates the movement programs that the system uses in the absence or malfunction of the navigation subsystems. In addition, these programs include programs for maneuvers (turns and movements) in a limited space that are not described by smooth continuous trajectories.

The calculated angular velocities are sent to block 7 of the third level. The task of the block is to generate control influences  $m_{oi}, \dots, m_{vi}$  on all the motors involved in the movement. Block 7 implements the functions of parametric adaptive automatic control systems that

monitor the angular velocity of wheels or motors. If the disturbances go beyond the permissible limits, the current trajectory planning system at the second level or the decision-making subsystem at the first level is accessed to make a decision on further control.

During operation in block 7, the parameters of automatic control systems are identified using real data from block 9.

These parameters are processed and accumulated in block 4. They are then used to determine the initial conditions of the adaptive control subsystems when performing subsequent movements in similar conditions.

In addition, all data are stored for subsequent processing to determine control errors and develop methods for their accounting. In the simplest case, when moving repeatedly along the same trajectory, this subsystem determines the average values for the desired parameters of each trajectory point.

## Conclusions

To successfully navigate in space, the robot control system must be able to build a route, control movement parameters, correctly interpret information about the world around it received from sensors, and constantly track its own coordinates. To achieve these goals, we have developed an architecture and a generalized algorithm for controlling a mobile robot and a block diagram of the robot control system.

## REFERENCES

1. Wang, S., Jiang, L., Meng, J., Xie, Y., & Ding, H. (2021). Training for smart manufacturing using a mobile robot-based production line. *Frontiers of Mechanical Engineering*, 16, 249-270.
2. Designing mobile manipulation robots : monograph / I. Nevludov, A. Andrushevych, V. Evseev, S. Novoselov, N. Demaska; Kharkiv National University of Radio Electronics. Kharkiv: KNURE, 2022. 427 p.
3. Zhu, J., Li, W., Lin, D. et al. Intelligent Fire Monitor for Fire Robot Based on Infrared Image Feedback Control. *Fire Technol* 56, 2089–2109 (2020). <https://doi.org/10.1007/s10694-020-00964-4>
4. ZHU, Jinsong, et al. Intelligent fire monitor for fire robot based on infrared image feedback control. *Fire Technology*, 2020, 56: 2089-2109. <https://doi.org/10.18196/jrc.1104>
5. ZHANG, Shuo, et al. Design of intelligent fire-fighting robot based on multi-sensor fusion and experimental study on fire scene patrol. *Robotics and Autonomous Systems*, 2022, 154: 104122. <https://doi.org/10.1016/j.robot.2022.104122>
6. AN, Qing, et al. A robust fire detection model via convolution neural networks for intelligent robot vision sensing. *Sensors*, 2022, 22.8: 2929. <https://doi.org/10.3390/s22082929>
7. WU, Changzhong, et al. Design and development of intelligent fire-fighting robot based on stm32. In: *Journal of Physics: Conference Series*. IOP Publishing, 2021. p. 062019. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1748/6/062019>
8. Nevludov, I., Tsymbal, O., Bronnikov, A. (2022), "Information models for manufacturing workspaces in robotic projects", *Innovative Technologies and Scientific Solutions for Industries*, No. 2 (20), P. 97–105. <https://doi.org/10.30837/ITSSI.2022.20.097>
9. Tymoshyn Y., Shevchenko M. Intelligent control system for a group of robots. *Adaptive automatic control systems*, 2021. Vol. 2. No. 39. pp. 106-114.

Received (Надійшла) 12.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

## Розробка підсистеми управління інтелектуальним роботом

М. Г. Стародубцев, В. В. Невлюдова, М. О. Вжесневський, С. В. Шибанов

**Анотація:** Підсистема має забезпечувати такі функціональні можливості: планування траєкторій пересування інтелектуального робота в апріорно невизначеному динамічному середовищі функціонування: репрезентація протидіючих об'єктів середовища та функціонально-виконавчих вузлів мобільного робота з використанням нечіткого конфігураційного простору; формування траєкторії пересування з фіксованим рівнем довіри; оновлення карти середовища при дослідженні нових ділянок середовища функціонування; режим роботи планувальника в реальному часі; модульність і нарощуваність підсистеми. Для успішної навігації в просторі система управління робота повинна вміти будувати маршрут, керувати параметрами руху, правильно інтерпретувати відомості про навколишній світ, одержувані від датчиків, і постійно відстежувати власні координати. В роботі проведені дослідження з розробки підсистем управління інтелектуальним роботом. Для досягнення мети проведено аналіз вихідних даних, описано загальний принцип побудови імітаційної моделі робота і розроблено структурну схему системи управління інтелектуальним роботом.

**Ключові слова:** інтелектуальний робот, датчик, система навігації, інтерфейс.

С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## МОЖЛИВІСНА МОДЕЛЬ КАУЗАЛЬНОГО ЗВ'ЯЗКУ ПО ВХІДНІЙ ЗМІННІЙ ДЛЯ ПОБУДОВИ ПОЯСНЕННЯ В ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІЙ СИСТЕМІ

**Анотація.** Предметом вивчення в статті є процеси побудови пояснень для отриманих в інтелектуальній інформаційній системі рішень. Метою побудова моделі причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в умовах невизначеності щодо станів інтелектуальної інформаційної системи, якщо остання представляється у вигляді чорного ящика. **Завдання:** структуризація пояснення з урахуванням особливостей когнітивної діяльності людини; формування необхідної та достатньої умови щодо каузальної залежності як складової пояснення з використанням теорії можливостей; розробка можливої моделі каузальної залежності для одної вхідної змінної, яка враховує невизначеність щодо станів інтелектуальної системи. Використовуваними підходами є: підходи до побудови пояснень у когнітивній діяльності людини, підходи до побудови пояснень у пояснювальному штучному інтелекті. Отримані наступні результати. Структуровано пояснення як елемент когнітивної діяльності людини. Показано, що пояснення може бути представлено в двох аспектах: концептуальному, шляхом порівняння вхідної інформації із існуючою системою знань людини; тлумачному, шляхом порівняння властивостей вхідних об'єктів. Запропоновано можливісні необхідна та достатня умови для каузальної залежності на базі однієї вхідної змінної, що лежить в основі пояснення. Запропоновано модель можливої каузальної залежності для побудови пояснення в інтелектуальній системі. **Висновки.** Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному. Запропоновано модель можливої каузальної залежності між вхідною змінною та результатом роботи інтелектуальної системи, що поєднує необхідну умову каузальності у вигляді рівня довіри до впливу вхідної змінної на результат та достатню умову каузальності у вигляді максимальної можливості впливу значення вхідної змінної на результат інтелектуальної системи. Модель дає можливість сформувати каузально-орієнтоване пояснення на основі зв'язку вхідної змінної і отриманого результату в умовах неповноти знань модель щодо стану інтелектуальної системи.

**Ключові слова:** інтелектуальна інформаційна система, пояснення, причинно-наслідковий зв'язок, каузальна залежність, когнітивна діяльність.

### Вступ

Сучасні інтелектуальні системи широко використовуються для підтримки рішень при вирішенні складних задач пошуку інформації, страхування, лікування, у банківській та військовій справі, тощо.

Використання в інтелектуальних системах непрозорих алгоритмів, що базуються на машинному навчанні, забезпечує формування комплексних результатів, які не завжди є зрозумілими для користувачів таких систем. Непрозорість результатів, у свою чергу, може породжувати сумніви та недовіру користувачів до рішень інтелектуальної системи, і, як наслідок, обмежувати реальне використання останніх.

Тому прозорість та зрозумілість рішень в цих системах є важливою умовою їх широкого практичного застосування [1, 2].

Зрозумілість рішень для користувачів систем штучного інтелекту забезпечується використанням пояснень [3].

Пояснення розглядається в двох аспектах: як кінцевий продукт та як процес.

Пояснення як кінцевий продукт представляє користувачеві необхідну інформацію для розуміння прийнятих інтелектуальною інформаційною системою рішень. Фактично таке пояснення встановлює зв'язки між вхідною інформацією та виходом інформаційною системою. Побудова такого пояснення базується на представленні системи у вигляді чорного ящика.

Тобто інформація щодо внутрішніх станів системи у даному випадку є неповною або відсутньою.

Задача формування пояснення як кінцевого продукту полягає у визначенні каузальних залежностей між вхідними змінними та отриманим результатом.

Дана задача вирішується в умовах невизначеності щодо конкретної реалізації процесу прийняття рішення в інтелектуальній системі [4, 5].

Пояснення як процес включає в себе послідовність кроків, що обґрунтовують, як система прийшла до поточного рішення. Цей підхід потребує інформації щодо внутрішніх станів інтелектуальної системи.

В загальному випадку пояснення як процес не завжди орієнтовано на обґрунтування отриманого результату.

Даний підхід зв'язує дії із прийняття рішення, встановлюючи залежності між ними.

Таким чином, пояснення має представити каузальну залежність або послідовність каузальних залежностей, що обґрунтовують зв'язок між входом та виходом інтелектуальної системи в умовах неповноти інформації щодо станів системи у процесі прийняття рішення.

Сучасні підходи до побудови пояснення було сформовано в рамках програми Explainable Artificial Intelligence [6].

Такі підходи вирішують дві задачі: моделювання сприйняття пояснень людиною та побудова пояснень.

В рамках вирішення першої задачі визначаються особливості та принципи побудови пояснень людиною у процесі пізнання навколишнього світу [6, 7].

При вирішенні другої задачі згідно визначених раніше принципів розробляються методи побудови пояснень.

Пояснення базуються або на безпосередній інтерпретації процесу прийняття рішення [4, 8], або на явному чи неявному представленні темпоральних [9- 11] та каузальних [12, 13] залежностей, що пов'язують вхідні дані та результат із знаннями щодо використання отриманого рішення, а також використовують порівняння із альтернативами [6, 14].

Однак існуючі підходи не приділяють достатньо уваги побудові каузальних залежностей в умовах невизначеності, при багатоваріантності можливих рішень і, відповідно, багатоваріантності пояснень щодо цих результатів.

В той же час, при представленні інтелектуальної системи у вигляді чорного ящика, пояснення оперує із множиною вхідних змінних, значення яких впливають на результат.

Тому актуальною є задача побудови таких каузальних зав'язків, які враховують можливості впливу кожного значення змінної на отриманий інтелектуальною системою результат.

**Метою статті** є побудова моделі причинно-наслідкових зав'язків для побудови пояснень в умовах невизначеності щодо станів інтелектуальної інформаційної системи, якщо остання представляється у вигляді чорного ящика.

Для досягнення поставленої мети вирішуються такі задачі:

- структуризація пояснення з урахуванням особливостей когнітивної діяльності людини;
- формування необхідної та достатньої умови щодо каузальної залежності як складової пояснення з використанням теорії можливостей;
- розробка можливісної моделі каузальної залежності для одної вхідної змінної, яка враховує невизначеність щодо станів інтелектуальної системи.

## Структуризація пояснення як елементу когнітивної діяльності

Моделювання пояснення в умовах невизначеності базується на виділенні його властивостей як елементу когнітивної діяльності людини.

Згідно досліджень у сфері когнітивної психології, пояснення є невід'ємною складовою процесу пізнання.

Останній містить такі ключові фази:

- отримання / сприйняття інформації;
- обробка й зберігання інформації та знань;
- використання інформації та знань.

На першій фазі зовнішня інформація трансформується у внутрішнє представлення.

На другій фазі інформація перетворюється в знання, які визначають залежності між отриманими на першій фазі даними.

На даній фазі для розуміння сутності вхідної інформації шляхом встановлення залежностей між елементами даних використовуються пояснення.

На третій фазі отримані та збережені знання використовуються для прийняття рішень та вибору відповідних дій.

Виходячи з представленої структуризації процесу пізнання, останній представляє собою процес отримання, сприйняття, розуміння, зберігання, пошуку, обробки та використання інформації й знань людиною.

Тому пояснення забезпечує здатність людини отримувати, обробляти інформацію й знання та приймати й реалізовувати відповідні рішення. Використання пояснень у процесі пізнання створює умови для осмислення навколишнього світу, а також формування знань і поведінки людини.

Відповідно, пояснення відіграє одну з ключових ролей при відкритті нових знань та є важливим елементом розуміння об'єктів або явищ у предметній області [15].

Дослідження в сфері когнітивної психології встановлюють зв'язок між пізнанням та поясненнями у двох аспектах: концептуальному та тлумачному. Відмінності цих аспектів пояснення представлено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння структурних елементів пояснення як складової когнітивної діяльності людини

Аспект пояснення	Структурні елементи пояснення	Відмінності та вимоги
Концептуальний, що базується на відповідності пояснення фоновим знанням людини	Концепція пояснення як залежність між вхідними даними	Використовується набір допустимих пояснень; відбирається пояснення з цього набору, що відповідає фоновим знанням
	Базові (фонові) знання щодо предметної області	Потребує постійного уточнення системи базових знань
Тлумачний, що використовує порівняння властивостей екземплярів вхідних даних	Інформація про властивості вхідних об'єктів	Встановлюється типовість, різноманітність та подібність властивостей об'єктів
	Причинно-наслідкові зв'язки для категоризації об'єктів	Відбирається «найкраще» пояснення

У першому аспекті пізнання людини розглядається як процес побудови концептуальних представлень навколишнього світу. В даному аспекті пояс-

нення є основою навчання та міркувань і, відповідно, умовою побудови концепцій щодо поточної предметної області.

Зокрема, в роботі [15] при розгляді сприйняття концепцій людьми показано, що необхідною умовою для розуміння предметів та явищ є відповідність концепцій базовим (або фоновим) знанням людей щодо навколишнього світу. Така відповідність дає можливість обґрунтувати кожну концепцію шляхом використання одного із набору допустимих пояснень. Розвиток таких концепцій базується на побудові та реструктуризації системи знань людини [16].

У другому аспекті ключова увага приділяється «тлумачному» мисленню, заснованому на побудові каузальних залежностей при порівнянні властивостей вхідних об'єктів у процесі категоризації знань. Безпосередньо категоризація відбувається згідно найкращого пояснення [17].

Проведені в роботі [17] експерименти показали, що використання причинно-наслідкових пояснень при категоризації дає можливість врахувати типовість, різноманітність та подібність властивостей вибраних категорій. Також узагальнення категорій містить ознаки причинно-наслідкових зв'язків.

Тобто в даному аспекті досліджується пізнання на основі побудови причинно-наслідкових зв'язків, що пояснюють відому послідовність подій і є упорядкованими у часі.

Таким чином, в концептуальному аспекті пояснення розкривають зв'язки між новими концепціями та існуючими знаннями щодо предметної області, що дає можливість обґрунтувати нові концепції та інтегрувати їх із існуючими знаннями. В тлумачному аспекті пояснення забезпечує категоризацію вхідної інформації на основі використання каузальних залежностей, що задають причинно-наслідкові зв'язки між властивостями вхідних об'єктів та категоріями цих об'єктів.

В обох випадках виконується вибір найкращого пояснення із множини можливих на основі їх відповідності фоновим знанням про предметну галузь або ж знанням щодо властивостей та категоризації об'єктів.

В цілому можна зробити висновок, що пояснення задають причинно-наслідкові зв'язки між елементами знань людини в умовах невизначеності щодо знань про предметну область в цілому або про окремі об'єкти в рамках предметної області. Тобто пояснення через визначають причини для наслідків, що розглядаються людиною. Такий каузальний зв'язок може бути встановлено [18]:

– шляхом відповіді на питання типу як або чому було отримано поточний результат (стан, рішення, тощо)?;

– як судження, яке деталізує, чому отримано той чи інший результат;

– безпосередньо через схему причини-наслідки.

Також при формуванні пояснень розділяють представлення пояснення як важливого для людини результату, що може бути оціненою людиною, та пояснення як процес [19].

Пояснення як результат це правило, що визначає причини отриманого рішення. Тобто пояснення

як результат становить безпосередню цінність для людини і людина робить оцінку цього пояснення.

Пояснення як процес це когнітивна діяльність, яка формує пояснення як результат. В рамках діяльності може бути сформовано одне або декілька пояснень - результатів.

Таким чином, пояснення в когнітивній діяльності людини базується на множині залежностей, що пов'язують відому вхідну інформацію, знання людини про предметну область, а також рішення, що ця людина приймає. З цією множини залежностей формується каузальна залежність, яка і є основою для результуючого тлумачення. В умовах невизначеності попередньо необхідно сформулювати необхідну й достатню умови, що обумовлюють можливість побудови такої залежності.

### Можливісна модель каузальної залежності як основи пояснення в інтелектуальній системі

Пояснення щодо результату інтелектуальної системи є узагальненням послідовності причинно-наслідкових зв'язків, що відображають процес його отримання, і пов'язує властивості вхідних даних із отриманим в інтелектуальній системі рішенням.

Пояснення на основі властивостей вхідних даних визначає, в якій мірі значення кожної із вхідних змінних впливає на отримане в системі рішення.

Розглянемо визначення необхідної й достатньої умов для каузальної залежності, що визначає пояснення щодо результату, для однієї вхідної змінної. Дана змінна  $X = \{x_i\}$  має множину можливих значень  $x_i$ .

Оскільки при формуванні пояснення щодо результату інтелектуальна інформаційна система представляється у вигляді «чорного ящика», то інформація щодо внутрішніх станів цієї системи є недоступною.

Відповідно, вплив кожного із вхідних значень на кінцевий результат інтелектуальної інформаційної задається через нормовану оцінку

$$0 \leq \pi(x_i) \leq 1.$$

На практиці оцінка  $\pi(x_i)$ , як правило, відображає ймовірність використання значення  $x_i$ .

Але в загальному випадку дана оцінка є функцією, що відображає множину значень  $x_i$  на інтервал  $[0,1]$ .

Зокрема, якщо при формуванні пояснення щодо запропонованого рекомендаційною системою ноутбука змінна  $X$  містить значення типів та поколінь процесора цього ноутбука, то оцінка  $\pi(x_i)$  може задавати ймовірність вибору ноутбуків різних моделей саме з визначеним процесором  $x_i$ .

Очевидно, що в ситуації, коли у рекомендованому комп'ютері є процесор, який найчастіше фігурував у інших куплених ноутбуках, пояснення може спиратись на модель цього процесора.

Тобто пояснення спирається на відмінності у властивостях елементів категорії «процесори», що відповідає розглянутому вище тлумачному аспекту пояснення у когнітивному процесі людини.

Наприклад, пояснення в рекомендаційній системі на основі моделі процесора задає відмінності для множини процесорів, які були використані у куплених раніше комп'ютерах:

$$\{x_1 = i7\_13\text{покоління}, x_2 = i7\_12\text{покоління}, \\ x_3 = i7\_11\text{покоління}, x_4 = i7\_10\text{покоління}\}$$

в тому випадку, якщо рекомендований список містить комп'ютерів упорядковується з урахуванням моделі процесора за показником  $\pi(x_i)$ .

Однак, при наявності у користувача рекомендаційної системи додаткових структурованих знань щодо елементів комп'ютерної техніки, таке пояснення може враховувати і концептуальний аспект пояснення.

Наприклад, при появі у рекомендованому списку комп'ютера з процесором

$$i7\_11\text{покоління}$$

та додаткових знаннях користувача щодо достатньо високої потужності, раннього року випуску й, відповідно, помірної ціни даного процесора, пояснення на основі моделі процесора обґрунтовує концепцію прагматичного вибору:

«потужний комп'ютер за розумну ціну».

Таким чином, пояснення визначає можливість рекомендації комп'ютера з на основі значення  $x_i$ .

Такий підхід передбачає одночасне використання множини значень  $\{x_i\}$  для визначення можливісного опису пояснення.

Зазначене свідчить про актуальність використання теорії можливостей для формування необхідної й достатньої умови для каузальної залежності між вхідною змінною і отриманим в системі рішенням.

Розглянемо формально можливісну оцінку вхідної змінної  $\pi(x_i)$  з урахуванням темпорального фактору:

– множина  $X$  складається із підмножин  $X_j$ , які визначають всі можливі значення змінної на різних інтервалах часу  $T_j$ :

$$X_j = \{x_{j,i}\} \subseteq X : \forall j \exists T_j = [t_j^{beg}, t_j^{end}], \quad (1)$$

– інтервали часу  $T_j$  в загальному випадку перетинаються:

$$(\forall m \neq j) T_j \cap T_m \neq \emptyset, \quad (2)$$

– ідентичні значення  $x_{j,i}$  можуть зустрічатись на різних інтервалах і належати різним підмножинам  $X_j$ :

$$(\exists m \neq j) : x_{j,i} = x_{m,i}. \quad (3)$$

Розподіл оцінок  $\pi(x_i)$  для кожної множини  $X_j$  має вигляд:

$$P_j = \{\pi(x_{j,1}) \geq \pi(x_{j,2}) \geq \dots \geq \pi(x_{j,i})\}. \quad (4)$$

Можливість  $\Pi_j$  для кожної підмножини  $X_j$  визначається як її верхня грань:

$$\Pi_j = \sup_i \pi(x_{j,i}). \quad (5)$$

Можливісна оцінка  $\Pi$  для множини  $X$  визначається як відображення сукупності можливих підмножин  $X_j$  на інтервал  $[0,1]$ :

$$\Pi : \{X_j\} \rightarrow [0,1]. \quad (6)$$

за умов:

$$\Pi(\emptyset) = 0, \\ \Pi\left(\bigcup_j X_j\right) = \sup_i \Pi(X_i). \quad (7)$$

Каузальна залежність має встановлювати зв'язок між значенням вхідної змінної та отриманим в інтелектуальній системі результатом.

Згідно (7), чим вище значення можливості, тим більше ймовірність використання відповідного значення  $x_{j,i}$ , такого що:

$$x_{j,i} : \forall (j, i \neq m) \pi(x_{j,i}) \geq \pi(x_{j,m}). \quad (8)$$

Тоді достатня умова для наявності каузальної залежності між значенням  $x_{j,i}$  та отриманим результатом полягає в тому, щоб значення  $\pi(x_{j,i})$  на поточному інтервалі часу  $T_j$  було максимальним:

$$\Pi(X_j) = \max_i \pi(x_{j,i}). \quad (9)$$

Згідно (9), достатня умова визначається лише для поточної підмножини  $X_j$ , тобто для актуальних на поточному інтервалі  $T_j$  даних.

Необхідна умова для наявності каузальної залежності з використанням теорії можливостей пов'язана із довірою до того, що значення вхідних даних впливають на отриманий в інтелектуальній системі результат.

Така довіра визначається тим, як часто (з якою оцінкою) була використані значення даної змінної для отримання результату.

Наприклад, як часто в найгіршому випадку були використані дані про процесор для побудови персоналізованого переліку комп'ютерів в рекомендаційній системі.

Ця умова може бути сформована з використанням оцінки необхідності  $N$  в теорії можливостей.

Дана оцінка на множині можливих підмножин  $X_j$  визначається наступним чином.  $N$  є відображенням елементів можливих підмножин  $X_j$  на інтервал  $[0,1]$ :



$$T : \{X_j\} \rightarrow [0,1]. \quad (10)$$

за умов:

$$N(\emptyset) = 0, \\ N\left(\bigcap_j X_j\right) = \inf_i N\left(\bigcap_j X_j\right) \Big| \bigcap_j X_j \neq \emptyset. \quad (11)$$

Згідно (11), оцінка необхідності задається для перетину відомих підмножин  $X_j$ . Такий підхід при побудові пояснення дає можливість врахувати історію значень змінних для отримання результату в інтелектуальній системі.

Вираз (11) свідчить про те, що рівень довіри можливого каузального зв'язку визначається через мінімальне значення показника  $\pi(x_{j,i})$  за умови, що значення  $x_{j,i}$  було використано на поточному інтервалі  $T_j$ , тобто дане значення є актуальним.

Тоді для каузальної залежності необхідно, щоб рівень довіри для поточної підмножини значень  $X_j$  був більшим, ніж оцінка необхідності, тобто рівень довіри до всіх відомих підмножин. Відповідно, необхідна умова має вигляд:

$$(\forall i) \pi(x_{j,i}) \geq N\left(\bigcap_j X_j\right). \quad (12)$$

З урахуванням необхідної (12) та достатньої (9) умов каузальності, можливісна модель каузальної залежності пов'язує результат  $Y$  інтелектуальної системи із значенням вхідної змінної  $x_{j,i}$  таким чином:

$$C(x_{j,i}, Y) = true \\ iff \\ 1. (\forall i) \pi(x_{j,i}) \geq N\left(\bigcap_j X_j\right), \quad (13) \\ 2. \pi(x_{j,i}) = \Pi(X_j).$$

Семантика представленої моделі полягає у виділенні максимально можливого (найбільш ймовірного) значення  $x_{j,i}$  вхідної змінної за умови, довіри до змінної.

Остання полягає в тому, що найменша ймовірність вибору значення  $x_{j,i}$  цієї змінної на поточному інтервалі  $T_j$  перевищує мінімальну ймовірності цього значення на попередніх інтервалах часу.

Наприклад, якщо значення

$$x_{j,2} = i7\_12покоління$$

процесору має найбільшу ймовірність  $\pi(x_{j,i})$  за умови, що для всіх інших значень цього процесору

$$x_{j,1} = i7\_13покоління,$$

$$x_{j,3} = i7\_11покоління,$$

$$x_{j,4} = i7\_10покоління$$

поточна ймовірність вибору комп'ютеру вища, ніж на всіх попередніх інтервалах  $T_{j-1}, T_{j-2}, \dots$

## Висновки

Виконано структурування пояснення як елементу когнітивної діяльності людини. Показано, що пояснення може бути сформовано на основі порівняння вхідної інформації із існуючою системою знань людини, або ж на основі порівняння інформації щодо властивостей вхідних об'єктів.

Запропоновано можливість необхідна та достатня умови для каузальної залежності на базі однієї вхідної змінної, що лежить в основі пояснення.

Необхідна умова задає рівень довіри до залежності між вхідною змінною та отриманим результатом. Дана умова визначається на основі порівняння мінімальної ймовірності використання довільного значення вхідної змінної для отримання результату у поточній підмножині значень та у всіх можливих підмножинах значень.

Тобто необхідна умова показує, що дана змінна є суттєвою для отримання результату в інтелектуальній системі.

Достатня умова визначається через можливість оцінку значення змінної. Тобто дана умова показує, що представлене значення є найбільш ймовірною умовою отримання результату в інтелектуальній системі.

Запропоновано модель можливої каузальної залежності для побудови пояснення в інтелектуальній системі.

Дана залежність визначається через можливість необхідну й достатню умови наявності каузального зв'язку, що дає можливість сформувати каузально-орієнтоване пояснення щодо зв'язку вхідної змінної і отриманого результату в умовах неповноти знань щодо стану інтелектуальної системи.

Подальший розвиток даного підходу пов'язаний із визначенням каузальної залежності для декількох вхідних змінних з тим, щоб отримати упорядковане представлення щодо впливу цих змінних на отриманий в інтелектуальній системі результат.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Engelbrecht Andries P. *Computational Intelligence: An Introduction*. NJ: John Wiley & Sons, 2007. 632 p.
- Castelvecchi D. (2016), "Can we open the black box of AI?" *Nature*, Vol. 538 (7623), pp. 20-23.
- Miller T. (2019), "Explanation in artificial intelligence: Insights from the social sciences", *Artificial Intelligence*, vol. 267, pp.1-38, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.artint.2018.07.007>
- Q. Zhang, Y. Nian Wu, S.-C. Zhu, Interpretable convolutional neural networks, *IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*. 2018. pp. 8827–8836.
- Chalyi, S., Leshchynskyi, V., Leshchynska, I. (2019). Method of forming recommendations using temporal constraints in a

- situation of cyclic cold start of the recommender system. EUREKA: Physics and Engineering, 4, 34–40. doi: <https://doi.org/10.21303/2461-4262.2019.00952>. Available at: <http://eu-jr.eu/engineering/article/view/952/934>.
6. Adadi, A., Berrada, M. (2018) Peeking inside the black-box: a survey on explainable artificial intelligence (XAI). IEEE Access 6, 52138–52160.
  7. Isaac Lage, Emily Chen, Jeffrey He, Menaka Narayanan, Been Kim, Samuel J Gershman, Finale Doshi-Velez. (2019) Human evaluation of models built for interpretability. In Proceedings of the AAAI Conference on Human Computation and Crowdsourcing, vol.7, pp 59–67.
  8. Gunning i D. Aha, (2019) “DARPA’s Explainable Artificial Intelligence (XAI) Program”, AI Magazine, Vol. 40(2), pp.44–58, doi: 10.1609/aimag.v40i2.2850.
  9. Chalyi, S., Leshchynskiy, V. (2020). Method of constructing explanations for recommender systems based on the temporal dynamics of user preferences. EUREKA: Physics and Engineering, 3, 43-50. doi: 10.21303/2461-4262.2020.001228. Available at: <http://journal.eu-jr.eu/engineering/article/view/14>.
  10. Чалий С. Ф. Реляційно-темпоральна модель набору сутностей предметної області для процесу формування рішення в інтелектуальній інформаційній системі / С. Ф. Чалий, В. О. Лещинський, І. О. Лещинська // Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", 2022. – № 1 (7). – С. 84-89.
  11. Чалий С.Ф., Лещинський В.О., Лещинська І.О. Декларативно-темпоральний підхід до побудови пояснень в інтелектуальних інформаційних системах. Вісник Нац. техн. ун-ту "ХПІ": зб. наук. пр. Темат. вип. Системний аналіз, управління та інформаційні технології. Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 51-56.
  12. Halpern J. Y., Pearl J. Causes and explanations: A structural-model approach. Part I: Causes. *The British Journal for the Philosophy of Science*. 2005. № 56 (4). P. 843-887.
  13. Chalyi S., Leshchynskiy V. Temporal representation of causality in the construction of explanations in intelligent systems. *Advanced Information Systems*. Kharkiv: NTU "KhPI"2020. Vol. 4, № 3. P. 113-117.
  14. Чалий С. Ф., Лещинський В. О., Лещинська І. О. (2021) Контрфактуальна темпоральна модель причинно-наслідкових зв'язків для побудови пояснень в інтелектуальних системах,/ Вісник Національного технічного університету "ХПІ". Сер. : Системний аналіз, управління та інформаційні технології = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Ser. : System analysis, control and information technology : зб. наук. пр. – Харків : НТУ "ХПІ", № 2 (6), С. 41-46.
  15. Murphy, G. L., & Medin, D. L. (1985). The role of theories in conceptual coherence. *Psychological Review*, 92(3), 289–316. <https://doi.org/10.1037/0033-295X.92.3.289>
  16. Carey, S. (1985). *Conceptual change in childhood*. Cambridge, MA: MIT Press.
  17. Rips, L. J. (1989). Similarity, typicality, and categorization. In S. Vosniadou & A. Ortony (Eds.), *Similarity and analogical reasoning* (pp. 21–59). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511529863.004>
  18. Thagard, P. (2006). Evaluating explanations in science, law, and everyday life. *Current Directions in Psychological Science*, 15, 141–145.
  19. Chin-Parker S, Bradner A. A contrastive account of explanation generation. *Psychon Bull Rev*. 2017 Oct;24(5):1387-1397. doi: 10.3758/s13423-017-1349-x. PMID: 28762030.

Received (Надійшла) 12.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 23.08.2023

### A possibility-based model of causal relation for input variable in explanation construction within an intelligent system

Serhii Chalyi, Volodymyr Leshchynskiy

**Abstract.** The **article’s subject matter** is the processes of constructing explanations for the decisions made by an intelligent information system. The **goal** is to build a model of causal relationships for explanation construction under conditions of uncertainty regarding the states of the intelligent information system, especially when it is considered as a black box. **The tasks:** structuring explanations considering the specifics of human cognitive activity; establishing necessary and sufficient conditions for causal dependence as a component of explanations using possibility theory; developing a possibility model of causal dependence for a single input variable that considers the uncertainty regarding the states of the intelligent system. **The used approaches:** approaches to explanation construction in human cognitive activity and approaches to explanation construction in explainable artificial intelligence. The obtained **results** are as follows: explanations have been structured as an element of human cognitive activity. It has been demonstrated that explanations can be represented in two aspects: conceptual, through comparing input information with the existing human knowledge system; interpretive, through comparing the properties of input objects. Possibility-based necessary and sufficient conditions for causal dependence based on a single input variable, which forms the basis of explanation, have been proposed. A possibility model of causal dependence for explanation construction in an intelligent system has been suggested. **Conclusions.** The scientific novelty of the obtained results lies in the following: a possibility model of causal dependence between an input variable and the outcome of an intelligent system's operation has been proposed, which combines the necessary condition of causality in the form of confidence level in the impact of the input variable on the outcome and the sufficient condition of causality in the form of the maximum possible influence of the input variable's value on the outcome of the intelligent system. The model enables the formation of causal-oriented explanations based on the connection between the input variable and the obtained result in conditions of incomplete knowledge regarding the state of the intelligent system.

**Keywords:** intelligent information system, explanation, causal relationship, causal dependence, cognitive activity.

А. С. Янко<sup>1</sup>, В. А. Краснобаєв<sup>2</sup>, П. С. Сабельнікова<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національний університет «Полтавська політехніка ім. Ю.Кондратюка», Полтава, Україна

<sup>2</sup> Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, Україна

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ НАДІЙНОСТІ КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМ, ФУНКЦІОНУЮЧИХ В МОДУЛЯРНІЙ СИСТЕМІ ЧИСЛЕННЯ ПО ОСНОВІ ВИКОРИСТАННЯ ПРИНЦИПУ ПАСИВНОЇ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ

**Анотація.** Проведений аналіз стану та перспектив розвитку сучасних комп'ютерних систем (КС) показав, що проблема підвищення відмовостійкості, що є основою надійності, не може бути ефективно вирішена по основі використання традиційної двійкової позиційної системи числення без погіршення інших техніко-економічних показників КС. Отримані в результаті проведених досліджень та попередні позитивні результати показують перспективність використання модулярної системи числення (МСЧ) для підвищення відмовостійкості і надійності КС. Як основний показник для оцінки надійності функціонування КС запропоновано використовувати можливість безвідмовної роботи. З використанням формалізованої моделі відмовостійкості КС була досліджена та отримана математична модель надійності КС, функціонуючих в МСЧ, на основі використання принципу пасивної відмовостійкості. Дослідження моделі показало, що зі збільшенням кратності резервування надійність КС у МСЧ (з двома контрольними основами) підвищується до 25% порівняно з потроєною КС, яка використовує двійкову позиційну систему числення.

**Ключові слова:** ймовірність безвідмовної роботи, математична модель, модулярна система числення, надійнісна модель, комп'ютерна система, пасивна відмовостійкість.

### Вступ

Аналіз методів і алгоритмів вирішення завдань обробки інформації системами, функціонуючими у позиційній системі числення, показав, що на сучасному рівні розвитку інформаційних технологій застосування таких систем не може повністю забезпечити виконання зростаючих вимог щодо надійності, висунуті до комп'ютерних систем (КС). Внаслідок цього виникає завдання пошуку перспективних шляхів удосконалення КС, одним із яких є використання нетрадиційних систем числення адаптивних до класу завдань, які вирішуються КС. Як показали дослідження в цьому напрямку, однією з таких систем числення може бути непозиційна модулярна система числення (МСЧ) [1]. Обґрунтуємо можливість використання МСЧ для створення надійних та відмовостійких КС.

Розробка математичної моделі відмовостійкості функціонування КС у МСЧ, що дозволяє визначити та розробити методи підвищення відмовостійкості КС, без зниження продуктивності обробки інформації та синтезувати відмовостійкі структури, що дозволяють досягти максимального значення відмовостійкості КС за умови виконання заданих обмежень. Необхідно відзначити, що під відмовами КС в МСЧ будуть розумітися як несправність обладнання (елементів та компонент КС) так і збої в роботі трактів обробки інформації (ТОІ), що ведуть до появи помилок та спотворення інформації.

**Метою статті** є розробка математичної моделі надійності функціонування КС у МСЧ по основі використання принципу пасивної відмовостійкості.

### Структурна схема надійнісної моделі КС в МСЧ

Збільшення надійності КС, функціонуючої в МСЧ, засноване на використанні пасивної адаптації (без перебудови структури КС у процесі функціону-

вання), передбачає реалізацію сукупності методів, алгоритмів, дій та операцій, спрямованих на забезпечення відмовостійкості КС.

Як основний показник для оцінки надійності функціонування КС запропоновано використовувати ймовірність безвідмовної роботи  $P(t)$ .

Виходячи з властивостей МСЧ (незалежності, малорозрядності та рівноправності залишків) [2] ймовірність безвідмовної роботи КС в МСЧ можна представити як ймовірність безвідмовної роботи КС у ПСЧ для випадку ковзного резервування з навантаженим резервом (рис. 1).

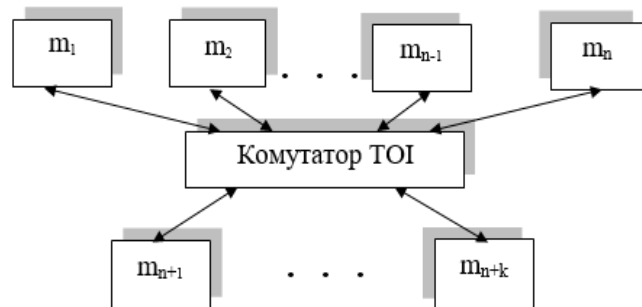


Рис. 1. Структурна схема надійності КС в МСЧ

Дійсно, по-перше, будь-який інформаційний ТОІ КС, що відмовив, по основі  $m_i$  ( $i = l, n$ ) може бути замінений на будь-який справний контрольний ТОІ КС по основі

$$m_j \left( j = \overline{n+l, n+k} \right); m_i < m_j,$$

де  $n$  і  $k$  – відповідно кількість інформаційних та контрольних основ МСЧ; по-друге, всі тракти КС, як інформаційні, так і контрольні, одночасно, незалежно й однаково беруть участь у обробці інформації.

Подана на рис. 1 структурна схема, відповідає надійнісній моделі КС в МСЧ з  $n$  інформаційними і

$k$  контрольними незалежними трактами. Комутатор здійснює контроль функціонування ТОІ і перемикає трактив, що відмовили на працездатні. Розглянемо, як, використовуючи запропоновану надійнісну модель, можна розрахувати ймовірність безвідмовної роботи КС в МСЧ.

Нехай задана впорядкована  $(m_i < m_i + 1)$  МСЧ набором взаємно попарно простих чисел  $m_1, m_2, \dots, m_n, m_{n+1}, \dots, m_{n+k}$ , де  $n$  і  $k$  відповідно кількість інформаційних та контрольних основ, а кратність МСЧ визначиться величиною  $k/n$ .

У цьому випадку формула для визначення ймовірності безвідмовної роботи КС у МСЧ набуде вигляду виразу:

$$P_{МСЧ}^{(k)}(t) = \sum_{i=0}^k C_{k+n}^i P_1^{k+n-i}(t) \sum_{j=0}^i (-1)^j C_i^j P_1^j(t), \quad (1)$$

де  $P_1(t) = e^{-\lambda_{ТОІ}t}$  – ймовірність безвідмовної роботи ТОІ з найбільшої (найменш надійної) основи  $m_{n+k}$  МСЧ;  $\lambda_{ТОІ}$  – інтенсивність відмов обладнання ТОІ в МСЧ з найбільшої основи  $m_{n+k}$ .

Співвідношення (1) може бути використане для розрахунку ймовірності безвідмовної роботи КС у МСЧ при наступних припущеннях:

- відмови трактив КС підпорядковані експоненціальному розподілу;
- комутуючий пристрій ідеальний (тобто ймовірність безвідмовності роботи комутатора дорівнює одиниці);
- інформаційні (ІТОІ) та контрольні трактив обробки інформації (КТОІ) КС рівнонадійні, тобто ймовірність безвідмовної роботи всіх трактив КС приймається рівною ймовірності безвідмовної роботи  $P_1(t)$  тракту КС за найбільшої основи МСЧ  $m_{n+k}$ , що має найменшу ймовірність безвідмовної роботи [4];

– не враховується можливість відновлення трактив КС, що відмовили, в МСЧ.

Зазначимо, що реальна надійність КС у МСЧ буде вищою, ніж та, що визначається співвідношенням (1), оскільки дана формула не враховує можливість заміни одним контрольним трактом по основі  $m_j$  одного або одночасно кількох непрацездатних інформаційних трактив за умови:

$$m_j \geq \prod_{i=1}^q m_{k_i}, \quad (2)$$

де  $q$  – максимальна кількість робочих трактив, що одночасно замінюються, одним контрольним працездатним трактом по основі  $m_j$ .

Проведемо порівняльний аналіз надійності потроєної позиційної КС з ідеальним мажоритарним елементом та КС у МСЧ з ідеальним комутатором з безвідмовності, застосовуючи розглянуту надійнісну модель. Позначимо через  $\lambda_l$  інтенсивність відмов обладнання, віднесена до одного двійкового розряду (до одиниці розрядної сітки КС) [5]. В цьому випад-

ку ймовірність безвідмовної роботи обладнання, віднесена до одного двійкового розряду дорівнює:

$$P_l(t) = e^{-\lambda_l t}. \quad (3)$$

Для позиційної  $l$ -байтової КС ймовірність безвідмовної роботи дорівнює:

$$P_0(t) = e^{-\lambda_0 t}, \quad (4)$$

де  $\lambda_0 = 8l\lambda_l$ .

Відомо, що ймовірність безвідмовної роботи для потроєної мажоритарної структури, що містить три КС та ідеальний мажоритарний елемент, дорівнює [3]:

$$P_M(t) = 3P_0^2(t) - 2P_0^3(t) = e^{-16\lambda_l t} (3 - 2e^{-8\lambda_l t}). \quad (5)$$

Для КС в МСЧ ймовірність безвідмовної роботи тракту обробки інформації з довільної основи  $m_i (i = \overline{1, n+k})$  визначається як:

$$P_i(t) = e^{-\lambda_{ТОІ}t} \quad (6)$$

або

$$P_i(t) = e^{-\lambda_l \omega_{n+k} t}, \quad (7)$$

де  $\omega_{n+k} = [\log_2(m_{n+k} - 1)] + 1$ .

Ймовірність безвідмовної роботи КС у МСЧ визначається відповідно до виразу (1).

Нехай  $l=1$  (однобайтова КС) і  $k=1$ . Тоді з урахуванням критерію мінімальності апаратної надмірності КС МСЧ можна подати у вигляді набору наступних основ

$$m_1 = 3, m_2 = 4, m_3 = 5, m_4 = 7, m_5 = 11.$$

При цьому:

$$\prod_{i=1}^4 m_i = 420 > 2^8 = 256, \quad (8)$$

та найбільший спільний дільник (НСД)  $(m_i, m_j) = 1$  для  $i \neq j$ . В цьому випадку співвідношення (1) запишемо у вигляді:

$$P_{МСЧ}^{(1)}(t) = 5P_1^4(t) - 4P_1^5(t) = e^{-16\lambda_l t} (5 - 4e^{-4\lambda_l t}). \quad (9)$$

Позначимо  $\lambda^* = 8\lambda_l$ . При цьому вирази (5) і (9) можна записати:

$$P_M(t) = e^{-2\lambda^* t} (3 - 2e^{-\lambda^* t}). \quad (10)$$

$$P_{МСЧ}^{(1)}(t) = e^{-2\lambda^* t} (5 - 4e^{-0.5\lambda^* t}). \quad (11)$$

У таблиці 1 вміщено значення ймовірності безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda^* t} \quad (12)$$

для нерезервованої однобайтової позиційної КС (I).

Також відповідно до виразів (10) і (11) КС (II), для КС у МСЧ з однією контрольною основою (III) та для КС у модулярній системі числення з двома контрольними основами (IV).

Відповідно до даних табл. 1 на рис. 2 представлені графіки залежностей

$$P(t) = F(*t)$$

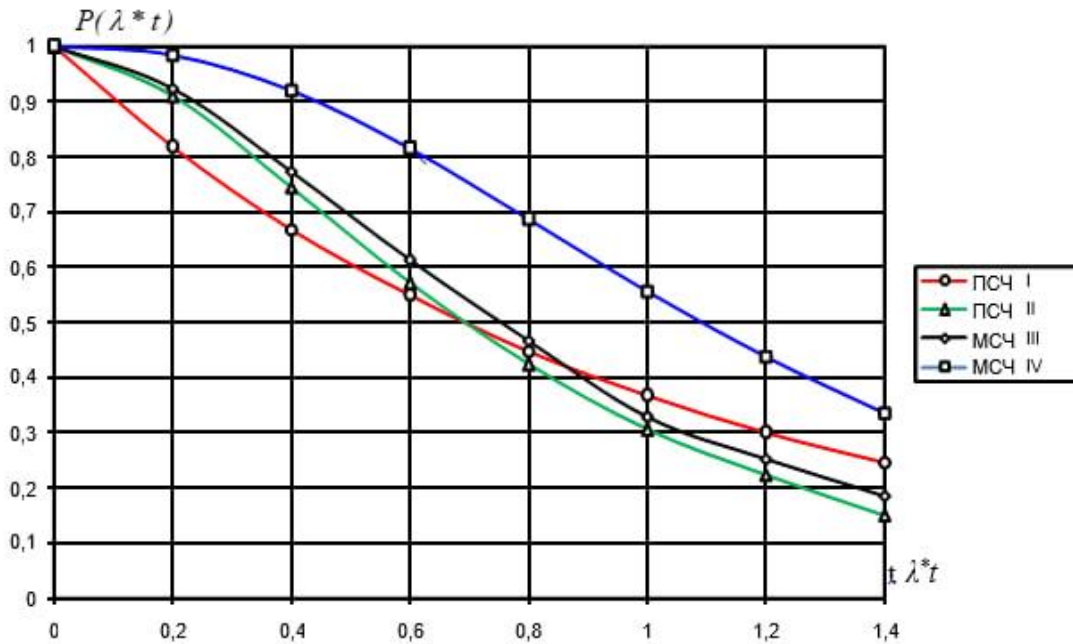


Рис. 2. Графіки залежностей  $P(\lambda^* t)$  КС

Таблиця 1 – Розрахункові дані надійності КС у ПСЧ та МСЧ

$\lambda^* t$	ПСЧ		МСЧ	
	I	II	III	IV
0	1	1	1	1
0,2	0,819	0,912	0,926	0,986
0,4	0,670	0,746	0,775	0,922
0,6	0,549	0,573	0,613	0,816
0,8	0,449	0,424	0,468	0,687
1	0,368	0,306	0,328	0,558
1,2	0,301	0,225	0,254	0,439
1,4	0,247	0,151	0,187	0,337

У табл. 2 представлені, наведені до одного двійкового розряду, деякі дані про додаткову кількість обладнання  $\Delta A$ , необхідного для реалізації розглянутих методів підвищення надійності, які показують, що застосування кодів МСЧ забезпечує високе значення ймовірності безвідмовної роботи ТОІ при меншій кількості додатково введеного обладнання [6].

для однобайтової: нерезервованої (I), триканальної резервованої (II) у позиційній системі числення (ПСЧ) та комп'ютерна система у модулярній системі числення (III) з параметрами  $l = 1, n = 2, k = 1$  і графік залежності для  $k = 2$  (IV).

З даного графіка видно, що комп'ютерна система в модулярній системі числення з двома контрольними основами надійніше потроєної позиційної системи (II) і надійніше комп'ютерна система модулярної системи числення з однією контрольною основою (III).

Таблиця 2 – Розрахункові дані про кількість додаткового обладнання

	ПСЧ		МСЧ	
	I	II	III	IV
Кількість обладнання	8	24	15	19
Додаткове обладнання $\Delta A$	-	200%	87,5%	137,5%

Видно, що комп'ютерна система у модулярній системі числення з однією контрольною основою (III) надійніша, ніж потроєна система в позиційній системі числення (II).

Отже, МСЧ розширює область значень ( $\lambda^* t$ ) при яких існує виграв у порівнянні з нерезервованою позиційною (I) КС у безвідмовності.

Нехай  $k = 2$ .

У цьому випадку МСЧ можна подати у вигляді набору наступних основ:

$$m_1 = 3, m_2 = 4, m_3 = 5, \\ m_4 = 7, m_5 = 11, m_6 = 13.$$

Для даної МСЧ вираз (11) запишемо так:

$$P_{МСЧ}^{(2)}(t) = P_1^4(t) \times \left\{ P_1^2(t) + 6P_1(t)[1 - P_1(t)] + 15[1 - P_1(t)]^2 \right\} \quad (13)$$

або

$$P_{МСЧ}^{(2)}(t) = e^{-2\lambda^*t} \left[ e^{-\lambda^*t} + 15 \left( 1 - e^{-0.5\lambda^*t} \right)^2 + 6e^{-0.5\lambda^*t} \left( 1 - e^{-0.5\lambda^*t} \right) \right]. \quad (14)$$

Таким чином, зі збільшенням кратності резервування надійність КС підвищується, що відповідає загальній теорії надійності.

### Висновки

У статті дано наукове обґрунтування можливості використання МСЧ для створення відмовостій-

ких КС. Показано, що при синтезі КС по основі МСЧ можна отримати якісно нові наукові та практичні результати, що дозволяють покращити основні тактично-технічні характеристики КС (відмовостійкість, надійність тощо) за рахунок можливості організації принципово нової структури КС та застосування нових оригінальних методів та алгоритмів обробки інформації.

Досліджено та отримано, з використанням формалізованої моделі відмовостійкості комп'ютерних систем, математичну модель надійності КС, що функціонує у МСЧ, по основі використання принципу пасивної відмовостійкості. Дослідження моделі показало, що зі збільшенням кратності резервування надійність комп'ютерних систем підвищується, що відповідає загальній теорії надійності, а КС у МСЧ з двома контрольними основами надійніше за потроєна КС використовує позиційну систему числення (до 25%).

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mohan P. V. A. Residue Number Systems: Theory and Applications. Birkhäuser Basel, Switzerland, 2016, 351 p. ISBN-10:331941383X, ISBN-13: 978-3319413839.
2. Krasnobayev V., Kuznetsov A., Yanko A., Koshman S., Zamula A. and Kuznetsova T. Data processing in the system of residual classes. Monograph. ASC Academic Publishing, 2019, 208 p. ISBN: 978-0-9989826-6-3, ISBN: 978-0-9989826-7-0 (Ebook).
3. Krasnobayev V., Kuznetsov A., Kiian A., Kuznetsova K. Fault Tolerance Computer System Structures Functioning in Residue Classes. Proceedings of 2021 11th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems: Technology and Applications (IDAACS), Cracow, 2021, pp. 471-474. doi: 10.1109/IDAACS53288.2021.9660919.
4. Liu R., Li L., Yang, Y. Performance Residual Based Fault Detection for Feedback Control Systems. IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs 68 (2021) 3291-3295. doi:10.1109/TCSII.2021.3062718.
5. Fairclough H. & He, Linwei & Asfaha, Tekle & Rigby, Sam. (2023). Adaptive topology optimization of fail-safe truss structures. Structural and Multidisciplinary Optimization. doi: 66. 10.1007/s00158-023-03585-x.
6. Geng Z., Han M., Bao W., Xie W. New Submodule Topology Based Fault Tolerance for Modular Multilevel Converters. IEEE Transactions on Power Delivery, 2023. pp 1-12. doi: 10.1109/TPWRD.2023.3237891.

Received (Надійшла) 19.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

### Mathematical model of the reliability of the cs operating in the MNS based on the use of the principle of passive fault tolerance

Alina Yanko, Victor Krasnobayev, Polina Sabelnikova

**Abstract.** The analysis of the state and prospects for the development of modern computer systems (CS) showed that the problem of increasing fault tolerance, which is the basis of reliability, cannot be effectively solved based on the use of the traditional binary positional number system without worsening the rest of the technical and economic indicators of the CS. In the positional numeral system (PNS), the execution of an arithmetic operation involves the sequential processing of the digits of operands according to the rules determined by the content of the operation, and cannot be completed until the values of all intermediate results are sequentially determined taking into account all the connections between the digits. Thus, PNSs, in which information is presented and processed in modern computers, have a significant drawback – the presence of inter-bit relations, which impose its imprint on the methods of implementing arithmetic operations, complicate the equipment and limit the speed. The results obtained as a result of the conducted research and previous positive results show the perspective of using the modular number system (MNS) to increase the fault tolerance and reliability of the CS. The use in the CS as a number system of the MNS allows to positively solve the scientific and applied problem of ensuring the fault tolerance of the CS without reducing the user productivity of information processing with significantly less, than in the PNS, the additionally introduced amount of equipment. It is proposed to use the probability of no-failure operation as the main indicator for assessing the reliability of the functioning of the CS. Using a formalized model of fault tolerance of the CS, a mathematical model of the reliability of the CS operating in the MNS was investigated and obtained based on the use of the principle of passive fault tolerance. A mathematical model of CS fault tolerance, which, unlike the known ones, is based on the use of the properties of modular arithmetic, by taking into account the peculiarities of the functioning of information processing paths in the MNS, allows increasing the reliability of the CS. The study of the model showed that with an increase in the multiplicity of redundancy, the reliability of the CS in the MNS (with two control bases) increases to 25% compared to the tripled CS using the positional number system.

**Keywords:** probability of failure-free operation, mathematical model, modular number system, reliability model, computer system, passive fault tolerance.

Ю. О. Андрусенко, Т. Г. Фесенко

Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків, Україна

## ГРІД-ТЕХНОЛОГІЇ В РОЗПОДІЛЕНИХ ОБЧИСЛЮВАЛЬНИХ СЕРЕДОВИЩАХ

**Анотація.** У статті розглянуті сучасні технології, що використовуються у розподілених обчислювальних середовищах. Метою статті є проведення порівняльного аналізу Грід та хмарних технологій та визначення особливостей Грід-технологій. В результаті проведених досліджень визначена різниця між хмарними обчисленнями та Грід-обчисленнями з погляду користувача. Показано, що існують класи завдань, які надають перевагу Грід-технології. Детально розглянуті процеси розподілу ресурсів та обчислень за допомогою Грід-технології. Сформульовані питання, що виникають при використанні GRID технології для планування нестационарних систем. Обґрунтована необхідність та актуальність розробки нових моделей, алгоритмів та стратегій організації планування в Грід.

**Ключові слова:** GRID-технологія, розподілена система, хмарна технологія, розподіл ресурсів.

### Вступ

Розподіл ресурсів у обчислювальних середовищах з кожним роком займає все більш значуще місце. Сфера та рівень їх використання досить розрізнені, наприклад, оптимальний розподіл ресурсів відіграє одну з визначальних позицій при ефективному рішенні прикладних наукових завдань. Але для промислової сфери людської діяльності, розподіл ресурсів теж займає одне з найпріоритетних місць.

Існує багато технологій розподілених обчислень, котрі розподіляють наявні обчислювальні ресурси тим або іншим чином. З початку 21 сторіччя найбільш популярними стали GRID-технології [1–3], після 2007 року все більшу популярність стали завойовувати хмарні технології [4–7]. Останнім часом при реалізації проєктів Інтернету речей та Big Data розробники все частіше почали звертатися до туманних технологій [8–10]. Але дану технологію можна розглядати як прошарок між кінцевими користувачами та хмарою [11]. Але різні задачі потребують використання різних технологій, тобто завжди є завдання оцінки обраної технології. Отже, **метою статті** є проведення порівняльного аналізу Грід та хмарних технологій та визначення особливостей Грід-технологій.

### Результати досліджень

**1. Порівняльний аналіз Грід та хмарних технологій.** З погляду користувача, різниця між хмарними та Грід-обчисленнями полягатиме в такому:

1.1. Хмарні платформи фокусуються на підході «все як сервіс». Грід обчислення фокусуються на проміжному програмному забезпеченні, яке надається у вигляді відкритих вихідних кодів або у вигляді готових пакетів. При цьому платні обчислення є лише однією з форм надання Грід. У порівнянні з цим хмарні обчислення фокусуються виключно на платному наданні інформаційних ресурсів кінцевому користувачеві. При цьому проміжне програмне забезпечення, яке б дозволило забезпечити розробку власної хмари, поки не дуже поширене.

1.2. Грід та хмарні обчислення використовуються для різних типів обчислень. Спочатку Грід обчислення були орієнтовані на вирішення наукових завдань за допомогою суперкомп'ютерних систем. В даний час Грід обчислення більше застосовуються

для науково-дослідних завдань, вирішення яких потребує об'єднання кількох суперкомп'ютерних платформ. З іншого боку, хмарні обчислення орієнтовані більше ні на вирішення окремих завдань, а на перманентне надання певних сервісів кінцевим користувачам. Вони забезпечують динамічний розподіл фізичних ресурсів для того, щоб забезпечити змінне варіюване завантаження сервісів.

1.3. Технології, що розглядаються, мають різні взаємовідносини з постачальниками ресурсів. Грід обчислення ґрунтуються на понятті віртуальних організацій, що включають кілька різних окремих організацій з чіткими правилами взаємодії між ними і чіткими політиками надання програмно-апаратних ресурсів. Концепція хмарних обчислень забезпечує можливість будь-якої компанії використовувати хмарні послуги для вирішення завдань, оплачуючи необхідні ресурси.

1.4. Дані технології мають різні сфери застосування. Грід-платформи надають основу для розгортання обчислювальної інфраструктури. Хмарні обчислення надають інтегрований підхід на всіх рівнях надання інформаційних ресурсів: IaaS, PaaS, SaaS.

1.5. Можливості для розширення кількості інтерфейсів користувача. Грід-обчислення спрямовані на надання різноманітних обчислювальних ресурсів у гетерогенних обчислювальних середовищах для вирішення конкретних завдань. Таким чином, інтерфейси Грід орієнтовані на взаємодію обчислювальних інфраструктур фізично за допомогою API, яким може скористатися тільки професійний програміст. Хмарні обчислення розробляються таким чином, щоб надавати інтерфейси кінцевим користувачам через веб-доступ або через API. На кожному шарі надання послуг (IaaS, PaaS, SaaS) надається власний інтерфейс. Підвищення рівня абстракції дозволяє забезпечити застосування хмарних обчислень як на рівні окремих користувачів, так і на рівні корпоративних клієнтів. Загалом, Грід-обчислення забезпечують об'єднання гетерогенних обчислювальних ресурсів в єдине обчислювальне середовище. Це те, з чого починаються і на чому ґрунтуються хмарні обчислення. Хмарні обчислення забезпечують більш високий рівень абстракції, надаючи обчислювальні ресурси кінцевим користувачам (чи то приватні клієнти чи організації) у вигляді сервісів.

Отже, бачимо, що існують класи задач, орієнтовані як на хмарні технології, так і на Грід-технології.



**2. Розподіл ресурсів та обчислень за допомогою GRID технології.** При доступі, використанні та розподілі ресурсів в нестационарних розподілених гетерогенних обчислювальних середовищах, виникають певні труднощі, це створює додаткову складність для користувачів, постачальників ресурсів та постачальників послуг. Користувачам дані надаються по запиті через Інтернет. Особливо суттєво це у процесі розподілу ресурсів для класу NP-складних задач.

Розглянемо моделі та алгоритми планування виконання обчислювальних робіт за допомогою GRID технології. При плануванні обчислень перш за все необхідно визначити перелік завдань та перелік ресурсів, спираючись на обрані критерії оптимізації. Для цього використовуються два основних підходи: статичний та динамічний. При статичному підході розглядаються характеристики процесорів, операційні системи тощо. Для подолання негативних наслідків розподілу ресурсів в нестационарних розподілених гетерогенних обчислювальних середовищах, використовується саме динамічне планування обчислень, а адаптивний підхід задовольняють GRID технології.

Основне завдання «Грід» – узгоджений розподіл ресурсів та вирішення завдань в умовах динамічних, багатопрофільних віртуальних організацій.

Розподіл ресурсів – це не просто обмін файлами, а прямий доступ до комп'ютерів, програмного забезпечення, даних та інших ресурсів, які потрібні для спільного розв'язання задач.

До основних переваг Грід-технології для розглядаємих завдань можна віднести такі:

- гнучкі механізми розподілу ресурсів;
  - розвинена система контролю використовуваних ресурсів;
    - розподілений доступ до різних ресурсів, починаючи від програм, файлів та
    - даних закінчуючи комп'ютерами, сенсорами та мережами;
    - різні моделі використання ресурсів (від однокористувацьких до розрахованих на багато користувачів, від високопродуктивних до мало витратних), що включають регулювання якості обслуговування, планування, перерозподіл та ведення обліку ресурсів
  - Дослідження та розробки для Грід-середовища призвели до необхідності розробки протоколів, сервісів та інструментарію, спрямованого на:
    - рішення з безпеки, що підтримують управління сертифікацією та
    - політиками безпеки;
    - протоколи управління ресурсами та сервісами, що підтримують безпечний віддалений доступ до обчислювальних ресурсів та ресурсів даних, а також перерозподіл різних ресурсів;
    - протоколи запити інформації та сервіси, що забезпечують налаштування та моніторинг стану ресурсів;
    - сервіси обробки даних, що забезпечують пошук та передачу наборів даних між системами зберігання даних та додатками.
- Кожна з вище перерахованих ітерації проводиться на різних рівнях архітектури Грід-технології (рис. 1).



Рис. 1. Рівні архітектури GRID технології

*На базовому рівні* не визначаються служби, що забезпечують безпосередній доступ до ресурсів, використання яких розподілено за допомогою протоколів GRID.

1. Обчислювальні ресурси надають користувачеві GRID технології процесорні потужності. Обчислювальними ресурсами можуть бути як кластери, такі окремі робочі станції. Будь-яка обчислювальна система може розглядатися як потенційний обчислювальний ресурс GRID технології.

2. Ресурси пам'яті представляють собою простір для зберігання даних. Для доступу до ресурсів пам'яті використовується програмне забезпечення проміжного рівня, що реалізує уніфікований інтерфейс управління та передачі даних.

3. Інформаційні ресурси і каталоги є особливим видом ресурсів пам'яті. Вони служать для зберігання та надання метаданих та інформації про інші ресурси.

4. Мережний ресурс є сполучною ланкою між розподіленими ресурсами Грід-системи. Основною

характеристикою мережного ресурсу є швидкість передачі даних.

**Зв'язуючий рівень** визначає комунікаційні протоколи і протоколи аутентифікації, забезпечуючи передачу даних між ресурсами базового рівня. Зв'язуючий рівень Грід заснований на стеці протоколів TCP/IP:

Інтернет (IP, ICMP);  
транспортні протоколи (TCP, UDP);  
прикладні протоколи (DNS, OSRF ...).

**Ресурсний рівень** реалізує протоколи, що забезпечують виконання наступних функцій:

узгодження політик безпеки використання ресурсу;

процедура ініціації ресурсу;  
моніторинг стану ресурсу;  
контроль над ресурсом;  
облік використання ресурсу.

**Колективний рівень** відповідає за глобальну інтеграцію різних наборів ресурсів і може включати всі служби каталогів; служби спільного виділення, планування та розподілу ресурсів; служби моніторингу та діагностики ресурсів; служби реплікації даних.

**На прикладному рівні** розташовуються додатки користувача. Вони можуть використовувати ресурси, що знаходяться на будь-яких нижніх шарах архітектури GRID. Верхнім шаром в архітектурі є шар клієнта. В ньому розташовуються різні клієнти, які забезпечують взаємодію користувачів з GRID середовищем. На рівні сервісного шару забезпечується підтримка безпечних з'єднань, авторизації та аутентифікації користувачів.

Основні параметричні особливості Грід-моделей та їх відмінності від інших технологій підсумовані на рис. 2.



Рис. 2. Основні параметричні особливості Грід-моделей

**3. Використання Грід-технології для планування нестационарних систем.** Невизначеність у плануванні ресурсів обчислювальних систем та алгоритми, що працюють в умовах нестационарності, до якої приводять:

вимога еластичності обчислень,  
зміна характеристик машин,  
віртуалізація обчислень при слабкому зв'язку робіт з інфраструктурою, на якій вони виконуються,  
динамічна міграція робіт,  
зміна часу надання ресурсів,  
неточність оцінки часу виконання робіт,  
змінність часу обробки та передачі в залежності від використання ресурсів іншими користувачами,  
варіативність робочого навантаження,  
різноманітність часових обмежень обробки директивних термінів,  
зміна пропускну здатності,  
збої, кібератаки та інші явища.

Оптимізація в таких складних системах повинна враховувати не тільки продуктивність та ефективність використання ресурсів, а також вимоги користувачів щодо:

якості обслуговування,  
вартості послуг,

витрат провайдерів,  
середнього часу закінчення робіт,  
середнього часу очікування початку виконання робіт тощо.

Необхідно вироблення фундаментальних основ планування нестационарних ресурсів, їх аналіз та розробка нових адаптивних алгоритмів для різних сценаріїв.

Використання часткових рішень, розроблених як для стаціонарних, так і для динамічних систем, призводить до необхідності суттєвого доопрацювання алгоритмів для кожної існуючої системи під конкретні умови використання, що суттєво буде збільшувати витрати та терміни впровадження цих систем.

Необхідно розглядати підходи до вирішення з різних сторін:

онлайн алгоритми,  
планування робіт без достовірної інформації про параметри системи, роботи тощо.

Отже для опрацювання нестационарних систем необхідний комплексний підхід до побудови адаптивних планувальників та математичних моделей, які враховують відсутність точних знань для формування плану робіт.

Треба провести декомпозицію завдання на ряд часткових завдань, що включають:

- розробку концепції планування ресурсів у нестационарних обчислювальних середовищах;
- створення сучасних моделей та методів планування та оптимізації ресурсів в умовах змінних характеристик системи;
- розробку методів динамічного планування з механізмами адаптації до зміни параметрів середовища та непередбачуваності робочого навантаження;
- створення підходів до побудови адаптивних систем планування паралельних робіт, що динамічно масштабуються;
- підтримка механізмів адаптації до різноманітності характеристик робіт користувачів та вимог до їх виконання за допомогою різних рівнів обслуговування.

Теорія планування в Грід тісно пов'язана з множинною упаковкою смуг, яка відома як NP-важка і має багато реальних застосунків. Машини в Грід розглядаються як смуги, а застосунки – як прямокутники, висота та ширина яких рівні, відповідно, часу роботи та необхідному числу процесорів. При такій постановці завдання рішення шукаються з орієнтацією на статичні характеристики програмно-апаратної інфраструктури та додатків користувача. Для таких проблем отримані теоретичні результати, якщо час виконання робіт задано як в офлайн, так і в онлайн сценаріях. Отже, вони можуть повною мірою підтримувати ефективне функціонування середом з нестационарними характеристиками. Отже є необхідність розробки нових моделей,

алгоритмів та стратегій організації планування в Грід. Основними завданнями для досягнення цього є:

- аналіз сучасних підходів до планування робіт у нестационарних обчислювальних системах;
- розробка моделі Грід, яка не потребує достовірної інформації про параметри середовища та час виконання робіт;
- розробка алгоритмів ефективного планування незалежних паралельних робіт для різних сценаріїв;
- отримання теоретичних оцінок конкурентних та апроксимативних факторів для статичного, динамічного та адаптивного планування з різними критеріями оптимізації.

## Висновки

В результаті проведених досліджень визначена різниця між хмарними обчисленнями та Грід-обчисленнями з погляду користувача. Показано, що існують класи завдань, які надають перевагу Грід-технології. Детально розглянуті процеси розподілу ресурсів та обчислень за допомогою Грід-технології. Сформульовані питання, що виникають при використанні GRID технології для планування нестационарних систем. Обґрунтована необхідність та актуальність розробки нових моделей, алгоритмів та стратегій організації планування в Грід. У підсумку можна сказати, що у сучасних Грід технологіях, можливість завершити виконання означеного обсягу роботи може бути навіть важливішим, ніж прискорення, отримане за допомогою такого виконання.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Mroz, R.S. How Advanced Nuclear Generation Technologies Support Electric Grid Resilience. *Journal of Critical Infrastructure Policy*. Vol. 3(2), pp. 29–36. DOI: <http://dx.doi.org/10.18278/jcip.3.2.4>.
2. Tang, P. A digitalization-based image edge detection algorithm in intelligent recognition of 5G smart grid. *Expert Systems with Applications*. 2019. Vol. 233, 120919. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.eswa.2023.120919>.
3. She R., Sun M. Security Energy Efficiency Analysis of CR-NOMA Enabled IoT Systems for Edge-cloud Environment. *Int. Journal of Computational Intelligence Systems*. 2023. Vol. 16(1), 118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s44196-023-00273-y>.
4. Петровська І. Ю., Кучук Г. А. Розподіл обчислювальних ресурсів у хмарних системах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 2 (68). С. 75–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
5. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *Int. Conf. on Information and Digital Technologies*. Zilina, 2015. P. 266-271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>.
6. Кучук Г.А., Коваленко А. А., Лукова-Чуйко Н. В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава. ПНТУ, 2017. Вип. 2(42). С. 117-120.
7. Sharma, M., Kaur, P. Reliable federated learning in a cloud-fog-IoT environment. *Journal of Supercomputing*. 2023. Vol. 79(14). P. 15435–15458. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-023-05252-w>.
8. Baucas, M.J., Spachos, P. Improving Remote Patient Monitoring Systems Using a Fog-Based IoT Platform with Speech Recognition. 2023. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 23(15). P. 17611–17618. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2023.3287916>.
9. Essalhi, S.E., Raiss El Fenni, M., Chafnaji, H. A new clustering-based optimised energy approach for fog-enabled IoT networks. *IET Networks*. Vol. 12(4). P.155–166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ntw2.12082>.

Received (Надійшла) 26.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 30.08.2023

## GRID technologies in distributed computing environments

Yuliia Andrusenko, Tetiana Fesenko

**Abstract.** The article considers modern technologies used in distributed computing environments. Article purpose is conducting a comparative analysis of GRID and cloud technologies and identifying the features of Grid technologies. As a result of the research, the difference between cloud computing and grid computing from the user's point of view was determined. It is shown that there are classes of tasks that prefer Grid technology. Detailed processes of resource allocation and calculation by GRID technology. The questions that arise when using GRID technology for the plan-wave of non-stationary systems are formulated. The necessity and relevance of development of new models, algorithms and strategies of planning organization in GRID is substantiated.

**Keywords:** GRID technology, distributed system, cloud technology, resource distribution.

О. Ю. Заковоротний, Т. О. Орлова

Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ХМАРНИХ ТА ТУМАННИХ СЕРЕДОВИЩ ІНТЕРНЕТУ РЕЧЕЙ

**Анотація.** Метою статті є порівняння туманних та хмарних обчислень для Інтернету речей, а також отримання якнайбільше інформації про можливості даних обчислень, порівняння переваг та недоліків при їх використанні. **Результати дослідження.** Охарактеризоване хмарне середовище; охарактеризоване туманне середовище; визначені ключові відмінності туманного та хмарного середовища для Інтернету речей. Зроблено **висновок**, що при розробці Інтернету речей необхідно зрівняти хмарні та туманні обчислення, щоб використовувати максимально доступні можливості та високий потенціал обраного середовища. При сумісному використанні обох середовищ можна застосунки обраної системи Інтернету речей розподілити на три непересічні частини: ті, що виконуються тільки у туманному середовищі, ті, що відразу передають дані для обробки у хмарному середовищі, та застосунки з комплексною обробкою даних: частково у тумані, частково у хмарі.

**Ключові слова:** хмарні обчислення, туманні обчислення, Інтернет речей.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Нові вимоги до сучасних технологій є рухомою силою розвитку інформаційних технологій. Інтернет речей – це постійно зростаюча індустрія, яка вимагає більш ефективних способів управління передачею інформації та обробкою даних. Прогнозується, що у 2025 році кількість підключених пристроїв Інтернету речей збільшиться до 75 мільярдів. Всі ці пристрої міститимуть величезну кількість даних, які треба обробляти швидко та зручним способом. Помітивши високий попит на пристрої інтернету, до хмарних обчислень починають додаватися туманні обчислення. За деякими характеристиками туманні обчислення навіть кращі за хмарні, отже треба виявити, яке середовище для конкретної системи буде більш сприятливим.

**Аналіз літератури.** Питання використання хмарних середовищ розглянуті у роботах [1–3]. Роботи [4–6] орієнтовані на туманні середовища. Але у даних роботах відсутній порівняльний аналіз даних технологій, орієнтований на Інтернет речей.

**Мета та задачі досліджень.** Метою даного дослідження є порівняння туманних та хмарних обчислень для Інтернету речей, а також отримання якнайбільше інформації про можливості даних обчислень, порівняння переваг та недоліків при їх використанні.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі:

- охарактеризувати хмарне середовище;
- охарактеризувати туманне середовище;
- визначити ключові відмінності туманного та хмарного середовища для Інтернету речей.

### 1. Характеристика хмарного середовища

**1.1. Загальні властивості.** Узагальнений термін «хмара» склався вже відносно давно і позначає систему, що складається з декількох пристроїв, комп'ютерів і серверів, з'єднаних між собою через Інтернет. Таке середовище може бути умовно поділене на дві частини:

- зовнішній інтерфейс – пристрої клієнта, до яких можуть бути віднесені комп'ютери, планшети, мобільні телефони тощо;

- внутрішній інтерфейс – система зберігання даних і оброблюючі системи, які можуть бути віддалені як від пристроїв клієнта, так і від частини складових безпосередньо самої хмари.

Ці дві частини системи взаємодіють між собою за допомогою бездротових з'єднань.

Технологія хмарних обчислень надає різні види послуг, які можна поділити на три такі основні групи:

- *послуги інфраструктури* (IaaS) – віддалений центр обробки даних з такими ресурсами, як розміщення даних, обчислювальні потужності та мережі;
- *платформа як послуга* (PaaS) – розвиток платформи з пристроями та компонентами для створення, тестування та запуску застосунків користувачів хмари;
- *послуги програмного забезпечення* (SaaS) – готове програмне забезпечення, котре відповідає потребам користувачів хмари.

Якщо компанія вибрала хмарне сховище, то вона отримає доступ до вищевказаних послуг з одного місця розташування на кількох пристроях. Отже, доступність – це головна перевага. Крім того, немає необхідності підтримувати окремі послуги і можна не звертати увагу на недозавантаження системи або на її перевантаження – все це є турботи власника хмарного середовища.

Інтеграція інтернет-речей із хмарним середовищем на сьогодні, безсумнівно, є одним із можливих вигідних рішень. Хмарні сервери забезпечують необхідну місткість і гнучкість для управління та аналізу зібраних даних з підключених пристроїв, в той час як спеціальні платформи, такі як, наприклад, Azure IoT, Suite, IBM Watson, AWS, Google Хмара для IoT, надають розробникам можливість створення якісних застосунків без величезних вкладень у програмне та технічне забезпечення.

**1.2. Переваги хмарного середовища для Інтернету речей.** Так як підключені пристрої обмежують місткість і обчислювальну потужність, то інтеграція пристроїв з хмарним середовищем допоможе забезпечити такі можливості:

- покращення функціонування (швидкий зв'язок між датчиками Інтернету речей та системами обробки даних);

- місткість (добре масштабоване і необмежене місце для зберігання, сервіс якого може об'єднати, з'єднати і розподілити величезний обсяг даних);

- обробка даних (віддалені центри обробки даних забезпечують необмежені віртуальні можливості обробки за вимогою);

- зменшення витрат (ліцензійні збори нижче, ніж вартість обладнання на початковому рівні та його постійне обслуговування).

**1.3. Недоліки використання хмарного середовища для Інтернету речей.** В хмарній технології є деякі недоліки, які можуть бути відчутними при обслуговуванні пристроїв Інтернету речей.

- високий час очікування (застосунки Інтернету речей все більше вимагають, щоб час очікування був як можна нижче, але хмара не може гарантувати це із-за існуючого розриву між пристроями клієнта та центрами обробки даних);

- час простою (технічні проблеми та збої в мережах можуть статися з будь-якої причини в будь-якій системі, яка використовує Інтернет, і дані клієнта можуть постраждати при відключенні електрики; щоб уникнути проблем, багато компаній використовують кілька каналів зв'язку з автоматизованою відмовостійкістю);

- безпека та особиста інформація (особиста інформація передається через глобально пов'язані канали разом із тисячами гігабайтів інформації інших користувачів; тобто система стає небезпечною для втрати даних або може не втримати кібератаку; проблема може бути частково вирішена за допомогою гібридної області або створення особистого хмарного сховища).

## 2. Характеристика туманного середовища

**2.1. Загальні властивості.** Термін «туман» або туманні обчислення був прийнятий CISCO в 2014 році, тому він є новим для більшості людей. Туманні і хмарні обчислення взаємопов'язані між собою. У природі туман ближче до землі, чим хмара, в світі IT-технологій відбувається те ж саме, туманні обчислення ближче до кінцевого користувача, передаючи можливість хмарних обчислень кінцевому користувачеві.

Визначення може звучати так: туманні обчислення – це розширення хмарних обчислень, що складається з кількох граничних вузлів, безпосередньо підключених до фізичних пристроїв.

Такі вузли фізично набагато ближче до пристроїв у порівнянні з централізованими центрами обробки даних, тому вони здатні забезпечити практично миттєві з'єднання. Значна обчислювальна потужність периферійних вузлів дозволяє їм самостійно виконувати обробку великих об'ємів даних, не відправляючи їх на віддалений сервер.

Туманні обчислення також включають хмарні обчислення – невеликі та досить потужні центри обробки даних, розташовані на граничному сегменті мережі. Їх метою є підтримка ресурсоемних інтернет-застосунків, які не потребують спеціальних вимог на час затримки. Основна різниця між туманними та хмарними обчисленнями полягає в тому, що хмара являє собою централізовану систему, а туман являє собою розподілену децентралізовану інфраструктуру.

Туманні обчислення є посередником між обладнанням і віддаленими серверами. У туманному середовищі визначають, яка інформація буде відправлена на сервер, а яку інформацію можна редагувати локально. Таким чином, туман можна розглядати як інтелектуальний шлюз, котрий розвантажує хмару, забезпечує більш ефективну роботу та аналіз даних.

Але треба відзначити, що туманне середовище не має окремої архітектури і не замінює хмарні обчислення, а швидше доповнює їх, максимально наближаючись до джерела інформації.

Туманна технологія на сьогодні демонструє найбільший вплив на Інтернет речей, вбудовані рішення штучного інтелекту та 5G, оскільки вони, як ніколи раніше, вимагають швидкої та безперебійної роботи та взаємодії у реальному часі.

**2.2. Переваги туманного середовища для Інтернету речей.** Використання туманного середовища (або затуманювання) має багато переваг для Інтернету речей, великих даних і аналітики даних в реальному часі. До основних переваг туманних обчислень можна віднести такі:

- можливість практичної реалізації обробки даних у реальному часі (туман географічно ближче до користувачів і здатний забезпечити миттєвий відклик);

- немає проблем з пропускну здатністю (частина інформації агрегується в різних точках, а не відправляється в один центр по одному каналу);

- практично неможлива втрата з'єднання (із-за великої кількості альтернативних шляхів та з'єднаних каналів);

- високий рівень безпеки (дані обробляються величезною кількістю вузлів у складній розподіленій системі);

- покращений інтерфейс користувача (можливість реалізації миттєвого відклику та відсутності затримок у каналах зв'язку);

- енергетична ефективність (периферійні вузли використовують у роботі високоефективні протоколи, такі як Bluetooth, Zigbee або Z-хвиля).

**2.3. Недоліки використання туманного середовища для Інтернету речей.** Хоча й туманна технологія не має будь-яких явних недоліків, але все ж таки можна виділити деякі негативні моменти при її використанні для Інтернету речей:

- система туманних обчислень більш складна, тому що туман є додатковим шаром у системі обробки та зберігання даних;

- додаткові витрати (необхідно купувати додаткове обладнання: периферійні пристрої-роутери, маршрутизатори, шлюзи тощо);

- обмежений масштаб (відмінність від хмари).

## 3. Ключові відмінності туманного та хмарного середовища

Хоча концепції туманних і хмарних обчислень дуже схожі, але все ж таки між ними є різниця за деякими параметрами. Зазначимо основні відмінності, що існують між ними, які можуть бути суттєвими при обробці даних Інтернету речей.

1. Як було показано вище, основна різниця між туманними та хмарними обчисленнями є архітектурна,

тобто хмара є централізованою системою, тоді як туман завжди є розподіленою децентралізованою інфраструктурою. Архітектура хмари складається з великих центрів обробки даних, які можуть бути розміщені по всьому світу, та обслуговувати тисячі або навіть мільйонів користувачів. Архітектура туману складається з великої множини невеликих вузлів, що розташовані як можна ближче до пристроїв Інтернету речей.

2. Туманне середовище у загальному випадку розглядається як посередник між центрами обробки даних і апаратними засобами, і, відповідно, його компоненти суттєво ближче до кінцевих користувачів. Якщо немає шару туману, то хмарне середовище напряму зв'язується з пристроями Інтернету речей, що може займати багато часу.

3. При реалізації хмарних обчислень обробка даних відбувається у віддалених центрах обробки даних. Обробка та зберігання даних при туманних обчислень здійснюється на граничному сегменті мережі, котрий знаходиться поруч із джерелом інформації, що має вирішальне значення для реалізації режиму реального часу.

4. Хмарне середовище гарантовано є більш функціональним, ніж туманне середовище у відношенні значущих ресурсів і можливостей зберігання.

5. Хмара звичайно складається з кількох великих серверних вузлів. Туман включає в себе велику кількість дрібних вузлів.

6. У туманних обчисленнях виконується короткостроковий аналіз на граничному сегменті мережі із-за миттєвого відклику, в той час як у хмарних обчисленнях проводиться довготривалий глибокий аналіз із-за можливості більш повільного відклику.

7. При туманних обчисленнях час затримки завжди є низьким, але при хмарних обчисленнях зазвичай він є високим.

8. Хмарна система може зруйнуватися при відмовах мережі Інтернет. Туманні обчислення використовують різні протоколи і стандарти, тому ризик відмови є набагато нижчим.

9. Туманне середовище є більш безпечною системою, ніж хмарне із-за його розподіленої архітектури.

### Висновки та обговорення

Туманні обчислення є одним із рішень у роботі з пристроями Інтернету речей, тому що вони можуть задовольнити потреби постійно зростаючої кількості підключених пристроїв. У туманному середовищі використовуються локальні, а не віддалені комп'ютерні ресурси, що робить продуктивність більш ефективною та потужною, а також зменшує проблеми з пропускну здатністю.

Але незважаючи на це, у деяких випадках хмарне середовище може бути більш прийнятним, вважаючи на деякі недоліки при використанні туману.

Отже при впровадженні Інтернету речей необхідно зрівняти хмарні та туманні обчислення, щоб використовувати максимально доступні можливості та високий потенціал обраного середовища. При сумісному використанні обох середовищ можна застосувати обраної системи Інтернету речей розподілити на три непересічні частини: ті, що виконуються тільки у туманному середовищі, ті, що відразу передають дані для обробки у хмарному середовищі, та застосунки з комплексною обробкою даних: частково у тумані, частково у хмарі.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. She R., Sun M. Security Energy Efficiency Analysis of CR-NOMA Enabled IoT Systems for Edge-cloud Environment. *Int. Journal of Computational Intelligence Systems*. 2023. Vol. 16(1), 118. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s44196-023-00273-y>.
2. Петровська І. Ю., Кучук Г. А. Розподіл обчислювальних ресурсів у хмарних системах. *Системи управління, навігації та зв'язку*. 2022. Вип. 2 (68). С. 75–78. DOI: <http://dx.doi.org/10.26906/SUNZ.2022.2.075>.
3. Kuchuk G., Nechausov S., Kharchenko, V. Two-stage optimization of resource allocation for hybrid cloud data store. *Int. Conf. on Information and Digital Technologies*. Zilina, 2015. P. 266–271. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/DT.2015.7222982>.
4. Кучук Г.А., Коваленко А. А., Лукова-Чуйко Н. В. Метод мінімізації середньої затримки пакетів у віртуальних з'єднаннях мережі підтримки хмарного сервісу. *Системи управління, навігації та зв'язку*. Полтава. ПНТУ, 2017. Вип. 2(42). С. 117–120.
5. Sharma, M., Kaur, P. Reliable federated learning in a cloud-fog-IoT environment. *Journal of Supercomputing*. 2023. Vol. 79(14). P. 15435–15458. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s11227-023-05252-w>.
6. Baucas, M.J., Spachos, P. Improving Remote Patient Monitoring Systems Using a Fog-Based IoT Platform with Speech Recognition. 2023. *IEEE Sensors Journal*. Vol. 23(15). P. 17611–17618. DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/JSEN.2023.3287916>.
7. Essalhi, S.E., Raiss El Fenni, M., Chafnaji, H. A new clustering-based optimised energy approach for fog-enabled IoT networks. *IET Networks*. Vol. 12(4). P.155–166. DOI: <http://dx.doi.org/10.1049/ntw2.12082>.

Received (Надійшла) 25.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

### Comparative analysis of cloud and fog environments of the Internet of Things

Oleksandr Zakovorotnyi, Tetiana Orlova

**Abstract.** The purpose of the article is to compare fog and cloud computing for the Internet of Things, as well as to obtain as much information as possible about the possibilities of these calculations, to compare the advantages and disadvantages of their use. Research results. Characterized cloud environment; a characterized foggy environment; the key differences between fog and cloud environments for the Internet of Things are defined. It was concluded that when developing the Internet of Things, it is necessary to balance cloud and fog computing in order to use the maximum available opportunities and high potential of the chosen environment. With the combined use of both environments, the applications of the selected Internet of Things system can be divided into three non-intersecting parts: those that are executed only in the fog environment, those that immediately transmit data for processing in the cloud environment, and applications with complex data processing: partly in the fog, partly in the cloud.

**Keywords:** cloud computing, fog computing, Internet of Things.

Б. Ю. Вінтенко<sup>1</sup>, О. А. Смірнов<sup>2</sup>, А. С. Коваленко<sup>2</sup>, С. А. Смірнов<sup>2</sup>, К. О. Буравченко<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ПАТ “Науково-виробниче підприємство “Радій”, Кропивницький, Україна

<sup>2</sup>Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВИМОГ МІЖНАРОДНИХ СТАНДАРТІВ ІЕС 60880 ТА ІЕС 62138 З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧИХ СИСТЕМ АЕС, ВАЖЛИВИХ ДЛЯ БЕЗПЕКИ

**Анотація.** На сьогоднішній день значна частина електричної енергії виробляється атомними електростанціями. Атомна енергетика – це дешевий, економічно вигідний та екологічний спосіб забезпечення потреб людини електроенергією. Разом з тим, це виробництво пов’язане з необхідністю забезпечення захисту людини та навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання ядерного палива під час нормальної експлуатації станції та при виникненні аварійних ситуацій. Атомні електростанції (АЕС) містять велику кількість обладнання для забезпечення технологічних процесів та виконання функцій безпеки. **Метою** роботи є дослідження вимог до формування життєвого циклу, основних етапів проектування і документування програмного забезпечення комп’ютерних систем управління атомних електростанцій (ПЗ КСУ АЕС), що виконують функції безпеки категорій «А», «В» та «С». Вимоги до ПЗ, що виконують функції безпеки категорії «А», наведені в міжнародному стандарті ІЕС 60880 «Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category A functions», вимоги до ПЗ, що виконують функції безпеки категорії «В» і «С», наведені в міжнародному стандарті ІЕС 62138 «Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category B or C functions». **Об’єктом дослідження** є процес розробки програмного забезпечення для комп’ютерних систем управління АЕС. **Предметом** є дослідження вимог міжнародних стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки. **У результаті дослідження** розглянута загальна структура вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138, визначені групи учасників, які приймають участь в розробці ПЗ КСУ АЕС та розподілення видів діяльності з розробки ПЗ між цими групами, проведений аналіз вимог загальних вимог та вимог до етапу розробки специфікації ПЗ, вимог до етапу проектування та реалізації ПЗ, вимог до етапу верифікації, інтеграції та валідації та вимог до етапу встановлення, експлуатації та модифікації, сформована таблиця розподілення вимог до ПЗ, досліджені засоби імплементації вимог, визначена проблема оцінки відповідності стандарту. **Висновки.** Міжнародні стандарти ІЕС 60880 та ІЕС 62138 містять важливі вимоги до всіх етапів розробки ПЗ КСУ АЕС, важливого для безпеки. Вимоги стосуються як організаційних питань, так і технічних аспектів. Згідно з цими стандартами, кожне підприємство, що займається розробкою ПЗ КСУ АЕС, має визначити робочі групи, які будуть реалізовувати різні етапи ЖЦ (проектування, реалізація, верифікація тощо). Стандарти не містять вимог до інтерфейсів користувача ПЗ. Тому одним з напрямків наступних досліджень стануть вимоги інших міжнародних стандартів – ІЕС 61772 «Nuclear power plants – Control rooms – Application of visual display units (VDUs)» («Візуальні пристрої відображення») та ІЕС 62646 «Nuclear power plants – Control rooms – Computer-based procedures» («Комп’ютеризовані процедури»), а також вимоги галузевих нормативних документів, таких як NUREG-0700 «Human-System Interface Design Review Guidelines» – «Побудова інтерфейсів «людина-машина» (U.S. Nuclear Regulatory Commission, США). В стандартах не визначається загальноприйнятних метрик, що вказують ступінь відповідності ПЗ даним стандартам. Виходячи з цього, кожна організація, яка виконує оцінку відповідності ПЗ та КСУ в цілому вимогам стандартів, повинна створити власну методику такої оцінки. Тому метою наступних досліджень є вивчення засобів оцінки специфікації вимог, метрик коду ПЗ, критеріїв повноти тестування ПЗ, які можуть бути використані для розробки формальних методик оцінювання ПЗ вимогам стандартів.

**Ключові слова:** програмне забезпечення, комп’ютерні системи управління, АЕС, ІЕС 60880, ІЕС 62138.

### Вступ

**Постановка проблеми.** На сьогоднішній день значна частина електричної енергії виробляється атомними електростанціями [1]. Атомна енергетика – це дешевий, економічно вигідний та екологічний спосіб забезпечення потреб людини електроенергією. Разом з тим, це виробництво пов’язане з необхідністю забезпечення захисту людини та навколишнього середовища від іонізуючого випромінювання ядерного палива під час нормальної експлуатації станції та при виникненні аварійних ситуацій.

Атомні електростанції (АЕС) містять велику кількість обладнання для забезпечення технологічних процесів та виконання функцій безпеки.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Функції безпеки в залежності від наслідків відмови і хибного спрацювання класифікують за категоріями. У різних нормативних документах класифікація функцій безпеки може відрізнятися. У відповідності з міжнародним стандартом ІЕС 61226 («КСУ АЕС ВБ. Розподіл за категоріями ФБ») [4] виділяють 3 категорії функцій безпеки: «А», «В» та «С». У відповідності з нормативним документом МАГАТЕ «Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants: Specific Safety Guide No. SSG-30» [5] виділяють 3 класи безпеки: «1», «2» та «3». З метою уникнення дублювання класифікації категорій в даній статті буде використовуватися позначення категорій за допомогою літер «А», «В» та «С», як



вказано в стандарті ІЕС 61226. Функції категорії «А» є найбільш важливими для попередження або захисту під час аварійних ситуацій, функції категорій «В» та «С» мають менший ступінь важливості.

Всі пристрої, системи і компоненти, включаючи програмне забезпечення (ПЗ) для контролю і управління, що являються елементами, важливими для безпеки, повинні бути визначені, а потім класифіковані на основі функції, що виконується, і важливості для безпеки. Огляд класифікації комп'ютерних систем управління (КСУ) і програмного забезпечення (ПЗ) у відповідності із стандартами і нормативними документами наведений у [12].

**Постановка задач дослідження.** Метою даної статті є дослідження вимог до формування життєвого циклу, основних етапів проектування і документування програмного забезпечення комп'ютерних систем управління атомних електростанцій (ПЗ КСУ АЕС), що виконують функції безпеки категорій «А», «В» та «С». Вимоги до ПЗ, що виконує функції безпеки категорій «А», наведені в міжнародному стандарті ІЕС 60880 «Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category A functions» [6], вимоги до ПЗ, що виконує функції безпеки категорій «В» і «С», наведені в міжнародному стандарті ІЕС 62138 «Nuclear power plants – Instrumentation and control important for safety – Software aspects for computer-based systems performing category B or C functions» [7].

### Загальна структура вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138

**Область застосування.** У розділі 1 обох стандартів областю застосування вказуються вимоги до ПЗ комп'ютерних систем управління, що виконують функції безпеки категорій «А» (ІЕС 60880) і «В» і «С» (ІЕС 62138). Мета цих вимог – створення ПЗ високого ступеню надійності, яке має мінімальну імовірність наявності прихованих програмних дефектів.

**Нормативні посилання.** У розділі 2 обох стандартів міститься перелік нормативів, що мають відношення до розробки ПЗ КСУ АЕС, важливих для безпеки. Це стандарти ІЕС 61508, ІЕС 61513, ІЕС 61226, нормативні документи МАГАТЕ тощо.

**Терміни та визначення, скорочення.** У розділі 3 обох стандартів визначаються поняття, які використовуються при формуванні вимог. Серед цих термінів та визначень необхідно відмітити найголовніші: універсальна мова, проблемно-орієнтована мова, раніше розроблене ПЗ, автоматизована генерація коду, ущільнення коду, самоконтроль, різноманітність тощо.

У розділі 4 обох стандартів наводиться список використовуваних скорочень та аббревіатур.

**Детальні вимоги.** Починаючи з розділу 5, в обох стандартах наводиться основна частина вимог до розробки ПЗ.

**Типи ПЗ та даних.** Стандарти розробки ПЗ КСУ АЕС поділяють програмне забезпечення на типи: операційне ПЗ та прикладне ПЗ. Кожне ПЗ використовує конфігураційні дані, які також поділяються на категорії: незмінні (є частиною специфікації проекту) та змінні (можуть бути змінені оперативним персоналом в необхідних межах).

**Етапи життєвого циклу ПЗ.** Стандарт ІЕС 61513 описує життєвий цикл (ЖЦ) КСУ в цілому та визначає заходи, які мають відбуватися на всіх його етапах. Згідно концепції цього стандарту, програмне забезпечення є невід'ємною частиною КСУ, ЖЦ ПЗ тісно пов'язаний з ЖЦ всієї системи. Стандарти КСУ ІЕС 60880 та ІЕС 62138 містять вимоги до ЖЦ ПЗ та конкретизують види діяльності, що відносяться до розробки ПЗ. Вони розглядають розробку апаратного та програмного забезпечення як паралельні процеси, які об'єднуються на етапі інтеграції.

В табл. 1 наведені етапи ЖЦ КСУ АЕС, види діяльності з розробки в межах цих етапів та номери підрозділів стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138, що описують вимоги до відповідного виду діяльності.

Таблиця 1 – Етапи ЖЦ та види діяльності з розробки ПЗ КСУ АЕС

Етап ЖЦ	Вид діяльності	Підрозділ ІЕС 60880	Підрозділ ІЕС 62138
Всі етапи	Керування розробкою	5.4	6.2.1
	Виконання вимог плану забезпечення якості ПЗ	5.5	6.2.1
	Керування конфігурацією ПЗ	5.6	6.2.3
Розробка специфікації вимог до ПЗ	Планування захищеності ПЗ	5.7	6.4.4.4
	Планування захисту від відмов з загальної причини	13	6.12
	Вибір та аналіз придатності раніше розробленого ПЗ	15	6.3
	Розробка специфікації вимог до нового ПЗ	6.1-6.3, дод. «А»	6.4
Розробка проекту ПЗ та реалізація	Вибір інструментального ПЗ	14	6.2.4
	Вибір мов програмування	7.2, дод. «В»	6.2.5
	Створення проекту ПЗ	7, дод. «В»	6.5
	Реалізація нового ПЗ	7, дод. «В»	6.6
	Створення документації	7.4	6.5
Всі етапи	Верифікація	8	6.2.2
Інтеграція системи	Інтеграція ПЗ до КСУ	9	6.7
Валідація системи	Валідація ПЗ в складі КСУ	10	6.8
Встановлення системи	Встановлення ПЗ на місці експлуатації	12	6.9
	Навчання персоналу		
Модифікація системи	Аналіз запитів на модифікацію, модифікація ПЗ	11	6.10, 6.11

Слід відмітити, що послідовність підрозділів, які описують види діяльності в межах кожного етапу, в стандартах ІЕС 60880 та ІЕС 62138 дещо відрізняються.

**Висновки.** Виходячи з структури вимог до розробки ПЗ КСУ АЕС, можна виділити окремі групи учасників цього процесу та побудувати схему взаємодії між ними. В наступному розділі наведено детальний розгляд цих груп.

### Групи учасників, які приймають участь в розробці ПЗ КСУ АЕС

В розробці ПЗ КСУ АЕС можна виділити наступні групи учасників:

- група керування розробкою та контролю забезпечення якості (менеджмент) – учасники, що виконують керування проектом та контроль виконання плану забезпечення якості;
- група проектування ПЗ – учасники, що отримують специфікацію системи (технічне завдання) та формують специфікацію вимог до ПЗ;
- група розробки ПЗ – учасники, що розробляють проект ПЗ та виконують його реалізацію відповідно до специфікації вимог;

– група верифікації та валідації – учасники, що виконують перевірку ПЗ на всіх етапах ЖЦ;

– група інтеграції – учасники, які здійснюють об'єднання апаратного та програмного забезпечення в єдину систему;

– група впровадження та супроводу – учасники, що забезпечують контроль над встановленням КСУ на місці експлуатації, виконують функції супроводу (навчання персоналу, збір інформації про використання КСУ, обробка запитів на модифікацію).

Слід відмітити те, що менеджмент групи верифікації та валідації повинен бути незалежним від менеджменту інших груп у випадку розробки ПЗ категорій «А» та «В».

Схема взаємодії між цими групами та їх основні види діяльності наведені на рис. 1.

**Висновок.** Одним з результатів дослідження вимог стандартів до розробки ПЗ КСУ АЕС є розподілення учасників розробки на функціональні групи. Це дає можливість створити колектив учасників з відповідними компетенціями та спроектувати їх комунікацію між собою. Наступний розділ описує можливий варіант розподілу видів діяльності з розробки ПЗ між групами.



Рис. 1. Схема взаємодії між групами розробки ПЗ КСУ АЕС

### Розподілення видів діяльності з розробки ПЗ між групами

Виходячи з того, що в розробці ПЗ КСУ АЕС беруть участь різні групи виконавців, очевидно, що

різні етапи ЖЦ ПЗ, види діяльності з розробки ПЗ та вимоги стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 можуть в переважній мірі стосуватись окремих груп.

Орієнтовне відношення етапів ЖЦ, видів діяльності до окремих груп наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Розподілення етапів ЖЦ та видів діяльності з розробки ПЗ між групами

Етап ЖЦ ПЗ	Види діяльності в межах етапів ЖЦ ПЗ	Групи учасників
Всі етапи	Керування розробкою Контроль виконання вимог плану забезпечення якості ПЗ	Менеджмент
Розробка специфікації вимог до ПЗ	Вибір та аналіз придатності раніше розробленого ПЗ Планування захищеності ПЗ Планування захисту від відмов з загальної причини Розробка специфікації вимог до нового ПЗ	Група проектування ПЗ Група розробки ПЗ
Розробка проекту ПЗ та реалізація	Аналіз специфікації вимог до ПЗ Конфігурування раніше розробленого ПЗ Вибір інструментального ПЗ Вибір мов програмування Розробка специфікації нового ПЗ Реалізація нового ПЗ Створення документації Аналіз результатів верифікації, інтеграції та валідації	Група розробки ПЗ
Всі етапи	Верифікація результатів кожного етапу ЖЦ ПЗ Валідація ПЗ під час розробки	Група верифікації Група розробки ПЗ
Інтеграція системи	Інтеграція ПЗ до КСУ	Група інтеграції Група розробки ПЗ
Валідація системи	Валідація ПЗ в складі КСУ	Група верифікації
Встановлення системи	Встановлення ПЗ на місці експлуатації КСУ Навчання оперативного персоналу Оформлення запитів на модифікацію ПЗ	Група впровадження Група розробки ПЗ
Модифікація системи	Аналіз запитів на модифікацію ПЗ Модифікація ПЗ	Група проектування ПЗ Група розробки ПЗ

Слід зазначити, що розподілення вимог стандарту між учасниками не усуває необхідність знайомства окремих учасників з повним змістом всього стандарту. Проте головний висновок цього розподілення вказує на те, що при підготовці до розробки ПЗ з урахуванням вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 учасники груп можуть визначити, які розділи та вимоги стандартів, види діяльності стосуються їх першочергово, а які – опосередковано.

В наступних розділах даної статті наводиться більш детальний аналіз вимог усіх розділів стандартів.

#### Аналіз вимог загальних вимог та вимог до етапу розробки специфікації ПЗ

В даному підрозділі проводиться дослідження основних вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138, які стосуються етапів діяльності, що є визначаючими та підготовчими до реалізації.

**Керування розробкою.** Процес розробки ПЗ має бути розділеним на декілька етапів. Етапи можуть або впливати на наступні, або залежати від попередніх. Всі етапи мають бути офіційно визначеними, жодний з них не може бути пропущений. Діяльність в межах етапів повинна співвідноситися з повним життєвим циклом ПЗ. Вимагається, щоб для кожного етапу було визначено та задокументовано:

- мета та виконавці;
- зміст та властивості вхідних та вихідних даних.

Документи, що описують кожний етап розробки, мають аналізуватися та перевірятися.

**План забезпечення якості ПЗ.** На ранніх етапах ЖЦ ПЗ має бути створений план забезпечення якості ПЗ, якого необхідно дотримуватися всім учасникам процесу розробки. В ньому має вимагатися:

- наявність опису всіх необхідних технічних процедур для кожного етапу;

- визначення всіх специфічних термінів та умовних позначень;

- визначення того, які методи, засоби, мови та правила застосовуються до яких видів діяльності;

- реалізація всіх етапів компетентними особами з наданням їм відповідних ресурсів;

- встановлення та обґрунтування відхилень від вимог стандарту;

- модифікація вже затверджених документів на основі чіткого визначення конкретних змін, їх аналізу та затвердження.

Згідно вимог стандарту, результати виконання плану забезпечення якості мають бути оформлені документально.

**Керування конфігурацією.** Стандарт ІЕС 60880 та ІЕС 62138 вимагають забезпечувати ідентифікацію всіх версій ПЗ, документації на нього, трансляторів та інших інструментальних програм. Має бути встановлений зв'язок між окремими версіями ПЗ та відповідними до них версіями документації. Повна версія програмного продукту повинна однозначно ідентифікуватися версіями повного набору компонентів ПЗ, що входять до нього. ПЗ, що знаходиться в розробці, має бути відділене від ПЗ, розробка та верифікація якого вже завершена.

**Захищеність.** Мета захищеності ПЗ та даних – унеможливити доступ до ПЗ та його функцій неуповноваженими особами. Згідно стандарту ІЕС 61513, забезпечення захищеності ПЗ є частиною забезпечення захищеності КСУ.

Згідно вимог стандарту ІЕС 60880, для ПЗ категорії «А» необхідне обов'язкове проведення аналізу потенційних загроз. На основі аналізу мають бути сформовані вимоги до проекту ПЗ з метою мінімізувати вразливості.

Зокрема, мають бути реалізовані:

- захист від змін ПЗ оператором;

- обмеження прав доступу користувачів до функціонально необхідних;
- встановлення безпечних діапазонів для даних, що змінюються оператором;
- відслідковування модифікацій ПЗ та його параметрів;
- заходи проти наявності прихованих функцій та засобів навмисного забезпечення несанкціонованого доступу.

Для ПЗ категорії «В», «С» в стандартах не вказуються конкретні вимоги до захищеності.

**Самоконтроль.** Згідно вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138, ПЗ категорії «А» та «В» повинно контролювати технічний стан КСУ та власну поведінку у визначені проміжки часу. Функції контролю повинні виявляти відмови апаратних засобів, помилкову поведінку ПЗ або порушення процесів передачі даних. В процесі самоконтролю має бути передбачений автоматичний збір діагностичної інформації для подальшого аналізу. При виявленні порушення має відбутися реакція у відповідності до проекту системи.

**Періодичні тестування.** ПЗ категорії «А» повинно мати здатність до проведення періодичних тестувань всіх функцій безпеки для виявлення будь-яких відмов. Має бути реалізований автоматичний збір діагностичної інформації про проведення та результати тестувань. ПЗ категорії «В» повинно мати таку здатність, якщо це не призводить до його надмірної складності.

**Специфікація вимог до ПЗ.** За результатами аналізу вимог до ПЗ повинна бути створена специфікація вимог. Це документ, який описує те, що повинна робити програма, а не те, як вона повинна це робити. Зокрема, в ньому повинні бути вказані:

- загальні характеристики (розрядність, типи обміну);
- вимоги до технічних засобів або посилання на відповідний документ;
- прикладні функції, що виконуються ПЗ;
- типи поведінки ПЗ, режими його роботи;
- інтерфейси ПЗ з користувачем та іншими системами;
- параметри ПЗ, що можуть бути змінені оператором;
- технологічні та функціональні обмеження;
- вимоги до самоконтролю та усунення наслідків відмов;
- вимоги до середовища роботи та стандартного ПЗ.

Внаслідок важливості даного етапу, процес встановлення специфікації вимог має бути строгим та оформленим документально. Специфікація вимог має бути однозначною, підлягати верифікації або тестуванню, а також досяжною для реалізації. Вона має бути доступною замовнику, клієнту, кінцевому користувачу, групі розробки, верифікації, оцінки та ліцензування.

**Висновки.** Керування проектуванням, планування та створення специфікації вимог до ПЗ є процесами, які є підготовчими до створення проекту та реалізації ПЗ розробниками.

## Аналіз вимог до етапу проектування та реалізації ПЗ

**Вимоги до раніше розробленого ПЗ.** Для реалізації вимог до програмного забезпечення може бути використане раніше розроблене ПЗ (РПЗ), яке відповідає необхідним вимогам. Це може бути ПЗ різного розміру – від невеликих бібліотек до великих програмних продуктів. Використання РПЗ може бути більш вигідним, ніж розробка нового, особливо в тому випадку, якщо це РПЗ вже пройшло валідацію для використання в аналогічних системах.

РПЗ має відповідати всім вимогам стандартів розробки ПЗ КСУ АЕС відповідної категорії.

Для прийняття рішення про використання РПЗ потрібно визначити його придатність для виконання необхідних функцій. Потрібно відмітити, що для використання РПЗ може бути необхідно виконати його конфігурування або адаптацію. Інформацію для визначення придатності РПЗ необхідно отримати з його документації, в разі необхідності потрібно провести додатковий аналіз. В документації мають бути описані інтерфейси, функції, формати даних, обмеження тощо.

В разі прийняття позитивного рішення про використання РПЗ необхідне проведення оцінки його якості. Ця задача може бути розв'язана на основі вивчення документації з сертифікації та атестації. Має бути проаналізовано план забезпечення якості РПЗ, документи з специфікації, проекту, реалізації, результатів верифікації. Досвід з експлуатації РПЗ є доповненням до інформації, на основі якої приймається рішення про його застосування. Інформація про досвід експлуатації є більш вагомою, якщо накоплена за тривалий час, на великій кількості КСУ тощо.

В разі прийняття позитивного рішення про використання РПЗ, воно має бути введено під керування конфігурацією. Для використання повинна бути визначена та версія РПЗ, що була атестована. В плані забезпечення якості КСУ мають бути передбачені процедури оновлення РПЗ на більш нову версію при виникненні необхідності.

Таким чином, з досліджень вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 можна зробити **висновок**, що для виконання функцій ПЗ всіх категорій безпеки КСУ АЕС можна використовувати РПЗ, але після проведення аналізу його придатності та оцінки якості. Підвищення категорії функцій безпеки збільшує жорсткість вимог до РПЗ, об'єму документації та процедур перевірок.

**Загальні вимоги до інструментальних засобів.** Використання інструментальних засобів зменшує кількість помилок в процесі розробки, підвищує надійність та скорочує час розробки. Такими засобами є засоби розробки програм, засоби конфігурування, транслятори, компілятори, засоби автоматизації тестувань, контролю версій, роботи з даними тощо.

Для інструментальних засобів розробки ПЗ функціональної безпеки «А»:

- повинна бути проведена верифікація та оцінка імовірності внесення ними дефектів;
- має бути розроблена та застосовуватися процедура атестації. Атестація має визначити імовірність

того, що інструментальна програма внесе дефекти до ПЗ, а також наслідки внесення таких дефектів. Під час атестації має враховуватися інформація від розробника інструментального засобу, його документація, тестування та валідація, а також досвід використання.

Вибір інструментальних засобів розробки ПЗ функціональної безпеки «В» та «С» має ґрунтуватися на підтвердженні їх якості. Суворість вимог до якості залежить від важливості функцій і серйозності дефектів, які можуть бути внесені в ПЗ цим засобом.

Використання кожного інструментального засобу має бути документально оформлене. Мають бути чітко вказані процеси розробки за участю цього засобу, його вплив на генерований код та інші процеси розробки, його захищеність від помилок та несанкціонованих дій тощо.

Має бути чітко визначена версія та конфігурація кожного інструментального засобу. Для ПЗ категорії «А» та «В» перехід на використання нових версій має відбуватися після підтвердження того, що зміна версії не вносить дефекти в програму.

Для внесення різноманітності як засобу підвищення надійності ПЗ можуть використовуватися різні інструментальні засоби, що мають однакову функціональність. Їх різноманітність підтверджується отриманням їх від різних постачальників, різними процесами використання, різними мовами програмування тощо.

Транслятори та компілятори, що використовуються, не повинні без попередження видаляти захисні функції, що додаються програмістом. Оптимізація коду, що генерується компілятором, не повинна ускладнювати його. Для коду, який підлягав оптимізації, має бути передбачена верифікація та валідація.

**Висновок.** Інструментальні засоби – це необхідні компоненти в розробці ПЗ, кожен з яких згідно умов стандартів розробки ПЗ має бути обґрунтовано обраний, верифікований та атестований.

**Вибір мов програмування.** Для розробки ПЗ високої якості важливо обрати таку мову програмування, що дозволить реалізувати всі необхідні вимоги до ПЗ. Стандарти розробки ПЗ КСУ АЕС ІЕС 60880 та ІЕС 62138 містять рекомендації щодо вибору мов програмування. Вони поділяють мови програмування на два види: універсальні та проблемно-орієнтовані. Універсальні мови програмування є загальноприйнятими: С, С++, Асемблер, VHDL, Java, Python тощо. Код, написаний цими мовами, може бути безпосередньо завантажений до обчислювальних пристроїв та виконуватися ними.

Проблемно-орієнтовані мови програмування використовують методи формалізації для позначення операцій, такі як діаграми, блоки та зв'язки між ними. Це дає можливість створювати проекти фахівцям, що не мають навичок написання коду на універсальних мовах. Оформлення програми за допомогою проблемно-орієнтованих мов є більш наближеним до прикладної області. Генерація програмного коду для завантаження до обчислювальних пристроїв в цьому разі виконується автоматично.

Деякі рекомендації в стандартах наводяться для обох видів мов, деякі – тільки для одного виду.

Загальні вимоги стандарту ІЕС 60880 щодо мов програмування для створення ПЗ категорії «А» наступні:

- мова програмування повинна мати чітко визначений та документований синтаксис та правила написання коду;

- за можливості повинен використовуватися «скорочений», максимально «безпечний» варіант мови;

- мова програмування повинна мати перевірний транслятор.

**Для універсальних мов** програмування:

- пріоритет має віддаватися розповсюдженим та загальноприйнятим мовам програмування;

- пріоритет має віддаватися мовам програмування високого рівня;

- програма, написана обраною мовою, повинна бути легкою для читання;

Мова програмування повинна забезпечувати:

- можливість перевірки типів та меж значень змінних;

- можливість перевірки на вихід за межі масиву;

- можливість відслідковування помилок (наприклад, генерації виключень) при виході за межі масиву, використанні неініціалізованих змінних, відкиданні значущих розрядів чисел, неспівпадіння типів даних. При цьому засоби мови не повинні намагатися автоматично «виправити» помилку;

- заборону використання неявних перетворень типів;

- явну декларацію змінних;

- використання довгих імен змінних та функцій;

- перевірку типів даних, межі масивів тощо на етапі компіляції програми, а не її виконання.

**Для проблемно-орієнтованих мов** програмування:

- використання стандартних позначень технологічних одиниць;

- можливість розбиття програми на модулі;

- невисока складність елементів, з яких складається програма;

- відсутність функціонально небезпечних елементів;

- проста структура коду, що генерується, наприклад переважно лінійна;

- формат програми має бути зрозумілий для технічних фахівців, які не є фахівцями в програмуванні.

Прикладом проблемно-орієнтованого засобу розробки ПЗ для КСУ АЕС є Radiy Platform Configuration Tool, розроблений ПАТ НВП «Радій» – <https://radiy.com/radics/>.

Загальні вимоги стандарту ІЕС 62138 щодо мов програмування для створення ПЗ категорій «В» та «С» наступні:

- мови програмування повинні мати чітко визначену лексику та семантику;

- перевага має надаватися проблемно-орієнтованим мовам.

Для категорії «В» вводиться ряд додаткових вимог:

- статична типізація;

- передбачувана поведінка програми.

Наприклад, недоцільним є переривання роботи програми для процедури «збирання сміття»;

– використання мов низького рівня (наприклад, асемблерів) має бути обґрунтованим.

**Вимоги до реалізації ПЗ.** Основним етапом діяльності при створенні програмного забезпечення є реалізація. Детальні вимоги до реалізації відрізняються в залежності від класу функціональної безпеки ПЗ і розглядаються в межах відповідного стандарту.

Загальні вимоги стандарту ІЕС 60880 до реалізації ПЗ категорії функціональної безпеки «А» наступні:

- структура програми повинна бути простою та зрозумілою;
- програма має бути побудована на модульному принципі;
- програма повинна реалізовувати функції самоконтролю;
- не рекомендується використовувати складні прийоми, рекурсію, стиснення коду;
- вихідний код програми повинен бути зрозумілий для кваліфікованих програмістів, які не беруть участь в розробці;
- будь-які відхилення від вимог стандарту мають бути обґрунтовані.

Детальні рекомендації стандарту ІЕС 60880 до розробки ПЗ містяться в додатку В. Цей додаток можна вважати головним компонентом стандарту ІЕС 60880, що стосується розробки ПЗ категорії «А». В табл. 3 згруповані та наведені категорії рекомендацій, перелік їх сфер застосування та кількість рекомендацій в кожній сфері (N – кількість рекомендацій в кожній сфері в стандарті).

Таблиця 3 – Категорії та сфери застосування рекомендацій стандарту ІЕС 60880 до ПЗ КСУ АЕС

Категорія рекомендацій	Сфери застосування	N
Загальний процес проектування	Можливість модифікації ПЗ	4
	Підхід до розробки «згори-донизу»	11
	Верифікація проміжних результатів	6
Структура ПЗ	Модифікація в процесі розробки	6
	Загальна структура програми	7
	Модульність	7
	Вимоги до операційного ПЗ	10
	Час виконання програми	9
Самоконтроль	Використання переривань	6
	Побудова арифметичних виразів	4
	Перевірки достовірності	4
	Безпечна вихідна інформація	4
Детальне проектування і кодування	Аналіз змісту пам'яті	4
	Перевірка наявності, обробка помилок	6
	Розгалуження і цикли	8
	Підпрограми	6
	Вкладені структури	4
	Адресація і масиви	5
	Структури даних	6
Динамічна зміна коду	1	
Тестування	7	
Рекомендації, що залежать від мови програмування	Послідовність описів, оформлення коду	5
	Наявність, дотримання правил кодування	4
	Використання коментарів	4
	Мова асемблера	8
	Проблемно-орієнтовані мови	4
Автоматична генерація коду	4	

Вимоги стандарту ІЕС 62138 до розробки ПЗ категорій «В» та «С» є менш суворими та приведені в формі загальних рекомендацій.

Для ПЗ, що реалізоване з використанням універсальних мов програмування, вимагається використання правил кодування. Набір правил може бути специфічним в залежності від мови програмування. Структура програми повинна бути ясною та зрозумілою. Рекомендується дотримання модульного принципу структури ПЗ, використання принципів інкапсуляції. Вимагається уникати використання небезпечних особливостей мови програмування, на якій створюється ПЗ.

При використанні проблемно-орієнтованих мов програмування, використання документально оформлених правил кодування вимагається для ПЗ категорії функціональної безпеки «В».

Під час реалізації ПЗ стандартом вимагається проведення документально оформленої верифікації. Верифікація має стосуватися як дотримання правил кодування (для ПЗ категорії «В»), так і відповідності поведінки програми специфікації вимог до ПЗ.

**Висновок.** Вимоги стандартів до розробки ПЗ значно відрізняються в залежності від категорії. Стандарт ІЕС 60880 зобов'язує дотримуватися правил кодування та наводить велику кількість детальних рекомендацій. Стандарт ІЕС 62138 містить загальні вимоги з дотримання правил кодування без їх зазначення.

### Аналіз вимог до етапу верифікації, інтеграції та валідації

В підрозділі проводиться дослідження основних вимог стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138, які стосуються етапів верифікації, інтеграції та валідації ПЗ.

**Верифікація ПЗ.** З метою забезпечення впевненості у відповідності ПЗ необхідним показникам якості вимагається проведення процедур верифікації вхідних та вихідних даних та результатів виконання кожного етапу ЖЦ ПЗ.

Виконання верифікації має виконуватися незалежною групою – особами, які не брали участі в його реалізації. Для верифікації ПЗ категорії функціональної безпеки «А» та «В» особи, що проводять верифікацію, мають бути адміністративно незалежні від розробників (мати різне керівництво, працювати в різних підрозділах чи організаціях). Спількування між групою верифікації та розробників повинно відбуватися в письмовому вигляді з забезпеченням можливості перевірки.

Дії з верифікації мають відбуватися відповідно до плану верифікації. Цей план створюється верифікаційною групою. В ньому мають бути документально оформлені всі використовувані критерії, методи та інструменти, а також всі дії, які виконуються для оцінки кожного об'єкту.

Верифікації підлягають:

- специфікація вимог до ПЗ;
- специфікація ПЗ;
- план валідації ПЗ;
- реалізація (для ПЗ категорії функціональної безпеки «А»).

Верифікація специфікації вимог до програмного забезпечення має встановити впевненість у повноті формування вимог до ПЗ відповідно до загальних вимог системи.

Верифікація специфікації програмного забезпечення має стосуватися:

- аналізу відповідності до специфікації вимог;
- зрозумілості для розробників;
- можливості технічної реалізації;
- розбиття на функціональні модулі (для категорії «А»).

Для ПЗ категорії «А» додатково вимагається верифікація його реалізації.

Верифікація ПЗ категорії «А», що реалізоване з використанням універсальних мов програмування, складається з наступних кроків:

– аналіз та тестування вихідного коду. Аналіз може відбуватися з використанням автоматизованих інструментів;

– функціональне тестування модулів. Цей крок має підтвердити, що модуль виконує всі необхідні функції та не виконує непередбачених;

– інтеграційне тестування модулів. Цей крок має продемонструвати, що модулі вірно взаємодіють один з одним.

Верифікація реалізації ПЗ категорії «А», що реалізоване з використанням проблемно-орієнтованих мов, повинна відбуватися за допомогою візуальної перевірки або за допомогою автоматичних інструментальних засобів. Ці засоби повинні мати можливість змодельовувати роботу програмного забезпечення в режимі відлагодження. Процес верифікації має підтвердити, що всі елементи ПЗ реалізовані вірно та виконують необхідні функції відповідно до специфікації вимог до ПЗ.

Також верифікації підлягає конфігурація раніше розробленого ПЗ, що атестоване та використовується в проекті. Верифікація може відбуватися методами візуальної перевірки, за допомогою використання інструментальних засобів, або шляхом комбінування методик.

Результати верифікації мають оформлюватися документально та аналізуватися розробниками з метою усунення виявлених невідповідностей.

**Інтеграція ПЗ до КСУ.** Етап інтеграції передбачає об'єднання верифікованих модулів апаратного забезпечення та ПЗ в єдину завершену систему. Він має відбуватися за попередньо розробленим планом. Процес інтеграції відбувається за наступними кроками:

– збирання та з'єднання модулів апаратного забезпечення у відповідності до проекту;

– збирання завершеного ПЗ з програмних модулів;

– завантаження ПЗ в технічні засоби, для яких воно розроблялося;

– перевірка відповідності ПЗ специфікації проекту;

– перевірка інтерфейсів між апаратним та програмним забезпеченням;

– перевірка функціонування ПЗ на конкретному апаратному забезпеченні.

Результати верифікації інтегрованої системи мають бути документально оформлені. У звіті мають бути вказаний перелік апаратного забезпечення та ПЗ, випробувального обладнання, параметри їх налаштувань, а також будь-які виявлені дефекти та невідповідності.

**Валідація ПЗ.** За результатами інтеграції системи вимагається проведення тестувань в її кінцевій конфігурації, включаючи кінцеву версію ПЗ. Перевірка має перевірятися за допомогою моделювання вхідних сигналів та даних, які існують під час експлуатації. Перевіркою має бути охоплені:

– всі функції, що реалізуються в ПЗ;

– всі діапазони сигналів та параметрів;

– логіка та алгоритми роботи;

– захист від помилок оператора та відмов інших систем.

За результатами валідації має бути створена документація, яка повинна включати в себе всі виявлені невідповідності та дефекти.

**Висновки.** Після завершення реалізації ПЗ розробниками мають відбутися етапи верифікації ПЗ, інтеграції ПЗ до КСУ та валідації ПЗ в складі КСУ. Мета цих етапів – перевірити якість розробленого ПЗ та відповідність його специфікації вимог. Будь-який етап може створити ітерацію в процесі розробки при виявленні дефекту. В цьому випадку інформація про виявлений дефект повинна бути передана розробникам ПЗ для аналізу та усунення, після чого має відбутися повторна перевірка.

Глибина верифікації та валідації залежить від категорії функціональної безпеки ПЗ. Наприклад, одна з основних особливостей верифікації ПЗ категорії «А» – необхідність верифікації його реалізації: архітектури та вихідного коду.

### **Аналіз вимог до етапу встановлення, експлуатації та модифікації**

**Встановлення та експлуатація.** Після завершення етапів реалізації, інтеграції та валідації розпочинається етап встановлення КСУ та його експлуатації на АЕС. Стандарти ІЕС 60880 та ІЕС 62138 описують вимоги до встановлення, взаємодії між операторами та ПЗ КСУ, які стосуються установки, захищеності (для ПЗ категорії «А»), навчання операторів, а також дій у випадку виявлення аномалій.

Вимагається, щоб після встановлення ПЗ на місці експлуатації була передбачена процедура тестування його функціональності.

Важливою складовою забезпечення безпеки КСУ є дії оператора. Тому стандартами вимагається проведення навчання операторів АЕС та іншого персоналу з контролю та керування користуванням та обслуговуванням ПЗ в необхідних межах. План навчання має охоплювати як нормальні, так і аварійні умови експлуатації. Зокрема, оператор має вміти розпізнавати аномалії в роботі ПЗ. Для набуття оператором необхідних навичок навчальний план має включати як теоретичні знання, так і практичне оволодіння роботою з ПЗ на учбовій системі або тренажерах, які моделюють поведінку реального ПЗ та обладнання.



Якщо під час експлуатації ПЗ спостерігається відхилення його поведінки від очікуваної, вимагається складення протоколу про аномалію, що містить детальну інформацію про проведені дії та наслідки. Ці протоколи підлягають аналізу проєктувальниками для модифікації ПЗ та усунення дефекту.

Стандарт ІЕС 60880 містить додаткові вимоги до захищеності ПЗ категорії «А» на місці експлуатації. Вони передбачають визначення заходів проти потенційних загроз виконанню функцій безпеки КСУ. Узагальнено ці вимоги можна звести до того, під час будь-яких дій з ПЗ має бути забезпечена функціональна безпека КСУ. Наприклад, такі дії як обслуговування, модифікація чи оновлення ПЗ можуть виконуватися при роботі АЕС на потужності. Через це повинні бути передбачені можливості блокування окремих функцій ПЗ, видачі аварійної сигналізації, заборона або використання окремих інтерфейсів під час обслуговування чи модифікації. Також дії, що впливають на захищеність, мають виконуватися оператором тільки з визначених місць (наприклад, не виконуватися з непередбачених робочих станцій з віддаленим керуванням).

**Модифікація ПЗ.** Протягом всього ЖЦ ПЗ може виникнути необхідність модифікації ПЗ з причин зміни функціональних вимог, технічного забезпечення або виявлення аномалій під час тестування або експлуатації. Для виконання модифікації має бути розроблена документально оформлена процедура керування модифікацією.

В разі виявлення необхідності в модифікації ПЗ має бути створений запит на модифікацію. В ньому має вказуватися причина, область застосування та ініціатор запиту. Вимагається, щоб цей запит був проаналізований розробниками. Аналіз має включати в себе доцільність змін, можливий вплив на інші частини системи тощо.

В разі ухвалення рішення про проведення модифікації вона виконується з подальшим проведенням процедур верифікації та валідації всіх частин КСУ, на які має вплив. Якщо модифікація стосується ПЗ обладнання, що знаходиться в роботі, розробники та тестувальники програмного забезпечення мають мати доступ до аналогічної конфігурації обладнання для верифікації та валідації.

Всі документи, на які впливає модифікація, мають бути змінені та зареєстровані в архіві з управління модифікаціями проєкту.

**Висновки.** Функціональна безпека КСУ забезпечується за умови вірного встановлення та кваліфікованої експлуатації її програмного забезпечення. Це можливо завдяки постійному контролю за станом ПЗ на місці експлуатації кваліфікованим персоналом. Персонал, що експлуатує КСУ, повинен мати зв'язок з представниками розробника для передачі інформації про виявлені аномалії в роботі та загальний досвід експлуатації системи.

#### Таблиця розподілення вимог до ПЗ

В результаті досліджень стандартів ІЕС 60880 та ІЕС 62138 до розробки ПЗ КСУ АЕС, важливих для безпеки, їх основні вимоги зведено до табл. 4.

Таблиця 4 – Основні вимоги до розробки ПЗ КСУ АЕС

Вимога	Категорія ПЗ		
	«А»	«В»	«С»
<b>Керування розробкою</b>			
Розподіл процесу розробки ПЗ на етапи та види діяльності	+	+	+
Документальне оформлення мети, зв'язків, вхідних та вихідних даних кожного етапу	+	+	+
Верифікація досягнення необхідної якості після виконання кожного етапу	+	+	+
Документування результатів виконання кожного етапу	+	+	+
<b>План забезпечення якості</b>			
Виконання всіх видів діяльності компетентними особами	+	+	+
Документальне визначення, оформлення та ідентифікація всіх інструментальних засобів та меж їх застосування	+	+	+
Чітке визначення специфічних термінів, скорочень та позначень	+	+	+
Необхідність відслідковування та вирішення всіх проблем забезпечення якості	+	+	+
Обґрунтування відхилень від умов та вимог стандартів	+	+	+
Звіт виконання кожного пункту плану забезпечення якості	+	-	-
<b>Загальні вимоги до розробки ПЗ</b>			
Розподілення ПЗ та конфігураційних даних на типи	+	+	+
Керування конфігурацією ПЗ	+	+	+
Захищеність ПЗ під час розробки	+	-	-
Реалізація допомогою універсальних мов	+	+	+
Реалізація допомогою проблемно-орієнтованих мов	+	+	+
<b>Специфікація вимог до ПЗ</b>			
Специфікація вимог має визначати, що робить програма, а не те, як вона це робить	+	+	+
Строгий опис вимог до ПЗ	+	-	-
Вимоги до захищеності ПЗ	+	-	-
Вимоги до самоконтролю ПЗ	+	+	-
Вимоги до періодичного тестування функцій ПЗ	+	-	-
Вимоги до захисту від відмови з спільної причини	+	+	+
<b>Проектування та реалізація</b>			
Модульний принцип, проектування «згори-вниз»	+	+	+
Код програми має бути простим і зрозумілим	+	-	-
Уникнення ускладнених прийомів кодування, рекурсії, «стиснення» коду	+	-	-
Код програми має відповідати документально оформленим правилам	+	+	-
Наявність повної документації зі створеного ПЗ	+	+	+
<b>Інструментальні засоби</b>			
Висока якість	+	+	+
Низький ризик внесення дефектів	+	+	+
Точна ідентифікація	+	+	-
Атестація та сертифікація	+	-	-

Вимога	Категорія ПЗ		
	«А»	«В»	«С»
<b>Мови програмування та транслятори</b>			
Чіткі правила семантики та синтаксису	+	-	-
Використання «безпечного», скороченого варіанту мови	+	-	-
Наявність перевіреного транслятора	+	-	-
Використання інструментального ПЗ для автоматизованої перевірки	+	-	-
<b>Універсальні мови програмування</b>			
Правила програмування, які легко верифікувати	+	+	-
Верифікація дотримання правил та стандартів кодування	+	+	-
Забезпечення чітко детермінованої поведінки ПЗ	+	+	-
Статична типізація	+	+	-
Написання вихідного коду з дотриманням вимог додатку «В» (стандарту ІЕС 60880)	+	-	-
<b>Проблемно-орієнтовані мови програмування</b>			
Методи формалізації мови є простими, зрозумілими, стандартного представлення, без небезпечних елементів.	+	-	-
Формат представлення, зрозумілий для технологів-спеціалістів	+	-	-
Проста структура програмного коду, що генерується	+	-	-
<b>Раніше розроблене ПЗ</b>			
Оцінка функціональної придатності	+	+	+
Оцінка якості	+	+	+
Оцінка досвіду експлуатації	+	+	+
Наявність виявлення та стійкість до відмов	+	+	-
Стійкість до помилок операторів	+	+	-
Наявність документації з системних вимог, інтерфейсів, безпеки, самоконтролю	+	+	-
<b>Верифікація</b>			
Верифікаційна група не містить осіб, що брали участь в реалізації ПЗ	+	+	+
Верифікаційна група адміністративно незалежна від групи розробників ПЗ	+	+	-
Верифікація специфікації вимог до ПЗ	+	+	+
Верифікація правил реалізації ПЗ	+	+	-
Верифікація конфігурації раніше розробленого ПЗ	+	+	-
Верифікація вихідного коду нового ПЗ	+	-	-
<b>Інтеграція</b>			
Верифікація процесу інтеграції	+	-	-
Наявність процедури виправлення дефектів	+	-	-
<b>Валідація</b>			
Використання статичного та динамічного моделювання всіх вхідних сигналів	+	-	-
Повне тестування всіх функцій	+	-	-
Тестування відповідності функцій, характеристик та інтерфейсу ПЗ кожному пункту специфікації	-	+	-
Тестування відповідності функцій, характеристик та інтерфейсу ПЗ кожному пункту специфікації, важливого для безпеки	-	-	+

Вимога	Категорія ПЗ		
	«А»	«В»	«С»
Оцінка результатів валідації особами, які не брали участі в реалізації	+	+	+
<b>Модифікація</b>			
Наявність процедури запиту на модифікацію	+	-	-
Незалежна оцінка запитів на модифікацію	+	-	-
Для випробування використовується конфігурація, ідентична реальній системі	+	-	-
Верифікація та валідація після проведених модифікацій	+	+	+
Корекція документів, на які впливає документація	+	+	+
Реєстрація документів з модифікації в архіві	+	-	-
<b>Встановлення та експлуатація</b>			
Захищеність ПЗ на місці експлуатації	-	-	-
Навчання операторів	-	-	-
Наявність процедури створення звіту про аномалію	+	+	+

### Засоби імплементації вимог

Стандарти розробки ПЗ КСУ АЕС, важливих для безпеки – ІЕС 60880 та ІЕС 62138 – містять вимоги до всіх етапів ЖЦ ПЗ. Як вже зазначалося, дотримання вимог цих стандартів дозволяє створити ПЗ високого ступеню надійності.

Для дотримання вимог стандартів під час розробки необхідно дотримуватися певних правил. Спираючись на дослідження цих вимог, а також на досвід автора під час розробки ПЗ КСУ АЕС науково-виробничим підприємством «Радій» (м. Кропивницький, Україна), можна сформулювати основні правила, методи та заходи, які забезпечують створення ПЗ високої якості.

На етапі створення специфікації вимог до ПЗ важливі наступні фактори:

- отримання від замовника повної та всеосяжної специфікації вимог до КСУ;
- чітке визначення всіх функцій майбутнього продукту;
- детальний опис всіх вимог в специфікації апаратних засобів;
- детальний опис всіх вимог до ПЗ;
- чітке планування етапів розробки у відповідності до технологій, що використовуються;
- постійний зв'язок з представниками замовника для уточнення можливих запитань.

На етапі проектування та реалізації ПЗ важливі наступні фактори:

- наявність розробників-програмістів високої кваліфікації;
- наявність достатніх технічних засобів;
- обґрунтований та свідомий вибір мов програмування та інструментальних засобів;
- використання найкращих практик програмування: актуальних стандартів кодування, дотримання coding-guides для обраних мов, застосування безпечних прийомів програмування;

- постійне тестування коду;
- використання «гнучких» технологій програмування та взаємодії в команді, наприклад технології SCRUM [8];
- використання підходу CI/CD (Continuous Integration/Continuous Deployment);
- чітка ідентифікація версій ПЗ та документації до нього.

На етапі верифікації та валідації важливі наступні чинники:

- детальне вивчення специфікації вимог до КСУ та ПЗ;
- повнота тестувань;
- підтримка постійного зв'язку з розробниками;
- формування якісної документації за результатами перевірок.

На етапі впровадження та експлуатації важливі наступні чинники:

- якісне виконання монтажу системи та встановлення ПЗ;
- контроль за версіями та конфігурацією встановленого ПЗ;
- надання персоналу АЕС повної документації на всі компоненти КСУ;
- якісне навчання персоналу для роботи з КСУ;
- дотримання постійного зв'язку між персоналом АЕС та розробниками КСУ для збору інформації про досвід експлуатації, проблеми та запитання що виникають, а також оперативної обробки запитів на модифікацію.

**Висновок.** Як приклад, дотримання вимог стандартів розробки дозволило науково-виробничому підприємству «Радій», провідним інженером-програмістом якого є автор, розробити та поставити велику кількість КСУ на АЕС України, Болгарії, Канади, Аргентини та інших країн станом на 2023 рік. Ці КСУ успішно експлуатуються протягом багатьох років.

### Проблема оцінки відповідності стандарту

Після розробки ПЗ КСУ АЕС відповідно до вимог стандартів IEC 60880 та IEC 62138 виникає необхідність оцінки відповідності процесу розробки та самого ПЗ цим стандартам. Оцінюванню може підлягати як будь-який окремих етап ЖЦ ПЗ, так і весь процес в цілому.

Згідно дослідження змісту стандартів, їх вимоги можна розподілити на «адміністративні» та «технічні». «Адміністративні» вимоги стосуються організації робочого процесу, змісту різноманітних документів, взаємодії між групами розробників тощо і стосуються переважно етапів створення специфікації вимог, верифікації, валідації, інтеграції та супроводу. «Технічні» вимоги стосуються етапів реалізації: вибору мови програмування, створення проекту та реалізації ПЗ конкретними мовами програмування, тобто переважно етапу проектування та реалізації ПЗ.

Оцінку відповідності «адміністративним» вимогам стандартів можна провести, вивчаючи якість виконання кожної вимоги.

Для цього потрібно проводити аналіз як самого робочого процесу, так і зміст документів за резуль-

татами відповідних етапів. Наприклад, в специфікації вимог до ПЗ мають бути вказані прикладні функції, що виконуються ПЗ, і наявність цього можна перевірити.

Оцінку відповідності «технічним» вимогам, зокрема правильності вибору мови програмування та реалізації ПЗ, можна виконати шляхом аналізу вихідного коду програми та його функціональному тестуванню. При цьому відповідність ПЗ вимогам специфікації можна перевірити, послідовно перевіряючи всі наявні функції ПЗ, а відповідність коду програми правилам кодування можна оцінити, тільки детально аналізуючи код програми. Для проведення аналізу коду програми (нагадаємо, це стосується ПЗ категорії «А») кваліфікація фахівця, який виконує перевірку, в конкретній мові програмування має бути співставною з кваліфікацією програмістів, що реалізували ПЗ.

Як **висновок**, можна відмітити, що в стандартах розробки ПЗ КСУ АЕС не наводиться конкретних методик оцінки та метрик відповідності ПЗ цим стандартам. Виходячи з цього, оцінка відповідності ПЗ вимогам стандартів включає суб'єктивну складову і залежить від методів перевірки, що використовуються в конкретній організації.

### Висновки

Міжнародні стандарти IEC 60880 та IEC 62138 містять важливі вимоги до всіх етапів розробки ПЗ КСУ АЕС, важливого для безпеки. Вимоги стосуються як організаційних питань, так і технічних аспектів. Згідно з цими стандартами, кожне підприємство, що займається розробкою ПЗ КСУ АЕС, має визначити робочі групи, які будуть реалізовувати різні етапи ЖЦ (проектування, реалізація, верифікація тощо).

**Інтерфейси користувача.** Стандарти не містять вимог до інтерфейсів користувача ПЗ. Тому одним з напрямків наступних досліджень стануть вимоги інших міжнародних стандартів – IEC 61772 «Nuclear power plants – Control rooms – Application of visual display units (VDUs)» («Візуальні пристрої відображення») [9] та IEC 62646 «Nuclear power plants – Control rooms – Computer-based procedures» («Комп'ютеризовані процедури») [10], а також вимоги галузевих нормативних документів, таких як NUREG-0700 «Human-System Interface Design Review Guidelines» – «Побудова інтерфейсів «людина-машина» (U.S. Nuclear Regulatory Commission, США) [11].

**Оцінка відповідності ПЗ стандартам.** В стандартах не визначається загальноприйнятих метрик, що вказують ступінь відповідності ПЗ даним стандартам. Виходячи з цього, кожна організація, яка виконує оцінку відповідності ПЗ та КСУ в цілому вимогам стандартів, повинна створити власну методику такої оцінки.

Тому метою наступних досліджень є вивчення засобів оцінки специфікацій вимог, метрик коду ПЗ, критеріїв повноти тестування ПЗ, які можуть бути використані для розробки формальних методик оцінювання ПЗ вимогам стандартів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Nuclear power by country. [Електронний ресурс] – Режим доступу: [https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear\\_power\\_by\\_country](https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_power_by_country).
2. IEC61508-2010: Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems – Part 1: General requirements. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2010.
3. IEC61513-2011: Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – General requirements for systems requirements. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2011.
4. IEC61226-2009: Nuclear power plants – Instrumentation and control important to safety – Classification of instrumentation and control functions. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2009.
5. Safety Classification of Structures, Systems and Components in Nuclear Power Plants: Specific Safety Guide No. SSG-30. Vienna, IAEA, 2014.
6. IEC60880-2006: Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category A functions. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2006.
7. IEC62138-2004: Nuclear power plants – Instrumentation and control important for safety – Software aspects for computer-based systems performing category B or C functions. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2004.
8. Tor Stålhane, Vikash Katta, Thor Myklebust. Scrum and IEC 60880. Norwegian University of Science and Technology, 2013.
9. IEC61772:2009: Nuclear power plants — Control rooms — Application of visual display units (VDUs). Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2009.
10. IEC62646-2019: Nuclear power plants – Control rooms – Computer based procedures. Geneva, International Electrotechnical Commission (IEC), 2012.
11. NUREG-0700 Revision 3. Human-System Interface Design Review Guidelines. U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2020.
12. Вінтенко Б.Ю., Смірнов О.А., Коваленко О.В., Смірнов С.А., Коваленко А.С. «Дослідження нормативних документів та галузевих стандартів розробки програмного забезпечення комп'ютерних систем управління АЕС, важливих для безпеки». *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2023, вип. 2(72), С. 161-180.

Received (Надійшла) 30.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.08.2023

**Study of the requirements of international standards IEC60880 and IEC62138 for the development of software for information and control systems of NPPs important for safety**

Boris Vintenko, Oleksii Smirnov, Anna Kovalenko, Serhii Smirnov, Kostiantyn Buravchenko

**Abstract.** Today, a significant part of electrical energy is produced by nuclear power plants. Atomic energy is a cheap, economically beneficial and ecological way of meeting people's needs with electricity. At the same time, this production is connected with the need to ensure the protection of people and the environment from ionizing radiation of nuclear fuel during normal operation of the plant and in case of emergency situations. Nuclear power plants (NPP) contain a large amount of equipment to ensure technological processes and perform safety functions. **The purpose** of the work is to study the requirements for the formation of the life cycle, the main stages of design and documentation of the software of the computer control systems of nuclear power plants (software CCS NPP), which perform safety functions of categories "A", "B" and "C". Requirements for software performing category A functions are given in the international standard IEC 60880 "Nuclear power plants – Instrumentation and control systems important to safety – Software aspects for computer-based systems performing category A functions", software requirements, performing category "B" and "C" safety functions, specified in the international standard IEC 62138 "Nuclear power plants – Instrumentation and control important for safety – Software aspects for computer-based systems performing category B or C functions". **The object of research** is the process of developing software for computer control systems of nuclear power plants. **The subject is a study** of the requirements of international standards IEC 60880 and IEC 62138 for the development of software for information and control systems of NPPs, important for safety. **As a result of the study**, the general structure of the requirements of the IEC 60880 and IEC 62138 standards was considered, the groups of participants who participate in the development of the software of the NPP CCS and the distribution of software development activities among these groups were determined, the analysis of the requirements of the general requirements and the requirements for the stage was carried out development of the software specification, requirements for the stage of design and implementation of software, requirements for the stage of verification, integration and validation and requirements for the stage of installation, operation and modification, a table of distribution of requirements for software was formed, means of implementation of requirements were studied, the problem of assessment of compliance with the standard was determined. **Conclusions.** The international standards IEC 60880 and IEC 62138 contain important requirements for all stages of the development of the safety-critical NPP control system software. The requirements concern both organizational issues and technical aspects. According to these standards, each enterprise engaged in the development of NPP CCS software must define working groups that will implement various stages of the NPP (design, implementation, verification, etc.). The standards do not contain requirements for software user interfaces. Therefore, one of the directions of further research will be the requirements of other international standards – IEC 61772 "Nuclear power plants – Control rooms – Application of visual display units (VDUs)" ("Visual display units") and IEC 62646 "Nuclear power plants – Control rooms – Computer -based procedures" ("Computerized procedures"), as well as the requirements of industry regulatory documents, such as NUREG-0700 "Human-System Interface Design Review Guidelines" – "Construction of human-machine interfaces" (U.S. Nuclear Regulatory Commission, USA ). The standards do not define generally accepted metrics that indicate the degree of compliance of the software with these standards. Based on this, each organization that performs an assessment of the compliance of software and CSU as a whole with the requirements of the standards must create its own methodology for such an assessment. Therefore, the goal of the following research is to study the means of evaluating requirements specifications, software code metrics, completeness criteria of software testing, which can be used for the development of formal software evaluation methods for the requirements of standards.

**Keywords:** software, computer control systems, nuclear power plants, IEC 60880, IEC 62138.

Д. М. Самченко<sup>1</sup>, О. М. Тихенко<sup>2</sup>, Л. А. Зозуля<sup>3</sup>, Н. Н. Цибульник<sup>4</sup>

<sup>1</sup> Київський національний університет будівництва і архітектури, Київ, Україна

<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Київ, Україна

<sup>3</sup> Міністерство освіти і науки України, Київ, Україна

<sup>4</sup> Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Кременчук, Україна

## ПРОЄКТУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ЕКРАНІВ ГАРАНТОВАНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ГАЛУЗЕЙ ЦИВІЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ ТА ЕЛЕКТРОМАГНІТНОЇ СУМІСНОСТІ

**Анотація.** Розглянуто засади проектування композиційних матеріалів з гарантованим (потрібними) ефективностями. Надано основні співвідношення для оцінювання ефективності проєктованого матеріалу. Головною умовою отримання матеріалу з малими коефіцієнтами відбиття електромагнітних хвиль є наближення хвильового опору поверхневого шару до опору повітря. Розрахунки показали, що для забезпечення мінімально прийняттого коефіцієнта відбиття (0,25–0,30) і достатніми коефіцієнтами поглинання електромагнітної енергії (-20 дБ за потужністю) матеріал повинен бути багатошаровим з середнім шаром високих поглинальних властивостей. Це забезпечується його високою електропровідністю. Можливим варіантом є монотонне зростання електрофізичних властивостей від зовнішньої поверхні до внутрішньої. За необхідності одночасного екранування електромагнітного поля ультрависоких та вищих частот та магнітного поля наднизьких частот (промислової та її гармонік і інтергармонік) матеріал повинен містити магнітний наповнювач. Його об'ємна кількість визначається за формулою Оделевського. Коефіцієнт відбиття у цьому випадку визначається співвідношенням абсолютних магнітної та діелектричної проникностей поверхневого шару. Для спрощення проектування матеріалу феромагнітні частинки наповнювача повинні бути електроізолюваними. При цьому радіопоглинальний матеріал (або шар матеріалу) повинен мати у структурі розгалужені кола провідності. У процесі проектування матеріалу при обиранні матриці обов'язковим є врахування не тільки діелектричних проникностей матеріалів, а й тангенсів кутів діелектричних втрат.

**Ключові слова:** електромагнітний екран, коефіцієнт відбиття, діелектричні втрати.

### Вступ

Забезпечення електромагнітної безпеки людей у виробничих та побутових умовах є одним з пріоритетних напрямів досліджень з цивільної безпеки. В той же час розвиток високих технологій призводить до вкрай високої насиченості виробничого середовища, транспортних засобів електронною апаратурою, яка у несприятливому електромагнітному оточенні може працювати нестабільно. Це вимагає розроблення і впровадження ефективних засобів захисту людей і обладнання від електромагнітних впливів. У багатьох випадках забезпечення електромагнітної безпеки та електромагнітної сумісності є двоєдиною задачею. Але деякі необхідні параметри засобів вирішення двох аспектів цієї задачі не співпадають. Це стосується як загальних ефективностей захисних матеріалів і конструкцій, так і окремих їх властивостей – співвідношення захисту за рахунок відбиття та поглинання електромагнітних хвиль, частотний діапазон захисту, масогабаритні показники тощо. Ці питання необхідно узгодити і розробити порядок проектування засобів захисту на засадах розумної достатності.

### Сучасний стан питання

Більшість екрануючих матеріалів і конструкцій призначені для екранування електричного, магнітного та електромагнітного полів певної частоти, смуги частот або частотного діапазону.

Так, робота [1] стосується магнітної складової електромагнітного поля промислової частоти. У ній розглядаються гратчасті довгі конструкції, які замикають на себе силові лінії магнітного поля.

У роботі [2] також розглядаються гратчасті структури, але вони стосуються електромагнітних полів ультрависоких і вищих частот. За своїми властивостями вони призначені для екранування полів конкретних частот, у залежності від розмірів комірки.

Суцільні екрани з прийнятною універсальністю, наприклад [3] вироблені на базі магнітної рідини. Такі матеріали складні у практичному застосуванні і мають велику вартість через вартість колоїдного розчину нанозаліза. Існує багато досліджень і розробок щодо матеріалів з широким спектром захисту [4–6].

Але досягається за рахунок великої товщини матеріалу (до 10 мм). При цьому для забезпечення малих коефіцієнтів відбиття матеріал повинен бути або багатошаровим, або піддаватися спеціальній обробці у магнітному полі з метою забезпечення імпедансу поверхневого шару, що наближається до показника повітря (377 Ом). Труднощі із забезпеченням широкосмуговості матеріалу обумовлені різними фізичними механізмами екранування низькочастотних та високочастотних електромагнітних полів. Головним чином це стосується магнітного поля промислової частоти і електромагнітних полів ультрависоких частот. Для екранування магнітної складової поля промислової частоти матеріал повинен мати наповнювач з прийнятними магнітними проникностями, а для високочастотних полів головним фактором є провідність матеріалу.

В останні роки виконано низку досліджень з розробки тонких екрануючих поверхонь [7, 8]. Широкошмуговість досягається вмощенням у полімерну матрицю магнітного матеріалу (магнетиту) та графіту

високої провідності. У якості в'язучого матеріалу застосовується графітізована сажа. За високих захисних властивостей ці матеріали мають високу вартість.

Тому їх застосування прийнятне для забезпечення електромагнітної сумісності електронного обладнання великої вартості.

Більш прості за складом матеріали на рідкій основі (фарби) з вмістом концентрату залізної руди та лускатого графіту для багатьох виробничих умов мають недостатню ефективність [9, 10]. Значною мірою така ситуація обумовлена недостатньою розробленістю теоретичних та експериментальних засад проектування матеріалів для захисту людей та забезпечення електромагнітної сумісності електричного та електронного обладнання.

**Мета роботи** – розроблення методології проектування електромагнітних екранів із заданими захисними властивостями, придатними для забезпечення електромагнітної безпеки людей та електромагнітної сумісності технічних засобів.

### Викладення основного матеріалу

У загальному випадку ступінь екранування електромагнітного поля визначається загальним коефіцієнтом екранування та коефіцієнтом відбиття електромагнітних хвиль (безрозмірні величини). Ефективністю екранування традиційно вважається визначення параметрів у логарифмічних одиницях (дБ). Так, загальна ефективність екранування електромагнітного поля

$$SE_T = 10 \lg \left( \frac{1}{T} \right).$$

Ефективність екранування за рахунок відбиття

$$SE_R = 10 \lg \left( \frac{1}{1-R} \right).$$

Тобто, для створення електромагнітного екрана необхідної ефективності потрібні значення коефіцієнтів проходження електромагнітного поля  $T$  та коефіцієнта відбиття  $R$ .

У процесі проектування захисного матеріалу або конструкції слід визначитися, за яким параметром визначається ефективність екранування. У разі оцінювання змін напруженості електричного поля перед знаком  $\lg$  береться коефіцієнт 10. Якщо оцінюються втрати потужності випромінювання  $P$ , то береться коефіцієнт 20 ( $P \sim E^2$ ). У практичній діяльності використовуються усі зазначені кількісні оцінки зміни параметрів електромагнітних полів захисним матеріалом.

Для діелектричних матеріалів захисні властивості визначаються їх комплексною діелектричною проникністю.

$$\hat{\varepsilon} = \varepsilon' + i\varepsilon'' = \varepsilon + i \frac{\sigma}{\omega \varepsilon_0},$$

де  $\varepsilon$  – діелектрична проникність,  $\sigma$  – питома провідність,  $\omega$  – циклічна частота випромінювання,  $\varepsilon_0$  – електрична стала.

Для високочастотної області електромагнітного спектра найбільш критичною є дійсна складова діелектричної проникності.

За низьких електропровідностей коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль за потужністю визначається як:

$$K_R = \left( \frac{\sqrt{\varepsilon_M} - 1}{\sqrt{\varepsilon_M} + 1} \right)^2,$$

де  $\varepsilon_M$  – відносна діелектрична проникність матеріалу.

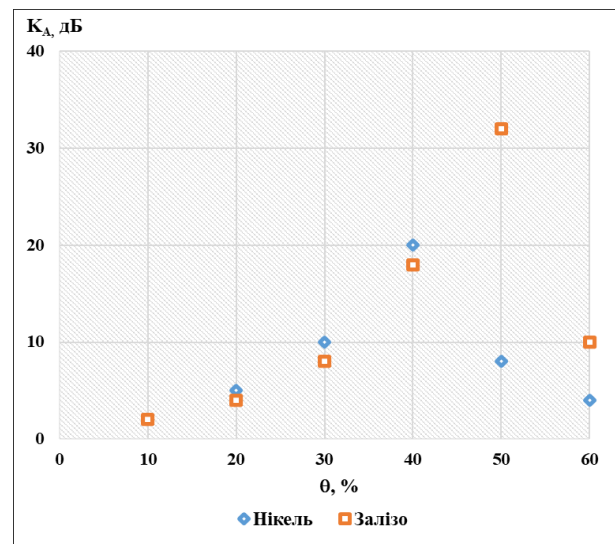
Виходячи з цього співвідношення, діелектрична проникність поверхневого шару захисного матеріалу повинна бути мінімальною, тобто наближатися до показника повітря ( $\varepsilon_n = 1$ ).

Але при цьому необхідно забезпечити достатній рівень поглинання енергії електромагнітної хвилі, тобто значення  $K_A$ .

Коефіцієнт поглинання функціонально залежить від питомої електропровідності матеріалу. Причому різке зростання коефіцієнта поглинання відбувається при досяжності перколяційного ефекту – різкого зростання електропровідності за певних співвідношень непровідного та провідного компонента у матеріалі [5].

Це має наслідком зміну діелектричної проникності матеріалу у бік підвищення, що можна визначити розрахунком із застосуванням співвідношення Максвелла-Гарнета. У результаті підвищується коефіцієнт відбиття, що є небажаним у більшості прикладних задач.

Залежність коефіцієнта поглинання від вмісту металів дисперсністю 60–100 мкм наведено на рис. 1.



**Рис. 1.** Залежність коефіцієнта поглинання електромагнітного випромінювання ультрависокої частоти від вмісту металевого порошку

Для вирішення цієї проблеми доцільно застосувати багат шарову структуру. Умовами її ефективності є:

– зовнішній шар повинен мати мінімальну діелектричну проникність, прийнятну для забезпечення механічних властивостей;

– вміст радіопоглинальних частинок або структур повинен забезпечувати монотонне зростання уявної складової ефективної діелектричної проникності від зовнішньої поверхні до внутрішньої і максимальне згасання електромагнітної хвилі на шляху до внутрішньої поверхні. Внутрішню поверхню за необхідності високої ефективності екранування доцільно зробити металевую. Товщини шарів узгоджуються з урахуванням інтерференційних явищ;

– дисперсійна залежність поглинання за частотами повинна забезпечити прийнятну рівномірність поглинання за усією смугою частот. Небажаним є суттєві відбиття на границях розділу шарів.

У багатьох випадках одночасно з екрануванням високочастотного електромагнітного поля потребує екранування електромагнітне поле наднизької частоти (промислової та її гармонік і інтергармонік). Якщо з електричною складовою таких полів проблем не виникає через провідність радіопоглинального шару, то екранування магнітної складової потребує наявності у матеріалі наповнювача з магнітними властивостями.

Це автоматично призводить до зміни імпедансу матеріалу. У даному випадку він визначається співвідношенням  $\sqrt{\mu/\epsilon}$ , де  $\mu$ ,  $\epsilon$  – відповідно абсолютні магнітна та діелектрична проникності матеріалу. Слід враховувати, що за складного складу, магнітну проникність потрібно визначати окремо. Це можна зробити експериментально або розраховувати за формулою Оделевського. Для матеріалу з діелектричними властивостями коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль можна оцінити з емпіричного співвідношення:

$$\frac{d\sqrt{\epsilon}}{\lambda_{\min}} < 0,3,$$

де  $d$  – товщина матеріалу,  $\lambda_{\min}$  – мінімальна довжина хвилі екранованого електромагнітного поля, 0,3 – максимально прийнятний коефіцієнт відбиття.

Для матеріалу з магнітними властивостями у загальному випадку:

$$|\lg R_p| (\lambda_{\max} - \lambda_{\min}) < 2\pi^2 \sum_i \mu_i d_i,$$

де  $R_p$  – максимальний коефіцієнт відбиття електромагнітних хвиль за потужністю,  $\lambda_{\max}$ ,  $\lambda_{\min}$  – максимальна і мінімальна довжини хвиль екранованого поля,  $\mu_i$  – відносна магнітна проникність кожного  $i$ -го шару матеріалу,  $d_i$  – його товщина.

Застосування цього співвідношення дає прийнятні результати для усього діапазону ультрависоких частот.

Екранування магнітної складової досягається за рахунок достатньої магнітної проникності матеріалу за рахунок магнітних втрат.

При цьому магнітні частинки повинні бути ізолювані, що спрощує процес розрахункового оцінювання електрофізичних і магнітних властивостей матеріалу або кожного шару матеріалу.

Головними вимогами при проектуванні таких матеріалів є:

- наявність кіл провідності;
- наявність ізолюваних одна від одної магнітних частинок;
- забезпечення згасання електромагнітного поля за рахунок діелектричних втрат,
- мінімальна різниця хвильових опорів на границі повітря/поверхня матеріалу.

При обиранні матеріалу матриці композиційного матеріалу слід враховувати не тільки діелектричні проникності, а і тангенсу кутів діелектричних втрат. Наприклад, діелектричні проникності полістиролу і полівінілхлориду близькі за значенням (2,3–2,5 та 2,4–2,7 відповідно), але тангенси кутів діелектричних втрат суттєво відрізняються ( $2 \cdot 10^{-4}$  та  $5 \cdot 10^{-2}$  відповідно).

Тому для виготовлення радіопоглинальних покриттів у високочастотній області спектра полівінілхлорид має суттєві переваги.

У практичній роботі з розроблення захисних композицій з функціями екранування магнітних полів наднизької частоти застосовується латекс. Але він у звичайному стані має діелектричну проникність до 14. Тому для узгодження хвильових опорів та великих коефіцієнтів екранування у матрицю доцільно додавати наповнювач з високими магнітними проникностями.

Застосування латексу у вигляді пінолатексу знижує діелектричну проникність до 4, тому у якості наповнювача можливо застосовувати магнетит.

При обиранні матеріалу матриці (полімеру або лакофарбового носія) слід враховувати можливі процеси деградації матеріалу у процесі експлуатації. Наприклад, поліетилени мають схильність до зміни механічних властивостей під впливом знакозмінних термічних навантажень. Головною проблемою тут є не руйнування матеріалу, а зміна його діелектричної проникності. Тобто у процесі проектування слід заздалегідь визначитися у якому місці захисний екран буде застосовуватися (ззовні або усередині приміщення). Досвід випробувань і ознайомлення з характеристиками матеріалів розроблених за складними технологіями свідчить, що у багатьох випадках такі матеріали є метастабільними, тобто з часом втрачають свої вихідні властивості (механічні, електрофізичні тощо). Це притаманне багатокомпонентним композиціям з великою кількістю складових.

Наприклад, більшість захисних матеріалів на основі наночастинок втрачають свої властивості через зміни електропровідності або магнітної проникності готової суміші. Тобто у процесі проектування матеріалу у конструктивні рішення необхідно закласти певні вимоги.

Основними з них є:

- ефективність матеріалу з точки зору його основного функціоналу;
- умови експлуатації матеріалу з точки зору фізичних і хімічних впливів на нього;
- необхідні гарантовані терміни експлуатації.

У реальних виробничих умовах ті чи інші вимоги можуть бути головними. Крім того можливі додаткові специфічні вимоги до матеріалу, наприклад,



неможливість його заміни, необхідність підвищення ефективності тощо.

### Висновки

1. Головною задачею проектування електромагнітних екранів потрібної ефективності є узгодженість хвильових опорів повітря та поверхневого шару матеріалу. Слід враховувати переважний вплив на захисні властивості у високочастотній області електромагнітного спектра дійсної складової комплексної діелектричної проникності матеріалу.

2. Для досягнення високих захисних властивостей матеріалу одночасно з малими коефіцієнтами

відбиття електромагнітних хвиль матеріал повинен бути багатозаровим, або таким, у якому забезпечено поступове зростання електрофізичних параметрів від зовнішньої поверхні до внутрішньої.

3. Для одночасного екранування електромагнітних полів ультрависоких та вищих частот і магнітних полів наднизьких частот у матеріал додається магнітний наповнювач. Для спрощення розрахункового визначення електрофізичних параметрів кінцевого матеріалу магнітні частинки повинні бути електроізолювані. При обиранні матеріалу матриці слід враховувати не тільки діелектричну проникність матеріалу, а і тангенс кута діелектричних втрат.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Grinchenko V.S. Mitigation of three-phase power line magnetic field by grid electromagnetic shield. *Tekhnichna Elektrodynamika*. 2018. Vol. 2018, Issue 4. P. 29–32. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.029>.
2. Панова О.В. Дослідження захисних властивостей металевих електромагнітних екранів та визначення умов їх максимальної ефективності. Системи управління навігації та зв'язку. 2020. 2(60), с. 127–130. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2020.2.127>.
3. Glyva V.A., Podoltsev A.D., Bolibrukh B.V., Radionov A.V. A Thin Electromagnetic Shield of a Composite Structure Made On the Basis of a Magnetic Fluid. *Tekhnichna elektrodynamika*. 2018. № 4. P.14–18. <https://doi.org/10.15407/techned2018.04.014>.
4. Kefeng JI; Jun GAO; Xiangyu CAO; Jiangfeng HAN; Huanhuan YANG. Design of Ultra-wideband Low RCS Reflecting Screen Based on Phase Gradient Metasurface. *Radioengineering*. Jun 2021, Vol. 30 Issue 2, p. 314-322. <https://doi.org/10.13164/re.2021.0314>.
5. Glyva V., Levchenko L., Panova O., Tykhenko O., Radomska M. The composite facing material for electromagnetic fields shielding. *Innovative Technology in Architecture and Design (ITAD 2020): IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2020. Vol. 907. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/907/1/012043/meta> (дата звернення: 23.05.2023).
6. Glyva, V., Kasatkina, N., Nazarenko, V., Burdeina, N., Karaieva, N., Levchenko, L., Panova, O., Tykhenko, O., Khalmuradov, B., Khodakovskyy, O. Development and study of protective properties of the composite materials for shielding the electromagnetic fields of a wide frequency range. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2020, 2(12-104), pp. 40–47. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2020.201330>.
7. Butenko O., Boychuk V., Savchenko B., Kotsyubynsky V., Khomenko V., Barsukov V. Pure ultrafine magnetite from carbon steel wastes. *Materials Today: Proceedings*. 2019. V. 6, pp. 270–278.
8. Senyk I., Kuryptia Y., Barsukov V., Butenko O., Khomenko V. Development and application of thin wide-band screening composite materials. *Physics and Chemistry of Solid State*. 2020. 21(4). Pp. 771–778.
9. Glyva, V., Bakharev, V., Kasatkina, N., Levchenko, O., Levchenko, L., Burdeina, N., Guzii, S., Panova, O., Tykhenko, O., Biruk, Y. Design of liquid composite materials for shielding electromagnetic fields. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2021, 3(6-111), pp. 25–31. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2021.231479>.
10. Бурдейна Н.Б., Бірук Я.І. Засоби підвищення ефективності рідинних матеріалів для екранування електромагнітних полів широкого частотного діапазону. Системи управління, навігації та зв'язку. 2022. Т. 4 (70). С. 138-141. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.4.138>.

Received (Надійшла) 30.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 02.08.2023

### Design of electromagnetic screens of guaranteed efficiency for civil security and electromagnetic compatibility

D. Samchenko, O. Tykhenko, L. Zozulya, N. Thibulnik

**Abstract.** The principles of designing composite materials with guaranteed (required) efficiency are considered. The main ratios for evaluating the efficiency of the designed material are given. The main condition for obtaining a material with low reflection coefficients of electromagnetic waves is the approximation of the wave resistance of the surface layer to the air resistance. Calculations showed that in order to ensure a minimally acceptable reflection coefficient (0.25–0.30) and sufficient absorption coefficients of electromagnetic energy (-20 dB in power), the material should be multi-layered with a middle layer of high absorption properties. This is ensured by its high electrical conductivity. A possible option is a monotonous increase in electrophysical properties from the outer surface to the inner one. If it is necessary to simultaneously shield the electromagnetic field of ultra-high and higher frequencies and the magnetic field of ultra-low frequencies (industrial and its harmonics and interharmonics), the material must contain a magnetic filler. Its volumetric amount is determined by Odelevsky's formula. The reflection coefficient in this case is determined by the ratio of the absolute magnetic and dielectric permeabilities of the surface layer. To simplify the design of the material, the ferromagnetic particles of the filler should be electrically insulated. At the same time, the radio-absorbing material (or material layer) must have branched conduction circles in the structure. In the process of designing the material, when choosing the matrix, it is mandatory to take into account not only the dielectric constants of the materials, but also the tangents of the dielectric loss angles.

**Keywords:** electromagnetic shield, reflection coefficient, dielectric losses.

Elshan Hashimov<sup>1,3</sup>, Roman Maharramov<sup>2</sup>, Elkhan Sabziev<sup>2,4</sup>, Adalat Pashaev<sup>2,4</sup>

<sup>1</sup>National Defense University, Baku, Azerbaijan

<sup>2</sup>Military Scientific Research Institute, Baku, Azerbaijan

<sup>3</sup>Azerbaijan Technical University, Baku, Azerbaijan

<sup>4</sup>Institute of Control Systems, Baku, Azerbaijan

## ASSESSMENT of DEAD ZONE OF JOINTLY OPERATING RADARS

**Abstract. Research relevance.** With the emergence of unmanned aerial vehicles, the assignments of combating them have also become significantly more relevant. Today, operational countermeasures against UAVs are of great importance. Modern UAVs are capable not only of conducting video reconnaissance in a certain area, but also of observing a specific object for a long time and striking it. After detecting and identifying UAVs by RLS, it is necessary to take measures to neutralize them. In the paper, a mathematical model of the evaluation of the dead zone of RLS working together for the effective detection of unmanned aerial vehicles was established and a comparison of the dead zones was made on concrete examples. The **purpose** of the research work is to solve the problem of effective placement of jointly operating RLS by mathematical methods for nonobserved remaining part of them had minimal volume and to select the necessary placement scheme. The following **tasks** are solved in the article: analysis of the characteristics of the radar field; development of a mathematical model for evaluating the dead zone of joint radar stations; evaluation of some accommodation options. The following **research methods** are used to solve the issues: theoretical analysis, mathematical modeling, comparative analysis. The following **results** were obtained: it was observed that the dead zone was reduced by 1.6 times in the four-station square arrangement scheme, and by 1.3 times in the three-station triangular arrangement scheme. **Conclusions:** From the comparison of the obtained numbers, it can be concluded that the creation of a radiolocation area by placing RLSs on the vertices of equilateral triangles (in the form of a checkerboard) is more economically profitable, as it requires fewer stations.

**Keywords:** unmanned aerial vehicles, dead zone, radiolocation area, effective reflection area, radiolocation station.

### Introduction

Analysis of the 2020 Patriotic War and the ongoing Russian-Ukrainian war, as well as recent occurring local wars and conflicts, shows that the detection of UAVs is one of the main issues for combating them [1-4]. For a more effective fight against UAVs, it is important factor to quickly detect them both at long distances and in the dead zone [5-7].

Modern local conflicts, where high-precision weapons and military equipment are more involved, impose new requirements for conducting combat operations. UAVs, in turn, at the present stage of the development of science and technology are being developed more and more, creating many difficulties for air defense systems. These difficulties are related to the following factors:

- small effective reflection area, i.e. small radiolocation visibility (effective reflection area 0,01-0,001 m<sup>2</sup>), visual detection less than 100 m (in ideal weather conditions), the hearing of the sound is 15-50 m, (0,5 Wt/rad) olması;

- low flight speeds (10-30 m/sec), wide diapason of movement speeds, performance of flights at low and minimum altitudes using the terrain;

- to have the little time for obtaining information about the type of object according to its spatial (geometric) characteristics and making a timely decision;

- in the characteristics of the RLS, there are so-called "dead zone" with a radius of tens of kilometers, where it is impossible to detect and track aerial objects [8-10].

In order to increase the probability of detecting targets (increasing the effectiveness), the minimum size (volume) of the dead zone is one of the main conditions.

This task was considered in [5]. In this work it is shown that one of the problems of modern radio engineering troops is the impossibility of detecting low-altitude small-sized air objects over the position of a radio engineering unit. This is due to the presence of a dead zone (funnel) of surveillance radar detection zones. The solution to this problem can be the use of mobile small-sized vertical sounding radars.

In [11] the issues of assessing the visibility zone of radar station in a noise-free environment and under the influence of interference are considered. An algorithm for complex estimation of radar parameters is proposed. The relation of the tactical characteristics of the radar with its technical characteristics and the targets is considered.

In [12] the new generalized indicator of the technical and economic analysis and a choice of options of creation of land radio engineering means of a special purpose on the basis of convolution of indicators tactical and technical (power) and operational technical characteristics is offered.

In [13] the problem of creating a continuous field in the army's operational range by ground-based radars with a lower boundary height of 300-500 meters in front of the forward edge and in tactical depth is considered. At the same time, the height of the upper boundary of the radar field, as a rule, is not set and is determined by the capabilities of the radar, which are in service with air defense units.

However, in the above works, the method for selecting radar layouts to reduce radar dead zones is not considered. Therefore, the problem of assessing the dead zones of jointly operating radars is relevant.

The article presents a mathematical model for estimating the dead zone of joint radar stations for effective detection of unmanned aerial vehicles and compares the dead zones on specific examples. The purpose of the study is to solve the problem of effective placement of RLSs by mathematical methods and choose the necessary placement scheme so that the unobserved part (dead zone) of the joint radar stations is minimal (maximum visibility).

### Radar area and scheme of the dead zone

A dead zone (DZ) is a section of space above a RLS that is outside the radar's observations and in which the RLS cannot detect air targets (Fig. 1). The presence of a dead gap is determined by the appropriate selection of the orientation diagram in the vertical plane of the radar station, which depends on the relief of the area in the area of influence of the station, the nature of the position, the height of the antenna and the technical parameters of the RLS. It is impossible to detect and track aerial targets in a dead zone [14].

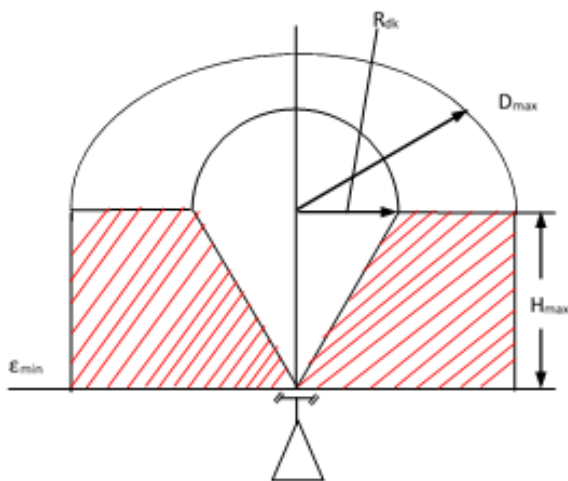


Fig. 1

The area of view of radiolocation stations is determined by the design of the RLS antenna and its operating characteristics (wavelength, transmission power, and other parameters).

When creating a grouping of RLS for the detection of UAVs, the detection zones of radiolocation stations have the following important features that must be taken into account:

1. The boundary of the sighting zones of the radiolocation stations indicates the diapason of target detection depending on the target's flight height. The earth's surface significantly affects the formation of the direction diagram of radiolocation stations for meter and decimeter ranges. This means that the terrain will have a significant effect on the area of view of the radiolocation station. As a result, the detection ranges of the same type of air targets at the same altitude can be different in different directions.

2. Radiolocation stations are used to conduct reconnaissance of the air enemy in a circular search mode. The detection of air attack vehicles by RLS in the vertical plane is limited, which leads to the presence of so-called "dead zones" in the field of vision, where it is impossible for RLS to observe air targets.

The following requirements must be met when creating a grouping of RLSs for the detection of UAVs:

- in the most probable flight directions of the enemy's air attacks (in front of the front line) the far border of the detection zone should be set;
- the continuous radiolocation area must cover the entire area at the possible altitudes of the enemy's air attack vehicles flight, and the probability of detecting targets at any point of the radiolocation area must be at least 0.75;
- radiolocation field should have high durability;
- the radiolocation area should be created with the maximum saving on the number of RLSs.

Choosing the optimal value of the height of the lower border of the radiolocation area is one of the most important conditions for fulfilling the above requirements. Two neighboring stations provide a continuous radiolocation area only starting from a certain minimum height ( $H_{min}$ ) and the smaller the distance between the RLSs, the smaller the lower bound of the continuous field (Fig. 2).

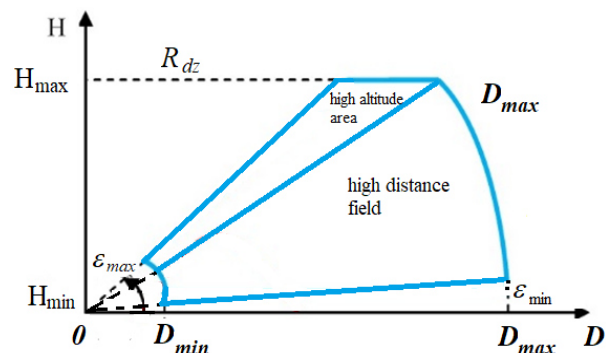


Fig. 2

The smaller the height of the lower boundary of the radiolocation area, the closer the RLSs need to be placed, so more RLSs will be required to create a continuous radiolocation area (this is contrary to the above requirements). In addition, the lower the altitude of the lower boundary of the radiolocation area, the smaller the far boundary of the detection zone at that altitude [15].

Currently, the state and trends of the development of UAV require the creation of a radar site at a height of several tens of meters (50-60 m). In this regard, a large number of RLS will be required to create a radiolocation area with this height of low boundary. Calculations show that when the height of the lower boundary of the radiolocation area is reduced from 500 m to 300 m, the need for the number of RLSs increases by 2.2 times, and when it is reduced from 500 m to 100 m, it increases by 7 times.

As a rule, the height of the upper border of the radiolocation area is not determined, they are determined by the capabilities of the radiolocation stations [13].

### Problem statement

The development of a general methodology for calculating the values of the intervals and distances between RLSs, which contain different types of radiolocation stations in the radiotechnical grouping, and the nature of the terrain does not significantly affect the radar area, constitutes the issue. Taking this into account, it is required to create a radiolocation area with the height of the lower border of the radiolocation area " $H_{\min}$ ".

Thus, depending on the location of radiolocation stations in the area, the dead zone (zone outside of observation) will be different. The purpose of the research is to investigate the issue of evaluating the dead zone (zone outside of observation) depending on the place of radiolocation stations in the area.

### Mathematical formulation and solution of the problem

We will assume that radiolocation stations operate in a fairly limited area, so we can ignore the curvature of the Earth's surface when describing the location area. To give the place of the radar stations relative to each other in the area, let us introduce the  $Oxyz$  positively oriented rectangular coordinate system with related to the ground [16, p.73], traditionally, the  $Oz$  axis can be considered perpendicular to the Earth's surface, pointing vertically upwards. Let's assume that it is planned to place  $k$  number of radiolocation stations in the area.

Let us denote the coordinates of the locations of the radiolocation stations relative to the  $Oxyz$  system through  $\{(x_i, y_i, z_i), i = 1, 2, \dots, k\}$ . According to the requirement of the problem, the distance between radiolocation stations is required to be at minimal  $l_0$ , in other words, the following inequalities must be satisfied relative the coordinates of the points:

$$(x_j - x_i)^2 + (y_j - y_i)^2 + (z_j - z_i)^2 \geq l_0^2, \quad (1) \\ i, j = 1, 2, \dots, k, \quad i \neq j.$$

As mentioned above, in general, the characteristic indicators of radiolocation stations may differ from each other. Let us denote the target sighting distance of the  $i$ -th radiolocation station as  $d_i$ , and the characteristic angle of its unobserved sector as  $\alpha_i$  ( $i = 1, 2, \dots, k$ ).

In general, a dead conyon (zone beyond observation) is a three-dimensional space figure, we will consider that the evaluation of these figures can be done based on their volume.

It is clear that geometrically the dead zone (zone outside of observation) of the  $i$ -th radiolocation station taken separately can be described as a truncated cone, let us denote this cone as  $K_i$ . Then the height of the cone  $K_i$  is calculated by the formula  $h_i = d_i \operatorname{ctg} \frac{\alpha_i}{2}$ . If take into account that the coordinates of the radar station are  $(x_i, y_i, z_i)$ , the cuted cone  $K_i$  can be expressed as

$$K_i = \left\{ (x, y, z) \mid x^2 + y^2 \leq \left[ \frac{d_i}{h_i} (z - z_i) \right]^2, \right. \\ \left. 0 \leq z - z_i \leq h_i \right\},$$

its volume will calculated by the following formula [17, p. 347]:

$$V_{0i} = \iiint_{(x,y,z) \in K_i} dx dy dz = \\ = \pi \frac{d_i^2}{h_i^2} \int_{z_i}^{z_i+h_i} (z - z_i)^2 dz. \quad (2)$$

However, it is clear that to estimate the dead zone (zone excluded from observation) of radiolocation stations operating together the formal sum of the quantities determined by the formulas (2) cannot be taken, this is due to the fact that they have intersecting parts.

To solve the problem, it is necessary to reduce the volume of each radar station's dead zone (zone outside of observation) by the volume of the part that other radar stations can see this zone. Let's calculate this volume for the  $i$ -th radiolocation station. For other radiolocation stations, the dead zone (zone outside of observation) is expressed as  $U_{j \neq i} K_j$ . Then it can be written the following formula for the sought volume:

$$V_i = \iiint_{(x,y,z) \in K_i \setminus U_{j \neq i} K_j} dx dy dz. \quad (3)$$

Considering that the sets  $K_i \setminus U_{j \neq i} K_j, i = 1, 2, \dots, k$  do not intersect, we can write the following formula for the evaluation of the dead zone (zone outside of observation) for all radiolocation stations:

$$V = \sum_{i=1}^k V_i. \quad (4)$$

From a mathematical point of view, the problem of the minimum dead zone (zone outside of observation) of radiolocation stations operating together can be formed as follows:

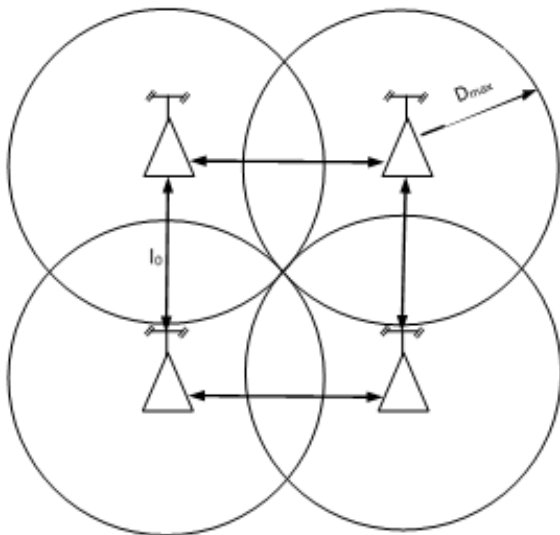
- it is required to find such coordinates  $(x_i, y_i, z_i)$  for which the conditions (1) are satisfied and in this case the functional (4) takes a minimum value.

Note that the functional (4) is defined in the non-convex set  $K_i \setminus U_{j \neq i} K_j$  and it is very difficult to give a general solution to such minimization problem. Therefore, the value of this type of functional is calculated by numerical methods. On the other hand, the location of radiolocation stations cannot be arbitrary according to the existing infrastructure. Taking into account what has been said, it is suggested to find a rational solution to the problem. Thus, the best of the possible options proposed for the location of the stations can be considered as rational solution. In order to find a rational solution, a discrete version of the model (1)-(4) is written and functionals (4) are calculated for the proposed location options and compared with each other.

### Examples on location option evaluation

1. Suppose that four RLSs of the same type are placed at the vertices of the square geometrically (Fig. 3).

Considering that the minimum distance (side of the square) between the radar stations is  $l_0 = 15 \text{ km}$ , the dead gap angle of each RLS is  $\alpha = 130^\circ$  and the detection distance of RLS is  $D_{\max} = 30 \text{ km}$ , we can find the volume  $V_0$  of the dead zone of each RLS considered separately and the volume  $V$  of the dead zone which is caused by the joint location of these stations.



**Fig. 3.** Schematic representation of the placement of RLSs at the vertices of a square geometrically

According to the data of the problem

$$h = 30 \operatorname{ctg} \frac{130^\circ}{2} \approx 13 \text{ km}$$

and if we apply the formula (2), we obtain

$$V_0 = \pi \left( \frac{30}{14} \right)^2 \int_0^{14} z^2 dz \approx 12252 \text{ [km}^3\text{]},$$

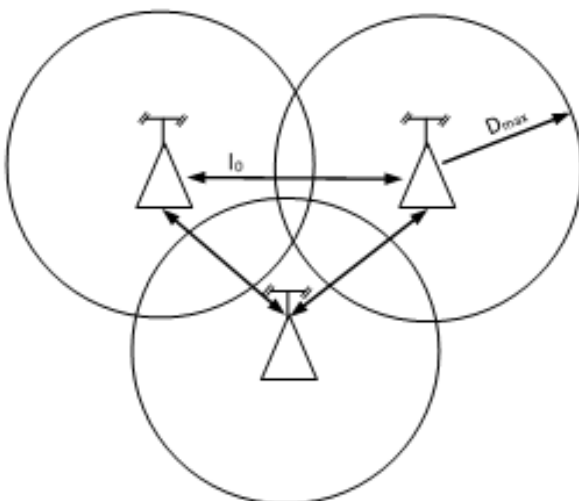
$$V_i \approx 6945 \text{ [km}^3\text{]}, i = 1, 2, 3, 4.$$

Then

$$V = \sum_{i=1}^4 V_i \approx 27781 \text{ [km}^3\text{]}.$$

Thus, when comparing, it can be seen that  $V$  is about 1.6 times less than  $4V_0$ .

2. Suppose that 3 radiolocation stations of the same type are placed at the vertices of an equilateral triangle (Fig.4).



**Fig. 4.** Schematic representation of the placement of RLSs at the vertices of a triangle geometrically

Taking into account that the minimum distance between radiolocation stations (side of the triangle) is

$l_0 = 10 \text{ km}$ , the angle of the dead zone of each RLS is  $\alpha = 120^\circ$ , the detection distance of the RLS is  $D_{max} = 35 \text{ km}$ , it is possible to evaluate the separate dead zone of each RLS  $V_0$  and the total sector  $V$ .

Based on the data,  $h = 35 \operatorname{ctg} \frac{120^\circ}{2} \approx 20 \text{ km}$ . Then

$$V_0 = \pi \left( \frac{35}{20} \right)^2 \int_0^{20} z^2 dz \approx 25656 \text{ [km}^3\text{]},$$

$$V_i \approx 18362 \text{ [km}^3\text{]}, i = 1, 2, 3$$

and

$$V = 3 \cdot V_i \approx 55088 \text{ [km}^3\text{]}.$$

Thus, comparing  $3V_0$  and  $V$  it can be seen that the total dead zones of RLSs are reduced by about 1.3 times.

**Aspects (opportunities) of practical application.**

The mathematical model for assessing radar dead zones does not impose additional conditions and restrictions related to the geography of the coverage area or the frequency of the operating range of the radio equipment used.

Therefore, if the task of estimating radar dead zones is being solved, the proposed approach can be applied in other areas of radar application.

**The discussion of the results**

It should also be noted that the proposed approach is based on the assumption that radar stations operate in a rather limited area and are located on a conditional plane. Comparing it with widely used radar systems, as well as with other methods for detecting flying objects (aircraft, helicopters, UAVs, missiles, etc.), we can draw the following conclusions:

- this method does not require the installation of additional equipment and antennas on the radar that implement radiation patterns;
- the mathematical apparatus is simple and easy to implement for assessing the dead zones of jointly operating radars, depending on their layouts.

**Conclusions**

From the comparison of the obtained numbers, it can be concluded that the creation of a radiolocation area by placing RLSs on the vertices of equilateral triangles (in the form of a checkerboard) is more economically profitable, as it requires fewer stations.

Although advantageous in terms of cost savings, Fig.4 grouping does not satisfy other critical requirements. For example, the failure of any of the RLSs leads to the formation of large gaps in the radiolocation field. Losses of air targets during tracking will be observed even with the correct operation of all RLSs, since the "dead zones" in the sighting zones of RLSs are not closed.

If we also take into account the distortion of the visual zones of RLSs as a result of the influence of the nature of the relief around the positions, we can generally conclude that the grouping in Fig. 4 can be used only in exceptional cases- with an acute shortage of funds and in secondary areas, but their use at the forefront is not effective.



## REFERENCES

1. Hashimov, E.G., Maharramov R.R. Methods of effective detection of unmanned aerial vehicles // Проблеми інформатизації. Тези доповідей 9- і міжн. наук.-техн. конф. Т. 1. -Черкаси – Харків-Баку – Бельсько-Бяла: 18 – 19.11.2021, -с.118-119. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/b024598b-3c0d-4c71-b090-f631ee7d7e75/content>
2. Hashimov, E.G., Maharramov R.R. Methods of effective influencing UAVs // Сучасні напрями розвитку інформаційно-комунікаційних технологій та засобів управління. Мат. 10-і міжн. НТК, 9-10.04.2020. Т. 1. Баку-Харків-Жиліна, 2020, с.27. URL: <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/5c2b472b-5836-4c06-be9a-1c30ff0fde9c/content>
3. Hashimov, E.G., Huseynov, B.S. Some aspects of the combat capabilities and application of modern UAVs // - Baku: National security and military sciences, - 2021. №3(7), -p.14-24. <https://mod.gov.az//images/pdf/7440712d93276d13d09990c7a1e203ea.pdf>
4. Bayramov A. A., Hashimov E. G. The numerical estimation method of a task success of UAV reconnaissance flight in mountainous battle condition //Сучасні інформаційні системи. – 2017. – №. 1,№ 2. – С. 70-73. <https://repository.kpi.kharkov.ua/server/api/core/bitstreams/14f9ffe6-ab93-4995-b3f1-aefa743dd725/content>
5. Vladimirov, V.M. Experimental investigations of the vertical sounding radar layout / V.M. Vladimirov, D.D.Dmitriev, V.N.Ratushniak, A.Y.Kolupaev // Journal of Siberian Federal University. Engineering & Technologies. -2022, 15(7). -p. 874–884. DOI:10.17516/1999-494X-0442
6. Hashimov, E.G., Maharramov, R.R., Muradov, S.A., Katekhiyev, V. Methods of detection of UAVs operating in a dead zone through RLS // Patriotic war: 44-day victory chronicle. Materials of the republican scientific-practical conference dedicated to the 2nd anniversary of the victory in the 44-day Patriotic War. - Baku: November 2-3, 2022, p. 176-178.
7. Filin, E.D., Kirichek, R.V. Approaches to the detection micro air vehicle based on the analysis of the electromagnetic spectrum // Информационные технологии и телекоммуникации. 2018. Т. 6. № 2. -p.87-93. URL: [https://www.sut.ru/doci/nauka/journal/2018\\_2/87-93.pdf](https://www.sut.ru/doci/nauka/journal/2018_2/87-93.pdf).
8. Еремин Г. В., Гаврилов А. Д., Назарчук И. И. Малоразмерные беспилотники – новая проблема для ПВО // Отвага [29.01.2015. № 6 (14). – URL:<http://otvaga2004.ru/armiya-i-vpk/armiya-i-vpkvzglyad/malorazmernye-bespilotniki/>.
9. Sydney, J. Freedberg, Jr. Dumb and cheap: When facing electronic warfare in Ukraine, small drones' quantity is quality: [Electronic resource] / Breaking defense. – 13 June, 2023. URL: <https://breakingdefense.com/2023/06/dumb-and-cheap-when-facing-electronic-warfare-in-ukraine-small-drones-quantity-is-quality/>
10. Старчак, М. Незаметная угроза: как беспилотники стали проблемой для ПВО: [Электронный ресурс] / Forbes. -17 мая, 2023. <https://www.forbes.ru/mneniya/489285-nezametnaa-ugroza-kak-bespilotniki-stali-problemoj-dla-pvo>
11. Murzak V. V., Gribov, A.S. Methodology for assessing the radar visibility zone under interference conditions // -Ярославль: Вестник ЯВВУ ПВО, -2021, №4. – с.28-36
12. Khomenko I.V., Gizatullov O.D. The generalized indicator of the analysis of technical and economic characteristics of radio engineering means of the special purpose, J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol., 2016, 9(4), p.500-512. DOI: 10.17516/1999-494X-2016-9-4-500-512.
13. Klimov F.N., Kochev M. Yu., Garkin E.V., Lunkov A.P. On some problems of control over compliance with the procedure for the use of airspace. VII BC / NW 2015 № 2 (27): 13. 2. <https://collectiontravels.ru/ssha/o-nekotoryh-problemah-kontrolya-zasoblyudeniem-poryadka-ispolzovaniya/>. 18.11.2022.
14. What is the dead zone of RLS detection and how to determine it? <https://studfile.net/preview/8961005/page:11/>
15. Brzozowski, M., Pakowski, M., Nowakowski, M., Myszk, M., Michalczewski, M. Radiolocation Devices for Detection and Tracking Small High-Speed Ballistic Objects - Features, Applications, and Methods of Tests // Sensors, - 2019, 19(24): 5362. <https://doi.org/10.3390/s19245362>
16. Tomusyak A.A., Trokhimenko V.S., Shunda N.M. Geometry. Part 1: Analytical geometry / Vinnitsa, 2002, - 244 p.
17. Dombrovsky V.A. and others. Vishcha Mathematics: Podruchnik / Dombrovskiy V.A., Krizhanivskiy I.M., Mats'kiv R.S., Migovich F.M., Nemish V.M., Okrepky B.S., Khoma G.P., Shelestovska M.Ya.; edited by Shinkarika M.I. – Ternopil: Vidavnitstvo Karp'yuk, 2003 – 480 p.

Received (Надійшла) 26.05.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 16.08.2023

**Оцінка мертвої зони сумісно працюючих радарів**

Гашимов Е. Г., Магаррамов Р. Р., Сабзиев Е. Н., Пашаев А. Б.

**Анотація.** Актуальність дослідження. З появою безпілотних літальних апаратів значно актуалізувались і завдання боротьби з ними. Сьогодні оперативне протидія БПЛА має велике значення. Сучасні ВРЛА здатні не тільки вести відорозвідку у визначеній місцевості, але й тривалий час спостерігати за конкретним об'єктом і носити по ньому удари. Після виявлення та ідентифікації БПЛА засобами РЛС необхідно прийняти заходи щодо їх знешкодження. У роботі створена математична модель оцінки мертвої зони спільної роботи РЛС для ефективного виявлення безпілотних літальних апаратів і проведено порівняння мертвих зон на конкретних прикладах. Ціль дослідження є рішенням задачі ефективного розміщення спільно працюючих РЛС математическими методами при неспостережуваній залишковій частині їх мінімального об'єму та вибором необхідної схеми розміщення. В статті вирішуються наступні завдання: аналіз характеристик радіолокаційного поля; розробка математическої моделі оцінки мертвої зони місцевих радіолокаційних станцій; оцінка деяких варіантів розміщення. Для вирішення завдань використовуються наступні методи дослідження: теоретичний аналіз, математичне моделювання, порівняльний аналіз. Були отримані наступні результати: позначено зменшення мертвої зони в 1,6 раза при чотирьохстанційній схемі квадратного розташування та в 1,3 раза при трьохстанційній трикутній схемі розташування. Висновки: Із порівняння отриманих можна зробити висновок, що створення радіолокаційної зони шляхом розміщення РЛС по вершинам рівносторонніх трикутників (у вигляді шахматної доски) економічно вигідніше, так як вимагає меншої кількості станцій.

**Ключові слова:** безпілотні літальні апарати, мертва зона, радіолокаційна зона, ефективна зона відображення, станція радіолокації.

V. Yerokhin<sup>1</sup>, Ye. Peleshok<sup>2</sup>, O. Zaluzhnyi<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Institute of Special Communication and Information Protection

National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup> Research Institute of Military Intelligence, Kyiv, Ukraine

<sup>3</sup> Kruty Heroes Military Institute of Telecommunications and Information Technology, Kyiv, Ukraine

## COHERENT DEMODULATION OF SYNCHRONOUS MUTUALLY NOT ORTHOGONAL DIGITAL SIGNALS WITH MANIPULATION IN THE MINIMUM SHIFT KEYING

**Abstract.** The article presents the synthesis of a mathematical model of the compensation procedure for coherent demodulation of synchronous mutually non-orthogonal digital signals with manipulation in the minimum shift keying. In the absence of interference this procedure degenerates into the procedure of classical coherent demodulation of digital signals with manipulation in the minimum shift keying. With a significant excess of the instantaneous power of interference over the instantaneous power of useful digital signals with manipulation in the minimum shift keying the immunity of reception of the latter approaches the immunity of reception in a channel with additive white Gaussian noise without interference. This mathematical model can be used in the development of modem compensators that ensure repeated use of the frequency resource, as well as in the development of promising interference-protected radio communication devices.

**Keywords:** radio communication, coherent demodulation, synchronous non-orthogonal digital signals, minimum shift keying.

### Introduction

In the development of modern radio equipment, the problem of reliable reception of a digital signal in conditions of limited radio frequency resources, fading, multipath, doppler frequency shifts and the influence of various structural disturbances remains urgent.

Therefore the search for ways of effective use of the radio frequency resource and demodulation of useful digital signals under the influence of intentional or unintentional interference, including those similar in structure to the useful signal is relevant within the limits of this problem. A huge number of works have been devoted to this for more than half a century (for example, [1–4]). It is not yet possible to assume that this problem has been solved at least theoretically. It can be assumed that an effective way to solve it is to create at least two-stage procedures. At the first stage, it is necessary to perform the task of evaluating the signal and interference situation. The second is to implement one or another rational, in some sense, fault protection algorithm. It is clear that such an ideology involves the creation of some library of processing algorithms that can be applied in the receiving device at this second stage.

Broadband signals adaptive modes of operation (for example, according to MIL-STD-188-141, MIL-STD-188-110B standards), pseudo-random adjustment of the operating frequency (for example, STANAG 4444), methods of spatial-polarization processing [5, 6], modem compensation methods [4, 7–8], interference rejection in time and frequency, and a combination of these approaches. However the rapid increase in the number and power levels of radio radiation sources of various origins, the development of radio-countermeasures and, as a result, the improvement of the quality and speed of adaptation of interference parameters created by these means lead to the fact that

the currently known methods of interference protection are becoming insufficiently effective.

It should also be noted that it is obviously impossible to protect digital lines of military or civilian radio communication from a wide variety of powerful interference using any one method. In this regard there is a need to choose some rational set of them among the multitude of technical methods of combating interference which will ensure the fulfillment of modern requirements for interference protection of special purpose digital radio communication lines.

It is obviously impossible to solve a calculated set of problems for the development of error-proof processing algorithms within the limits of one work. A number of tasks can be solved sequentially.

A separate important class of problems of interference-protected reception of a digital signal are problems related to the demodulation of a useful digital signal with angular (non-energy) modulation under the influence of strong interference – synchronous, asynchronous (plesiochronous), similar in structure to the useful digital signal.

Similar to [1, 4, 7, 9–11] it is suggested to use compensation procedures in the modems (demodulators) of the receiving devices to improve the immunity of the reception of a useful digital signal received under conditions of additive influence of a powerful similar interference. It should be noted that digital signals with manipulation in the minimum shift keying (MSK) are widely used to ensure data transmission in a limited frequency band [13, 14].

The purpose of the research and the main content of the article is to solve the problem of synthesizing a mathematical model of the compensation procedure of coherent demodulation of synchronous mutually non-orthogonal signals with MSK. At the same time it is also necessary to check the performance of the received model.



### Methodology for the synthesis of a mathematical model of coherent demodulation of synchronous mutually non-orthogonal digital signals with MSK

Signal with MSK have a manipulation index equal to 0.5. At the  $k$  clock interval such a signal is represented by the following expression [14]:

$$S(\hat{r}_k, t) = A_0 \cos(\omega_0 t + \hat{r}_k \Omega_{\mathcal{H}} t + \theta_k), \quad t \in [t_{k-1}, t_k), \quad (1)$$

where  $\hat{r}_k = -(-1)^k$ ,  $\hat{r}_k = \overline{1, -1}$ ,  $r_k = \overline{0, 1}$ ,  $k = 1, 2, 3, \dots$ , –

information symbol;  $\Omega_{\mathcal{H}} = \frac{\pi}{2T}$  – frequency deviation;

$A_0$  – signal amplitude with MSK;

$$\theta_k = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^{k-1} \hat{r}_i - \frac{(k-1)\pi}{2} \hat{r}_k = \frac{\pi}{2} \sum_{i=1}^{k-1} (-1)^{r_i} - \frac{(k-1)\pi}{2} (-1)^{r_k}$$

– is the initial phase of the signal at the  $k$ -clock interval. For ease of recording, both definitions of the information signal  $\hat{r}_i = -(-1)^{r_i}$  used in previously known publications [4, 12] are used.

From this it can be seen that the signal depends on the values of the information symbol not only on the  $k$ -clock interval but also on its values on all previous intervals [12].

Let's assume that the signal with MSK is useful  $S_1(r_1, t)$  and powerful structural interference  $S_2(r_2, t)$  spread in a stationary radio communication channel, their frequency positions and clock points coincide, and the non-informational parameters are precisely known [11–14].

Then we will present the observation model on the duration of the clock interval as follows:

$$y(t) = S_1(r_1, t) + S_2(r_2, t) + n(t),$$

where  $n(t)$  – additive white Gaussian noise (AWGN) with one-sided power spectral density  $N_0$ .

It is quite appropriate for phase methods of binary manipulation to form a decision about the state of the information parameter of the useful signal based on the comparison of phase shifts at adjacent clock intervals. This significantly simplifies analytical proofs and, as a result, technical implementation. In particular, the need to integrate (convolution) observation quadrature on adjacent clock intervals is simplified to two-fold (more precisely, sequential) convolution on the same intervals and sequential memorization of the result for the length of one clock interval (in delay lines – zero-order extrapolators) followed by multiplication result - in this case we are interested only in the answer to the question about the sameness of the adjacent values of the representative parameter of the useful signal the coincidence (non-coincidence) of the values of the adjacent convolutions. But this is not the case when demodulating a signal with MSK - the optimal solution is achieved by processing “as a whole” observation on two adjacent clock intervals [11, 13].

The general form of the possible probability functionals of a collection of discrete parameters of mutually nonorthogonal digital signals for the case of ideal coherent reception when convolution on one clock interval is similar to [4] written in the form (the number of the clock interval is refuted):

$$\Lambda(r_1, r_2) = \varphi \left\{ \exp \left[ b_1(r_1) + b_2(r_2) - 2R(r_1, r_2) \right] \right\}, \quad (2)$$

where the components determined by the energies of the signal and interference of the species

$$h_i^2 = \frac{1}{N_0} \int S_i^2(r_i, t) dt = \frac{1}{N_0} \int S_i^2(t) dt, \quad i = \overline{1, 2}, \quad [4], \text{ as}$$

independent of the states of the information signal  $r_i$ , refuted as being the same for all likelihood functionals and therefore will not affect the operation of the decision rule  $r_1^*$  about the states of the information symbols  $r_1$  of the useful signal.

In (2)  $\varphi$  – some normalizing factor,

$$b_1(r_1) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t) S_1(r_1, t) dt - \text{the ratio of the}$$

doubled scalar product of the input observation and the useful signal  $S_1(r_1, t)$  on the length of the clock interval  $[t_{k-1}, t_k)$  to the one-sided power spectral density AWGN;

$$b_2(r_2) = \frac{2}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} y(t) S_2(r_2, t) dt - \text{the ratio of the}$$

doubled scalar product of the input observation and the interfering signal  $S_2(r_2, t)$  on the length of the clock interval  $[t_{k-1}, t_k)$  to the one-sided power spectral density AWGN;

$$R(r_1, r_2) = \frac{1}{N_0} \int_{t_{k-1}}^{t_k} S_1(r_1, t) S_2(r_2, t) dt - \text{the ratio}$$

of the scalar product of the useful signal  $S_1(r_1, t)$  and interfering signal  $S_2(r_2, t)$  on the length of the clock interval  $[t_{k-1}, t_k)$  to the one-sided power spectral density AWGN.

Let's write down all possible probability functionals of the information signal vector of mutually non-orthogonal digital signals:

$$\Lambda(1, 1) = \varphi \left\{ \exp \left[ b_1(1) + b_2(1) - 2R(1, 1) \right] \right\};$$

$$\Lambda(1, -1) = \varphi \left\{ \exp \left[ b_1(1) + b_2(-1) - 2R(1, -1) \right] \right\};$$

$$\Lambda(-1, 1) = \varphi \left\{ \exp \left[ b_1(-1) + b_2(1) - 2R(-1, 1) \right] \right\}; \quad (3)$$

$$\Lambda(-1, -1) = \varphi \left\{ \exp \left[ b_1(-1) + b_2(-1) - 2R(-1, -1) \right] \right\}.$$

Starting from (2), within the limits of this work, we will limit ourselves to one time interval. The resulting decision rule will not be optimal according to the criterion of the minimum average probability of error in

the estimation of the useful signal, but it will allow to check the principle possibility of compensation of interference similar in its structure to the useful signal with MSK in the demodulator of the receiving device.

Write in explicit form according to model (1) the ratio of the mutual energies of the useful signal with MSK and the interference with MSK at a certain time interval  $t \in [t_1, t_2]$  to  $N_0$  where their information symbols are unchanged:

$$\begin{aligned} R(1,1) &= \frac{A_c A_3}{N_0} \int_{t_1}^{t_2} \left( \cos(\omega_0 t + \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_c) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega_0 t + \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_3) \right) dt = \\ &= \frac{A_c A_3}{4(\omega_0 + \Omega_{\mathcal{H}}) N_0} \left[ \cos(\varphi_c + \varphi_3) \times \right. \\ &\quad \times \left[ \sin(2(\omega_0 + \Omega_{\mathcal{H}}) t_1) - \right. \\ &\quad \left. - \sin(2(\omega_0 + \Omega_{\mathcal{H}}) t_2) + \sin(\varphi_c + \varphi_3) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ \cos(2(\omega_0 + \Omega_{\mathcal{H}}) t_1) - \cos(2(\omega_0 + \Omega_{\mathcal{H}}) t_2) \right] \right] + \\ &\quad \left. + \frac{A_c A_3 (t_1 - t_2)}{2N_0} \cdot \cos(\varphi_c - \varphi_3) \right]. \end{aligned} \quad (4)$$

Similarly,

$$\begin{aligned} R(-1,-1) &= \frac{A_c A_3}{N_0} \int_{t_1}^{t_2} \left( \cos(\omega_0 t - \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_c) \times \right. \\ &\quad \left. \times \cos(\omega_0 t - \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_3) \right) dt = \\ &= \frac{A_c A_3}{4(\omega_0 - \Omega_{\mathcal{H}}) N_0} \left[ \cos(\varphi_c + \varphi_3) \times \right. \\ &\quad \times \left[ \sin(2(\omega_0 - \Omega_{\mathcal{H}}) t_1) - \sin(2(\omega_0 - \Omega_{\mathcal{H}}) t_2) \right] + \\ &\quad \left. + \sin(\varphi_c + \varphi_3) \left[ \cos(2(\omega_0 - \Omega_{\mathcal{H}}) t_1) - \right. \right. \\ &\quad \left. \left. - \cos(2(\omega_0 - \Omega_{\mathcal{H}}) t_2) \right] \right] + \\ &\quad \left. + \frac{A_c A_3 (t_1 - t_2)}{2N_0} \cdot \cos(\varphi_c - \varphi_3); \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} R(1,-1) &= R(-1,1) = \frac{A_c A_3}{N_0} \int_{t_1}^{t_2} \cos(\omega_0 t - \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_c) \times \\ &\quad \times \cos(\omega_0 t + \Omega_{\mathcal{H}} t + \varphi_3) dt = \frac{A_c A_3}{4\omega_0 N_0} \left[ \cos(\varphi_c + \varphi_3) \times \right. \\ &\quad \times (\sin(2\omega_0 t_1) - \sin(2\omega_0 t_2)) + \sin(\varphi_c + \varphi_3) \times \\ &\quad \times (\cos(2\omega_0 t_1) - \cos(2\omega_0 t_2)) \left. \right] + \frac{A_c A_3}{4\Omega_{\mathcal{H}} N_0} \times \\ &\quad \times \left[ \cos(\varphi_c - \varphi_3) (\sin(2\Omega_{\mathcal{H}} t_1) - \sin(2\Omega_{\mathcal{H}} t_2)) - \right. \\ &\quad \left. - \sin(\varphi_c - \varphi_3) (\cos(2\Omega_{\mathcal{H}} t_1) - \cos(2\Omega_{\mathcal{H}} t_2)) \right]. \end{aligned} \quad (6)$$

Can be seen from (4) and (5) that mutual energy  $R(1,1) = R(-1,-1)$ , then (3) rewrite as follows:

$$\Lambda(1, 1) = \varphi \left\{ \exp[b_1(1) + b_2(1) - 2R(1,1)] \right\};$$

$$\Lambda(-1, -1) = \varphi \left\{ \exp[b_1(-1) + b_2(-1) - 2R(1,1)] \right\};$$

$$\Lambda(1, -1) = \varphi \left\{ \exp[b_1(1) + b_2(-1) - 2R(1,-1)] \right\}; \quad (7)$$

$$\Lambda(-1, 1) = \varphi \left\{ \exp[b_1(-1) + b_2(1) - 2R(1,-1)] \right\}.$$

Using (3) we write down the rule for making a decision about the transmitted information symbol of the useful signal with MSK:

$$\begin{aligned} r_k^{c*} &= \text{rect} \left\{ \exp b_1(1) \left[ \exp(b_2(1) - 2R(1,1)) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp(b_2(-1) - 2R(1,-1)) \right] - \exp b_1(-1) \times \right. \\ &\quad \left. \times \left[ \exp(b_2(1) - 2R(1,-1)) + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \exp(b_2(-1) - 2R(1,1)) \right] \right\}, \end{aligned} \quad (8)$$

where  $\text{rect}(x \geq 0) = 1$ ,  $\text{rect}(x < 0) = 0$  – decisive function.

To reduce the argument of the decisive rule (8) to a combination of terms of functions  $sh(x)$ ,  $ch(x)$  from the arguments we multiply  $b_{1,2}(r_{1,2})$ ,  $R(r_1, r_2)$  all the components in argument (8) by the expression:

In order to reduce the argument of the decision rule (8) to the combination of terms of functions from the arguments we multiply all the components in the argument (8) by the expression:

$$\exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \begin{array}{l} b_1(1) + b_1(-1) + b_2(1) + \\ + b_2(-1) - 2R(1,1) - 2R(1,-1) \end{array} \right) \right].$$

As a result, we get:

$$\begin{aligned} r_k^{c*} &= \text{rect} \left\{ sh \left( \frac{b_1(1) - b_1(-1)}{2} \right) \times \right. \\ &\quad \times \left[ ch \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) ch(R(1,-1) - R(1,1)) \right] + \\ &\quad \left. + ch \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) \left[ sh \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) \times \right. \right. \\ &\quad \left. \left. \times sh(R(1,-1) - R(1,1)) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

Now let's divide all the components of (9) by

$$\begin{aligned} ch \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) ch \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) \times \\ \times ch(R(1,-1) - R(1,1)). \end{aligned}$$

As a result we get:

$$\begin{aligned} r_k^{c*} &= \text{rect} \left\{ th \left( \frac{b_1(1) - b_1(-1)}{2} \right) + \right. \\ &\quad \left. + th \left( \frac{b_2(1) - b_2(-1)}{2} \right) th(R(1,-1) - R(1,1)) \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Considering that the function is odd, we write down the decision rule (10) in the form:

$$r_k^{c*} = \text{rect} \left\{ \left( \frac{b_1(1) - b_1(-1)}{2} \right) - \text{Arth} \left[ \text{th} \left( \frac{b_2(-1) - b_2(1)}{2} \right) \text{th} (R(1,-1) - R(1,1)) \right] \right\} \quad (11)$$

$$r_k^{c*} = \text{rect} \left\{ \left( \frac{b_1(1) - b_1(-1)}{2} \right) - \text{sign} \left( \frac{b_2(-1) - b_2(1)}{2} \right) \cdot (R(1,-1) - R(1,1)) \right\}, \quad (12)$$

The structural diagram of a coherent demodulator for extracting synchronous mutually non-orthogonal digital signals from MSK is shown in Fig. 1.

If the modules of the quantities  $b_2(-1) - b_2(1)$  significantly exceed unity (that is, the components of the interference in terms of the instantaneous power are much more than the useful signal) the decision rule (11) can be significantly simplified ( $\text{th}(x \gg 1) \approx 1; \text{th}(x \ll -1) \approx -1$ ):

where  $\text{sign}(x \geq 0) = 1, \text{sign}(x < 0) = -1$  – signal function.

Representation (12) of the separation model (11) allows a simplified demonstration of the procedure for compensation of a powerful interference similar to a useful signal with MSK. The demonstration of the operation of the decision-making rule (11) is given in the table 1 (in the table 1  $\text{arg rect}(x)$  – decision rule argument (11)).

Table 1 – The demonstration of the operation of the decision-making rule (11)

$r_1$	$r_2$	$\frac{b_1(1) - b_1(-1)}{2}$	$\frac{b_2(-1) - b_2(1)}{2}$	$\text{arg rect}(x)$	$r_k^{c*}$
0	0	$R(1,-1) - h_1^2(-1) - R(-1,-1)$	$[-R(-1,1) + R(-1,-1) + h_2^2(-1)] > 0$	$-h_1^2(-1)$	0
0	1	$R(1,1) - h_1^2(-1) - R(-1,1)$	$[-R(-1,1) - h_2^2(1) + R(-1,-1)] < 0$	$-h_1^2(-1)$	0
1	0	$h_1^2(1) + R(1,-1) - R(-1,-1)$	$[-R(1,1) + R(1,-1) + h_2^2(-1)] > 0$	$h_1^2(1)$	1
1	1	$h_1^2(1) + R(1,1) - R(-1,1)$	$[-R(1,1) - h_2^2(1) + R(1,-1)] < 0$	$h_1^2(1)$	1

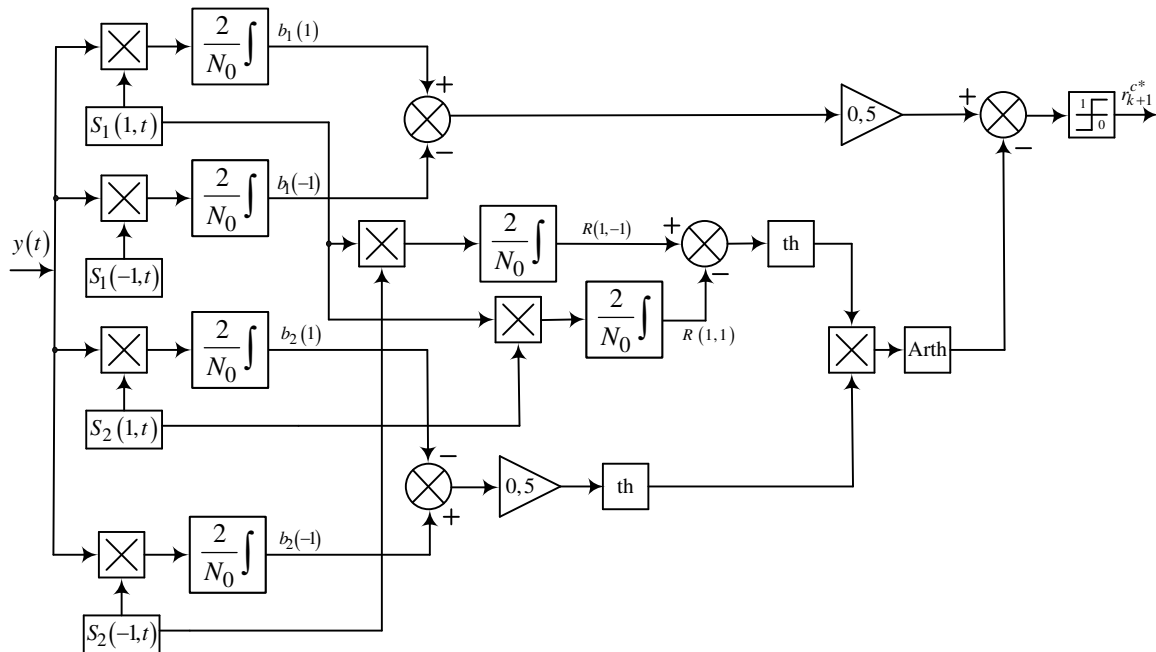


Fig. 1. Structural diagram of a coherent demodulator for separating synchronous digital signals with MSK

When compiling the table 1 for the purpose of transparency of explanations of the presence of noise components at the outputs of the correlators of the scheme of Fig. 1 was not taken into account.

### Conclusions

The essence of the proposed mathematical model of coherent demodulation of mutually non-orthogonal synchronous digital signals with MSK is that it

describes the procedure for compensating the influence of interference similar to the useful signal with MSK at the input of the correlator of the signal branch of the demodulator.

At the same time, the compensating voltages are formed on the basis of reference oscillations of the signal and interference, and their signs are at the output of the interference branch of the demodulator.

A distinctive feature of this mathematical model from the well-known classical coherent demodulation of the MSK signal is the presence of a compensation path. At the same time, unlike procedures synthesized by linear or non-linear filtering methods, the compensation chains are directed not in the reverse but in the forward direction.

The developed mathematical model is not optimal according to the criterion of the minimum average error probability per bit of the useful signal (more precisely, even the idealized version given in this article which does not contain procedures for evaluating continuous non-informative parameters of the signal and interference).

However, it is expected that provided the average power of an interference similar in structure is significantly higher than the power of a useful signal with MSK and there are no errors in the estimation of continuous interference parameters, the asymptotic immunity of this mathematical model will be the same as in the absence of interference in the communication channel when processing on one clock interval.

The synthesized mathematical model can find application in the implementation of frequency resource reuse programs and in the development of promising interference-protected radio communication tools. A separate publication will be devoted to the task of a detailed analysis of the fault tolerance of model (11).

#### REFERENCES

1. Yerokhin V.F., Krutofist I.M. (2005) A demodulation algorithm that ensures the reuse of digital radio broadcasting frequencies. *Protection of information*. № 25. 42–47. [in Ukrainian].
2. Piza D.M., Romanenko S.N., Moroz G.V. (2018) Estimation of losses in jammers compensation at the training sample formation by the frequency method. *Information and Telecommunication Sciences*. NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”. № 2. 5–9. [in Ukrainian].
3. Kulykivska N.I., Avdieienko H.L., Yakornov Ye.A. (2022) Development of a method of spatial selection of signals based on direction-finding algorithms of radio radiation sources. *Information and Computer Technologies*. University “Ukraine”. № 1 (03), 184–206. [in Ukrainian].
4. Verdu S. (1998) Multiuser Detection. *Press syndicate of the university of Cambridge*, Cambridge. 470 p. [in English].
5. Avdieienko H., Yakornov Y. (2019) Application of Spatial Signal Processing by the Form of the Electromagnetic Wave Phase Front in Wireless Communication Systems. *Advances in Information and Communication Technologies. Lecture Notes in Electrical Engineering*. Vol 560. 239–261. [in English].
6. Moskalets M.V., Selivanov K.O. (2018) Analysis of the effectiveness of spatio-temporal signal processing methods in mobile communication systems. Professional electronic scientific publication - The Journal “Telecommunications Problems”. Kharkiv National University of Radio Electronics. № 2 (23), 3–21. [in Ukrainian].
7. Yerokhin V.F. (2017) *Multiuser Detection*. ISZZI NTUU “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv. 162 [in Ukrainian].
8. Yerokhin V.F., Peleshok Ye.V. (2013) Procedure for coherent-incoherent demodulation of mutually interfering digital signals with binary frequency modulation. *Visnyk NTUU “KPI”. Seriya Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. Iss. 53. 23–31. [in Ukrainian].
9. Yerokhin V.F., Krutofist I.M. (2005) Asymptotic efficiency of coherent demodulators of digital signals observed against the background of similar powerful disturbances. *National Defense Academy of Ukraine*. № 65. 76–81. [in Ukrainian].
10. Yerokhin V.F., Raievskiy V.M. (2009) Synthesis of algorithms for optimal separation of two-state mutually interfering heterochronous signals of frequency manipulation. *Radio engineering*. KhNURE. № 156. 78–84. [in Ukrainian].
11. Amoroso F. Pulse and Spectrum Manipulation in the Minimum (Frequency) Shift Keying (MSK). *IEEE Trans.* 1976. Vol. COM-24, № 3. 381–384. [in English].
12. Steklov V.K., Berkman L.H. (2006) Theory of electrical communication. *Machinery*. Kyiv. 2006. 552. [in Ukrainian].
13. Roma O.M., Peleshok Ye.V., Goal V.D., Vasylenko S.V. (2019) Analysis of immunity to coherent demodulation of synchronous mutually non-orthogonal digital signals with minimal frequency manipulation. *Visnyk NTUU KPI Seriya Radiotekhnika Radioaparotobuduvannia*. Iss.79. P 48–55. [in Ukrainian].
14. Yerokhin V.F. (2014) *Random multiple access when resolving conflicts at the physical level*. ISZZI NTUU “KPI”, Kyiv. 296. [in Ukrainian].

Received (Надійшла) 12.07.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 13.09.2023

#### Когерентна демодуляція синхронних взаємно неортогональних цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією

В. Ф. Єрохін, Є. В. Пелешок, О. В. Залужний

**Анотація.** У статті представлено синтез математичної моделі компенсаційної процедури когерентної демодуляції синхронних взаємно неортогональних цифрових сигналів з мінімальною частотною модуляцією. За відсутності завади дана процедура вироджується в процедуру класичної когерентної демодуляції цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією. При суттєвому перевищенні миттєвої потужності завади над миттєвою потужністю корисного цифрових сигналів з мінімальною частотною маніпуляцією завадозахищеність прийому останнього наближається до завадозахищеності прийому в каналі з адитивним білим гаусівським шумом без завади. Дана математична модель може використовуватися при розробці модемних компенсаторів, що забезпечують повторне використання частотного ресурсу, а також при розробці перспективних завадозахищених засобів радіозв'язку.

**Ключові слова:** радіозв'язок, когерентна демодуляція, синхронні неортогональні цифрові сигнали, мінімальна частотна маніпуляція.

А. О. Ковальчук<sup>1</sup>, О. Л. Кузнецов<sup>1</sup>, О. В. Коломійцев<sup>2</sup>, А. Д. Карлов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків, Україна

<sup>2</sup> Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, Україна

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЗАДАНОЇ СТІЙКОСТІ СУПРОВОДЖЕННЯ ПОВІТРЯНИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА РАДІАЛЬНОЮ ШВИДКІСТЮ В РЕАЛЬНИХ УМОВАХ ПОШИРЕННЯ І ВІДБИТТЯ РАДІОЛОКАЦІЙНОГО СИГНАЛУ

**Анотація.** Супроводження повітряних об'єктів (ПО) здійснюється багатоканальними радіолокаційними станціями та забезпечується підсистемами визначення дальності, радіальної швидкості та кутових координат. За умови, якщо ПО супроводження є високоманевреними, то відбувається суттєве зниження точності і стійкості супроводження відносно ділянки відсутності маневрування, яка буває досить тривалою. У разі виникнення помилкового або застарілого до маневрених характеристик ПО налаштування алгоритмів слідкуючих систем, відбувається суттєве зростання помилки супроводження ПО на ділянці здійснення маневру, що може призвести до зриву супроводження за рахунок значної динамічної складової помилки. Для оцінки стійкості супроводження ПО запропоновано використання еквівалентного розміру апертури дискримінаційної характеристики. Проведено оцінку впливу параметрів стохастичної моделі руху ПО, моделі спостережень та періоду вимірювання координат на стійкість супроводження за радіальною швидкістю. В результаті проведених досліджень з'являється можливість подальшої оцінки доцільності адаптації до маневрених характеристик ПО та надання рекомендацій щодо вибору періоду вимірювання координат в багатоканальних радіолокаторах. Відмічено, що стійкість процесу супроводження ПО залежить від точності поточного вимірювання радіальної швидкості, яка переважно визначається статистичними характеристиками флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу. Вплив даних флуктуацій обумовлено наявністю турбулентних неоднорідностей атмосфери, характером маневру ПО та відбиттям радіохвиль від земної або морської поверхні. Наведено пропозиції щодо врахування вказаних флуктуацій та зменшення їх впливу на якість вирішення завдання супроводження ПО.

**Ключові слова:** дисперсія помилки екстраполяції, радіальна швидкість, система автоматичного супроводження, слідкувальне вимірювання, статистичні характеристики, супроводження, флуктуації фазового фронту.

### Вступ

Стійкість супроводження повітряного об'єкту (ПО) пов'язана із забезпеченням точного прогнозування його положення на наступний крок радіолокаційного спостереження. Здатність аеродинамічних об'єктів (ПО) щодо здійснення маневрування та використання малих і гранично малих висот польоту сприяє суттєвому ускладненню їх супроводження.

Основною характеристикою стійкості супроводження ПО є ймовірність відсутності зриву супроводження протягом певного інтервалу часу. Тому, забезпечення потрібних значень вказаної ймовірності є запорукою стійкості супроводження ПО. Однак, у зв'язку із нелінійними характеристиками дискримінаторів, що визначають граничні умови, є складнощі у отриманні рішення вказаного завдання.

За умови, якщо помилка екстраполяції є порівняною з напівшириною апертури дискримінаційної характеристики (ДХ), то через нелінійність характеристик дискримінаторів щільності розподілів ймовірностей помилок оцінювання й екстраполяції будуть досить помітно відрізнятися від нормальних. Отже, необхідним є проведення досліджень стійкості супроводження ПО. Зазначені обставини дозволяють проводити широкі дослідження впливу структури й параметрів алгоритмів оцінювання та екстраполяції координат ПО на стійкість супроводження в системах, що використовують певний тип дискримінатора, для якого одноразово розраховано еквівалентний розмір апертури ДХ.

Здатність ПО до маневрування, тобто до руху з різним прискоренням обумовлює необхідність поточного оцінювання його радіальної швидкості з максимально

можливою точністю, оскільки це визначає якість виконання основних етапів слідкувального вимірювання.

Якість поточного оцінювання радіальної швидкості ПО, що спостерігається визначається закономірністю фазової структури радіолокаційного сигналу та суттєво залежить від умов його поширення і відбиття, які обумовлюють виникнення флуктуацій фазового фронту хвилі сигналу.

Вказаними умовами можна вважати: атмосферні неоднорідності, здатність ПО до маневрування та вплив підстильної поверхні при спостереженні ПО під малими кутами місця.

Таким чином, доцільним є проведення аналізу стійкості супроводження маневруючих ПО за радіальною швидкістю стосовно частотних дискримінаторів, що використовуються в радіолокаційних станціях (РЛС) сантиметрового діапазону, з наданням пропозицій щодо зниження впливу умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу на точність поточного вимірювання радіальної швидкості ПО.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз основних характеристик ПО радіолокаційного спостереження наведено у [1], а питання щодо впливу флуктуацій фазового фронту радіолокаційного сигналу розглядаються у [2-4].

У [5] запропоновано методику визначення фіксованих параметрів алгоритмів супроводження, що забезпечує суттєве підвищення стійкості слідкування стосовно супроводження ПО по дальності. Питання оцінювання стійкості супроводження ПО за допомогою еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора розглянуто у [6].

Стійкість супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю, безумовно, визначається

точністю поточного вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів, яка використовується у якості зондувального сигналу РЛС для забезпечення вимірювання радіальної швидкості ПО із заданою точністю. Можливого зниженню точності вимірювання частоти Доплера даного радіосигналу та радіальної швидкості ПО спостереження присвячено роботи [7-9].

Вказані у наведених роботах помилки поточного вимірювання частоти Доплера і, як слід, радіальної швидкості ПО, обумовлено флуктуаціями фаз радіоімпульсів прийнятої пачки, які виникають внаслідок впливу реальних умов її поширення та відбиття. Тому, врахування даних флуктуацій на етапі первинної обробки радіолокаційної інформації дозволить у значному ступені покращити подальшу стійкість супроводження маневруючих ПО.

Оптимізацію поточного вимірювання частоти Доплера пачки шляхом врахування статистичних

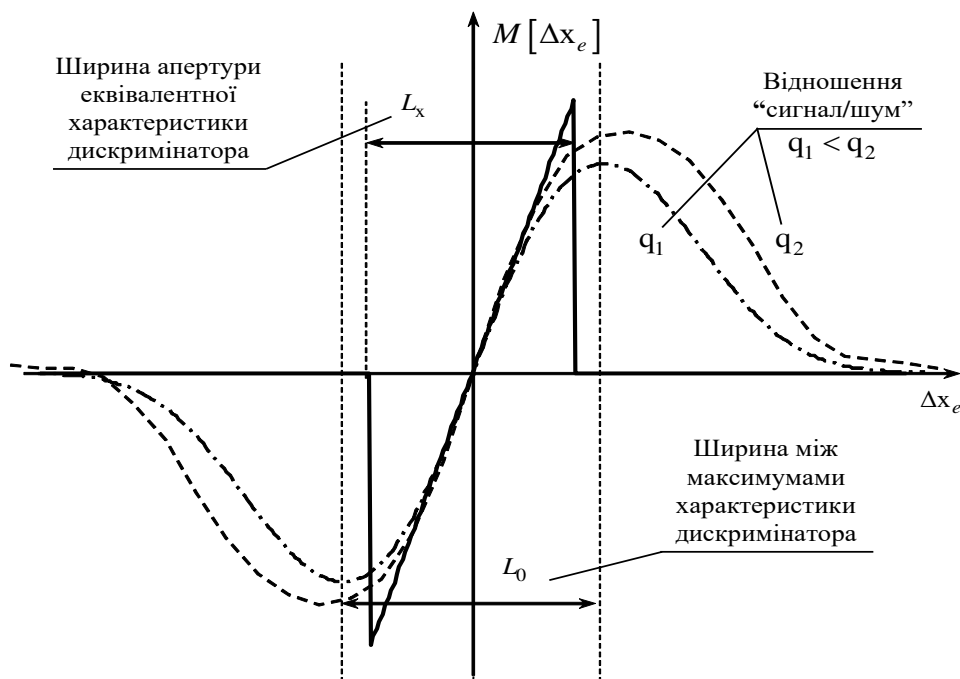
характеристик фазових флуктуацій її радіоімпульсів достатньо розглянуто у [10, 11].

Результати проведеної оптимізації доцільно врахувати у алгоритмах супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю з метою підвищення їх ефективності.

**Метою статті** є аналіз можливості підвищення стійкості супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю та надання пропозицій щодо збільшення точності її поточного вимірювання.

### Основний матеріал

Для оцінки стійкості супроводження ПО в дискретних радіотехнічних слідкуючих системах високого порядку за ймовірністю потрапляння помилки екстраполяції координати усередину інтервалу  $(-L_x/2, L_x/2)$  в [6] запропоновано використовувати еквівалентну кусково-лінійну апроксимацію ДХ (рис. 1).



**Рис. 1.** Дискримінаційна характеристика дискримінатора та її апроксимація:  $\Delta x_e$  – помилка екстраполяції координати;  $M[\Delta x_e]$  – математичне сподівання (МО) величини вихідної напруги дискримінатора, Джерело: [6]

Як можна побачити, у лінійних слідкуючих системах помилки супроводження ПО (екстраполяції  $\Delta x_e$ ) мають нормальний закон розподілу [6, 12], а ймовірність знаходження помилки екстраполяції в межах інтервалу  $(-L_x/2, L_x/2)$  визначається функцією помилок:

$$P_{1x} = 0,5 \left[ \operatorname{erf} \left[ \frac{0,5L_x + m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] + \operatorname{erf} \left[ \frac{0,5L_x - m_e}{\sqrt{2}\sigma_e} \right] \right], \quad (1)$$

де  $m_e$  – математичне сподівання (систематична складова);  $\sigma_e$  – середньоквадратичне відхилення помилки екстраполяції координати.

У випадку, якщо алгоритми оцінювання й екстраполяції слідкуючої системи мають структуру

адекватну моделі руху ПО, систематична складова помилки дорівнює нулю і вираз (1) набуває вигляду:

$$P_{1x} = \operatorname{erf} \left[ \frac{L_x}{2\sqrt{2}\sigma_e} \right]. \quad (2)$$

У першому наближенні (1) та (2) можна сприймати як вирази для визначення ймовірності відсутності зриву супроводження ПО протягом одного інтервалу  $T_n = t_n - t_{n-1}$  між радіоконтактами з ПО. На практиці таке наближення буде давати адекватний результат при  $\sigma_e \ll L_x$ , тобто, при  $P_{1x} \approx 1$ .

Умова  $P_{1x} < 0,9$  відповідає ситуацій, коли помилка екстраполяції є порівняною з напівшириною апертури. При помітній різниці щільності розпо-

ділів ймовірностей помилок оцінювання й екстраполяції для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО можна використовувати вирази (1) та (2), якщо в них еквівалентний розмір апертури  $L_x$  встановлювати з урахуванням відношення “сигнал/шум”  $q$ .

При виборі  $L_x$  головним критерієм, який гарантує можливість використання виразів (1) та (2) для оцінки ймовірності відсутності зриву автосупроводження ПО, має бути збіг результатів статистичних випробувань стійкості супроводження системи з реальним дискримінатором та аналітичних розрахунків [6].

Подальші дослідження стійкості супроводження ПО здійснюються із використанням визначеної величини  $L_x$  та виразів (1) і (2).

Недоліком розглянутої методики є необхідність щодо проведення складного та об'ємного статистичного дослідження. Однак, тільки це може гарантувати достовірність результатів, що даються аналітичними розрахунками ймовірності відсутності зриву супроводження ПО (1) і (2).

Максимальна стійкість супроводження ПО, як можливо побачити з (1) і (2), досягається в системах, оптимальних за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки супроводження.

**1. Модель руху маневруючих ПО.** Оскільки причиною руху матеріальних ПО є діючі на них сили, основою для побудови моделі руху об'єкта є другий закон Ньютона та рівняння кінематики, які зв'язують між собою вектори прискорення, швидкості і положення ПО.

Модель руху ПО в більшості практичних випадків будують на основі кінематичних рівнянь і статистичної моделі прискорень. Для математичного опису руху сучасних ПО пропонується застосовувати модель руху маневруючих ПО [13], в якій складові вектора прискорення ПО покладаються взаємно незалежними експоненціально корельованими випадковими процесами із багатопіковою щільністю розподілу ймовірностей (рис. 2).

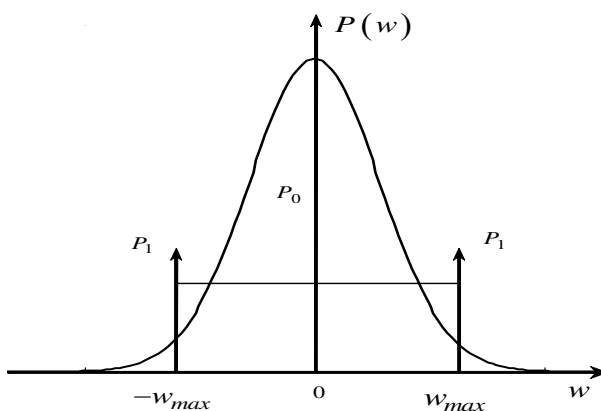


Рис. 2. Багатопікова щільність розподілу ймовірностей Джерело: [13]

Синтез алгоритму оцінювання стану ПО при такій щільності розподілу ймовірностей складових

вектору прискорення не може проводитися у рамках теорії оптимальної лінійної фільтрації, у зв'язку з чим багатопіковий розподіл ймовірностей, який досить адекватно відображає характер зміни прискорення багатьох маневруючих ПО, замінюється еквівалентним нормальним розподілом.

При цьому, МО складових вектору прискорення покладається рівним нулю, а середньоквадратичне відхилення обчислюється наступним чином:

$$\sigma_M = \frac{w_{\max}}{3}(1 + 4P_1 - P_0), \quad (3)$$

де  $w_{\max} = n_{\max} g$  – максимальне значення прискорення  $g$ , обумовлене маневреними можливостями ПО (максимальними перевантаженнями  $n_{\max}$ );  $P_1$  – ймовірність маневру ПО з інтенсивністю  $\pm w_{\max}$ ;  $P_0$  – ймовірність відсутності маневру ПО.

Кореляційна функція величин прискорення ПО при цьому має наступний вигляд:

$$R_M(\tau) = \sigma_M^2 e^{-|\tau|/T_M}, \quad (4)$$

де  $T_M$  – стала маневрування ПО, яка є величиною зворотною до частоти маневрування та може становити від одиниць до десятків секунд;  $\sigma_M^2$  – дисперсія значень прискорення ПО.

Ймовірності  $P_1$  та  $P_0$  визначаються, виходячи з аналізу особливостей застосування ПО й можуть змінюватися у широких межах.

Аналіз рисунку 2 та виразу (3), вказує на те, що величина  $\sigma_M$  залежно від співвідношення між  $P_1$  та  $P_0$  також може змінюватися у досить широких межах.

Використовуючи метод формуючого фільтра, можна записати стохастичне рекурентне матричне рівняння стану [12, 14]:

$$\bar{x}(t_n + T_n) = \Phi(T_n) \bar{x}(t_n) + B \eta(t_n), \quad (5)$$

де  $\bar{x}(t_n)$ ,  $\bar{x}(t_n + T_n)$  – поточне та наступне значення координати ПО, відповідно;  $\Phi(T_n)$  – перехідна матриця стану за радіальною швидкістю ПО;  $B = (0 \ 1)^T$  – матриця збудження за радіальною швидкістю ПО;  $\eta(t_n)$  – послідовність шумів збудження з нульовим середнім та дисперсією  $v_\eta(T_n)$ .

Перехідна матриця стану за радіальною швидкістю ПО та дисперсія шумів збудження визначаються відповідними виразами вигляду:

$$\Phi(T_n) = \begin{pmatrix} 1 & T_n \\ 0 & \rho \end{pmatrix}, \quad (6)$$

$$v_\eta(T_n) = \sigma_M^2 (1 - \rho^2), \quad (7)$$

де  $\rho = e^{-T_n/T_M}$  – коефіцієнт кореляції значень прискорення на інтервалі спостережень.

**2. Модель спостережень.** Відомо, що вихідна величина дискримінатора може бути визначеною за



допомогою такого виразу [12, 15, 16]:

$$y(t_n) = F[\Delta x_e(t_n)] + f(t_n), \quad (8)$$

де  $F[\Delta x_e(t_n)]$  – МО величини вихідної напруги дискримінатора, обумовлене його ДХ;  $f(t_n)$  – дискретна послідовність шумів спостереження відповідної координати з нульовим середнім та дисперсією  $v_f(t_n)$ , що визначається флуктуаційною характеристикою дискримінатора;  $\Delta x_e(t_n) = x(t_n) - x_e(t_n)$  – помилка екстраполяції координати, тобто, величина неузгодженості між дійсним і екстрапольованим значеннями координати ПО.

Зазначені обставини дозволяють для зручності розв'язку задачі оцінки стійкості супроводження повітряного об'єкту використовувати лінеаризовану (еквівалентну) математичну модель дискримінатора (модель спостережень), яка описується таким рівнянням:

$$y(t_n) = \Delta x_e(t_n) + f(t_n). \quad (9)$$

Для рішення задачі визначення ширини апертури еквівалентної характеристики дискримінатора використовувалася нелінійна математична модель дискримінатора, в якій були враховані граничні ефекти, що виникають при виході помилки супроводження ПО за межі лінійної ділянки ДХ.

**3. Структура лінійних алгоритмів оцінювання й екстраполяції.** Рівняння моделі спостережень (9) можна записати як:

$$y(t_n) = H(\bar{x}(t_n) - \bar{x}_e(t_n)) + f(t_n), \quad (10)$$

де  $H = (1 \ 0)$  – матриця спостережень за радіальною швидкістю ПО;  $\bar{x}_e(t_n)$  – вектор-стовпець екстрапольованих до поточного вимірювання координат стану ПО.

Алгоритм слідкуючої системи, оптимальної за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки, може бути описаний рекурентними рівняннями оцінювання й екстраполяції [12] такого вигляду:

$$\hat{\bar{x}}(t_n) = \hat{\bar{x}}_e(t_n) + K(t_n) y(t_n), \quad (11)$$

$$\hat{\bar{x}}_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n) \hat{\bar{x}}(t_n), \quad (12)$$

де  $K(t_n)$  – матриця коефіцієнтів підсилення.

Матриця  $K(t_n)$  розраховується з таких рекурентних рівнянь:

$$K(t_n) = V_e(t_n) H^T [H V_e(t_n) H^T + v_f(t_n)]^{-1}; \quad (13)$$

$$V(t_n) = V_e(t_n) - V_e(t_n) H^T \times \\ \times [H V_e(t_n) H^T + v_f(t_n)]^{-1} H V_e(t_n); \quad (14)$$

$$V_e(t_n + T_n) = \Phi(T_n) V(t_n) \Phi^T(T_n) + B v_\eta(T_n) B^T, \quad (15)$$

де  $V, V_e$  – матриці других центральних моментів (коваріаційні матриці) помилок оцінювання й екстраполяції стану ПО відповідно.

У алгоритмах (14) та (15) параметрами, які підлягають завданню й визначають якість функціонування системи, є  $\sigma_m, T_m$  та  $v_f$ , причому, перші двоє залежать від маневрених властивостей ПО (визначають дисперсію шумів збудження  $v_\eta(T_n)$ ), а третій – від величини відношення “сигнал/шум” та параметрів дискримінатора (визначає дисперсію шумів спостереження  $v_f(t_n)$ ).

В РЛС супроводження ПО використовуються алгоритми з фіксованою матрицею коефіцієнтів підсилення  $K(t_n)$ . Тому, чим точніше зазначені параметри відповідають реальним характеристикам зовнішніх впливів, тим ближче точність супроводження ПО до потенційно досяжної.

**4. Аналіз стійкості супроводження радіотехнічною слідкуючою системою (РТСС) за радіальною швидкістю.** Методику, що базується на застосуванні еквівалентного розміру апертури дискримінатора  $L_x$  [17, 18], пропонується використати для оцінки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО у РТСС за радіальною швидкістю [19].

Структура алгоритмів оцінювання та екстраполяції координат ПО у розглянутих системах задається наведеними вище виразами (11-15). Параметри алгоритмів супроводження вибиралися виходячи з аналізу маневрених можливостей сучасних ПО з урахуванням середньої тривалості маневру та максимальної інтенсивності.

Розрахунки ймовірності відсутності зриву супроводження ПО виконувалися за умовою, що параметри систем супроводження, які обумовлені рівняннями (11-15), вважалися повністю адекватними моделям руху ПО (5) та спостережень (10) [12, 20].

У такому разі, при використанні стохастичної моделі руху (5) та спостережень (10) дисперсії помилок  $\sigma_e^2$  дорівнюють елементам  $v_{e11}$  матриці помилок екстраполяції вектору стану  $V_e$  [12].

Для перевірки достовірності аналітичних результатів у ряді контрольних точок ймовірність відсутності зриву супроводження ПО визначалася шляхом проведення прямого статистичного експерименту. У ході прямого експерименту рух ПО задавався безпосередньо стохастичним рівнянням (5), та використовувалися моделі реальних дискримінаторів.

Найбільш повною характеристикою впливу стійкості супроводження ПО на можливості РЛС є ймовірність відсутності зриву супроводження протягом інтервалу часу  $T_c$ , що дорівнює середній тривалості супроводження ПО:

$$P_x(T_c) = \prod_{n=1}^{n_c} P_{1x}(T_n), \quad (16)$$

де  $P_{1x}(T_n)$  – ймовірність відсутності зриву супроводження ПО за радіальною швидкістю на протязі

одного інтервалу вимірювання координат;  $n_c$  – кількість інтервалів супроводження повітряного об'єкту.  
Якщо

$$T_n = \text{const}$$

та

$$P_{1x}(T_n) = P_{1x},$$

розподіл (16) перетвориться до такого найпростішого вигляду:

$$P_x(T_c) = P_{1x}^{T_c/T_n}. \quad (17)$$

Виходячи з (17) проведено розрахунки ймовірності  $P_{x100}$  відсутності зриву повітряного об'єкту за 100 с для системи супроводження за радіальною швидкістю, результати яких наведено на рис. 3.

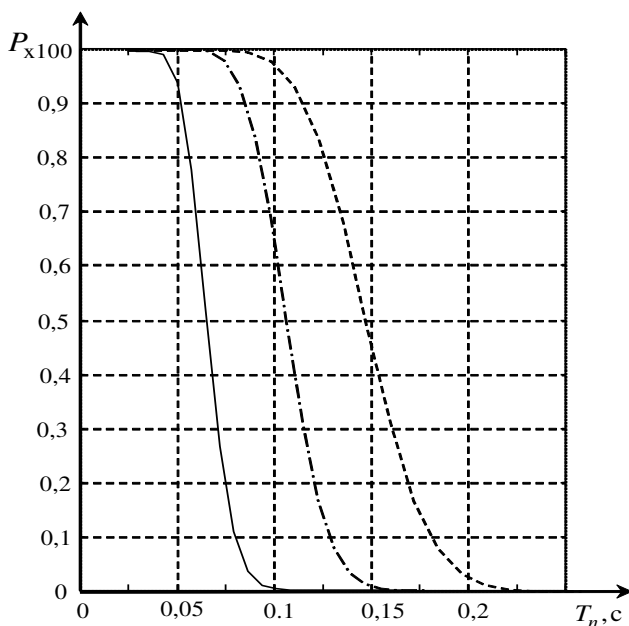


Рис. 3. Залежності ймовірності  $P_{x100}$  відсутності зриву супроводження протягом 100 с вимірювання координат від періоду вимірювання  $T_n$  (джерело: розроблено авторами)

Суцільною лінією представлено графіки для відношення “сигнал/шум” – 10 дБ, штрих-пунктирною – 14 дБ та пунктирною – 20 дБ.

З наведених графіків можна визначити, що при малих відношеннях “сигнал/шум”, інтервал вимірювання координат повітряного об'єкту не повинен перевищувати 0,03 с.

Отримані результати дозволяють визначити одне із “слабких місць”, яким є система супроводження за радіальною швидкістю повітряного об'єкту [20-22].

Іншою важливою характеристикою стійкості є середній час до зриву супроводження повітряного об'єкту.

У випадку, коли ймовірність відсутності зриву супроводження повітряного об'єкту на інтервалі

$$T_c = n_c T_n$$

задовольняє умові (17), ймовірність першого зриву  $Q_x(T_c)$  після  $T_c$  секунд супроводження ПО задовольняє геометричному закону розподілу:

$$Q_x(T_c) = (1 - P_{1x}) P_x(T_c), \quad (18)$$

для якого середній час до зриву супроводження ПО визначається наступним виразом:

$$\bar{T}_{cx} = \frac{P_{1x}}{1 - P_{1x}} T_n. \quad (19)$$

Графіки залежності середнього часу до зриву супроводження  $\bar{T}_{cx}$  за радіальною швидкістю повітряного об'єкту від періоду вимірювання  $T_n$  наведено на рис. 4.

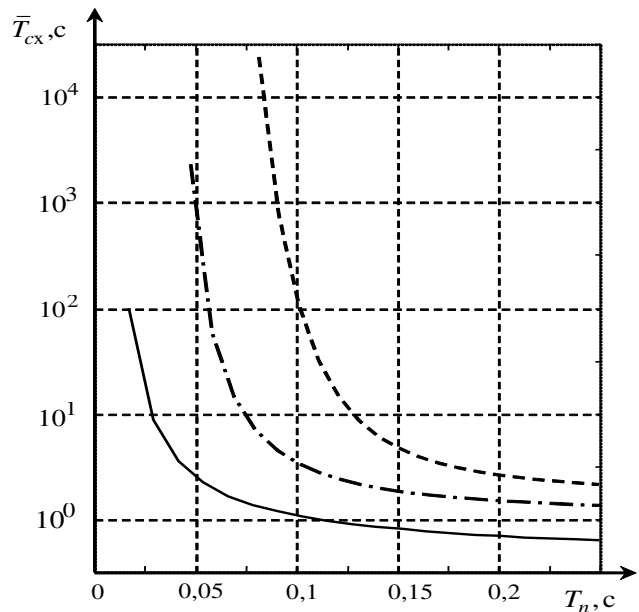


Рис. 4. Залежності середнього часу до зриву супроводження  $\bar{T}_{cx}$  за радіальною швидкістю від періоду вимірювання  $T_n$  (джерело: розроблено авторами)

З аналізу наведених на рис. 4 графіків можливо заключити, що при малих відношеннях “сигнал/шум” прийнятним є мінімально можливий для багатоканальної РЛС період вимірювання координат, а середній час до зриву супроводження ПО при зростанні періоду вимірювання може становити усього лише одиниці секунд, що є неприпустимим.

Наведені результати отримано для випадку надходження від РЛС потенційних поточних оцінок радіальної швидкості ПО, тобто оцінок, які отримані в результаті часово-частотної обробки радіолокаційного сигналу за наявності лише адитивного впливу внутрішніх шумів приймального пристрою.

**5. Пропозиції щодо зниження впливу умов поширення та відбиття радіолокаційного сигналу на точність поточного вимірювання радіальної швидкості ПО.** Реальний процес радіолокаційного спостереження аеродинамічних ПО здійснюється в умовах впливу неоднорідностей середовища розповсюдження радіохвиль.

Також слід відзначити, що сучасні ПО здатні виконувати завдання за призначенням на малих та гранично малих висотах з оглядом рельєфу місцевості. При цьому, зростання їхніх маневрених можливостей обумовлює виникнення ефекту блукання радіолокаційного центру повітряного об'єкту, що спостерігається внаслідок швидкої зміни положення його "блискучих точок". Вказане є причиною виникнення флюктуацій фазового фронту хвилі сигналу при відбитті його від маневруючого повітряного об'єкту, що спостерігається під малими кутами місця та обумовлює наявність доплерівського шуму повітряного об'єкту.

Вказане суттєво впливає на якість поточних оцінок радіальної швидкості ПО та, як слід, на стійкість його супроводження.

Як доведено у [7], для сучасних РЛС в умовах регулярного вимірювання, на точність оцінювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів у значно більшому ступені впливають статистичні характеристики флюктуацій фаз її радіоімпульсів ніж відношення "сигнал/шум". При цьому, доведено, що для РЛС з імпульсним зондуванням фазові флюктуації радіоімпульсів прийнятої пачки розподілені за нормальним законом, а їх кореляція убуває від імпульсу до імпульсу за знакозмінним законом.

Вище викладене підтверджено результатами експериментальних досліджень [23], де у якості радіолокаційного вимірювача було використано розташовану на узбережжі Азовського моря РЛС 35Д6. Отримана кореляційна функція фазових флюктуацій прийнятого сигналу була апроксимована осцилюючою залежністю.

У [7] доведено, що збільшення дисперсії фазових флюктуацій  $\sigma_\varphi^2$  на порядок в області малих значень

$$(\sigma_\varphi^2 = 0,01 \dots 0,1 \text{ рад}^2)$$

майже не впливає на зміну величини дисперсії помилки вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів.

Збільшення даної дисперсії на порядок в області суттєвих значень, які можуть мати місце в реальних випадках

$$(\sigma_\varphi^2 = 1 \dots 10 \text{ рад}^2),$$

призводить до зростання дисперсії помилки вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів на порядок і більше.

Для вказаних умов у [8] оцінено можливі значення складових середньоквадратичної помилки (СКП) вимірювання радіальної швидкості ПО, які виникають внаслідок впливу корельованих флюктуацій фази радіолокаційного сигналу, що дозволяє оцінювати ступінь зниження ефективності алгоритмів супроводження та виявлення маневру.

Для РЛС супроводження ПО на дальностях виявлення 50...150 км, неоднорідності тропосфери розміром 100 м здатні викликати флюктуації фази з інтегралом кореляції

$$\tau = 0,1 \dots 1 \text{ с}$$

та дисперсією

$$\sigma_\varphi^2 = 4,8 \dots 9,7 \text{ рад}^2$$

при довжині хвилі РЛС

$$\lambda = 3 \dots 5 \text{ см [8]}.$$

Для наведених даних розраховано складові СКП вимірювання радіальної швидкості ПО, що обумовлені внутрішніми шумами та фазовими флюктуаціями для пачок з різною кількістю радіоімпульсів. Отримані результати свідчать про те, що значення флюктуаційних складових СКП, здатні на порядок і більше перевершувати складові, що обумовлені впливом внутрішніх шумів приймального пристрою РЛС та досягати 3...7 м/с.

Додатковий вплив маневру ПО та відбиття радіохвиль від підстильної поверхні може призвести до суттєвого збільшення даних величин. Відповідне оцінювання стосовно впливу неоднорідностей атмосфери на зниження точності вимірювання частоти Доплера проведено у [9].

При переведенні повітряного об'єкту радіолокаційного спостереження з режиму огляду у режим супроводження, наявність флюктуаційної складової помилки вимірювання його радіальної швидкості може суттєво погіршити якість виконання операцій вторинної обробки радіолокаційної інформації, викликаючи небезпеку зриву ПО з супроводження за радіальною швидкістю.

Тому, для зменшення впливу вказаних факторів пропонується до використання оптимальний алгоритм поточного вимірювання частоти Доплера пачки радіоімпульсів з врахуванням флюктуацій їх початкових фаз, що має практичну важливість для розв'язання завдання супроводження складних аеродинамічних ПО, що маневрують [10, 11].

При цьому, важливим є застосування вказаної оптимізації для довільного виду кореляційної функції фазових флюктуацій, що обумовлено можливістю зміни параметрів даної кореляційної функції внаслідок відповідної зміни умов радіолокації при польоті аеродинамічних повітряних об'єктів на малих та гранично малих висотах з виконанням маневрування.

За результатами проведеного чисельного оцінювання встановлено, що у звичайних умовах функціонування РЛС підвищення точності вимірювання радіальної швидкості ПО за рахунок врахування фазових флюктуацій у залежності від виду їх кореляційної функції є незначною та може становити 1,1...1,45 разів.

В умовах переважного впливу фазових флюктуацій, тобто внаслідок обуреного стану атмосфери, суттєвого впливу земної (морської) поверхні та виконання повітряним об'єктом складного маневрування, дане підвищення точності може досягати 1,86...6,29 разів [11].

Таким чином вказані пропозиції здатні забезпечити додаткове підвищення стійкості супроводження високоманеврених повітряних об'єктів, але це

потребує отримання достатньо якісних оцінок статистичних характеристик флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу.

### Висновки

1. Розвиток маневрених можливостей сучасних ПО потребує оцінки спроможностей радіотехнічної слідкуючої системи на предмет стійкості супроводження таких об'єктів. Для оцінки стійкості супроводження повітряного об'єкту можливо застосовувати методику, яка заснована на використанні еквівалентного розміру апертури характеристики дискримінатора.

2. В системі супроводження ПО за радіальною швидкістю при  $T_n > 0,1$  с основною складовою помилки екстраполяції є динамічна складова. Період вимірювання координат  $T_n = 0,1$  с, що використовується у сучасних РЛС, є завеликим для супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю при малих відношеннях “сигнал/шум”.

3. При  $T_n = 0,1$  с та малих відношеннях “сигнал/шум”, середній час до зриву супроводження повітряного об'єкту за радіальною швидкістю може скласти декілька секунд, тобто є суттєво меншим середнього часу знаходження об'єкта на супроводженні. Тому, при малому відношенні “сигнал/шум” та маневруванні ПО доцільно зменшувати період вимірювання координат до значень

$$T_n \approx 0,01 \dots 0,03 \text{ с.}$$

4. Зменшення динамічної складової помилки супроводження ПО за радіальною швидкістю є можливим шляхом вдосконалення алгоритмів супроводження, використання адаптивних алгоритмів та змінного періоду вимірювання координат.

5. Флуктуації фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу, відбитого від маневруючого ПО, в реальних умовах поширення радіохвиль здатні додатково знизити точність поточного вимірювання радіальної швидкості об'єкта і, як слід, зменшити ймовірність відсутності зриву його супроводження. Результати чисельного аналізу свідчать про необхідність пошуку методів зниження впливу флуктуацій фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу при вимірюванні радіальної швидкості маневруючого ПО.

6. Підвищення стійкості супроводження високоманеврених ПО за радіальною швидкістю додатково може бути забезпечено за рахунок врахування випадкових викривлень фазового фронту хвилі радіолокаційного сигналу шляхом проведення статистичної оптимізації його обробки. При цьому, вказана оптимізація дозволяє забезпечити підвищення точності вимірювання радіальної швидкості ПО до декілька разів, але це вимагає оцінювання статистичних характеристик корельованих фазових флуктуацій з високою точністю.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Довідник учасника АТО: озброєння й військова техніка Збройних Сил Російської Федерації / за ред. А.М. Алімпієва. – Х.: Оригінал, 2015. – 732 с.
2. Радиоэлектронные системы. Основы построения и теория. / Под. ред. Я.Д. Ширмана. – М.: З.А.О. «МАКВИС», 1998. – 828 с.
3. Карлов В.Д., Кондратенко А.П., Шейгас А.К., Ситник Ю.Б. К вопросу о измерении доплеровской частоты сигнала отраженного от цели лоцируемой за пределами радиогоризонта над морем. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2014. – № 1 (14). – С. 115-117.
4. Петрушенко М.М. Особливості застосування радіотехнічних систем Повітряних Сил в нестабільних гідрометеорологічних умовах та стихійних метеорологічних явищах. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2009. – № 2 (10). – С. 54-57.
5. Карлов В.Д., Ковальчук А.О., Кузнєцов О.Л., Бесова О.В., Струцінський О.В., Ковальчук Ю.О. Методика вибору фіксованих параметрів алгоритмів радіотехнічних слідкуючих систем РЛС. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2022. – Вип. 4(74). – С. 53-58.
6. Хисматулин В.Ш., Ковальчук А.О., Сосунов О.О., Сачук І.І. Оценка устойчивости сопровождения целей с помощью эквивалентного размера апертуры характеристики дискриминатора. *Системи обробки інформації*. – 2004. – Вип. 2. – С. 125-132.
7. Карлов В.Д., Кузнєцов О.Л., Артеменко А.М., Карлов А.Д. Зниження точності вимірювання частоти пачки радіоімпульсів внаслідок впливу умов її поширення і відбиття. *Системи управління навігації та зв'язку*. – 2019. – Вип. 4 (56). – С. 130-134.
8. Кузнєцов О.Л., Коломіїцев О.В., Кітов В.С., Карлов А.Д. Оцінювання точності поточного вимірювання радіальної швидкості аеродинамічного об'єкту в когерентно-імпульсній РЛС супроводження. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. – 2020. – Вип. 3(40). – С. 91-99.
9. Kuznietsov O., Karlov V., Karlov A., Kiyko A, Lukashuk O., Biesova O., Petrushenko M. Estimation of the Dispersion of the Error in Measuring the Frequency of a Pack with Correlated Fluctuations in the Initial Phases of its Radio Pulses. *2020. IEEE Ukrainian Microwave Week. On 2020 IEEE 12th International Conference on Antenna Theory and Techniques (ICATT)*. Kharkiv, Ukraine, September 21-25, 2020. Volume 1. P. 174-178.
10. Карлов В.Д., Кузнєцов О.Л., Артеменко А.М. Постановка задачі оптимального оцінювання радіальної швидкості цілі при врахуванні корельованих флуктуацій початкових фаз радіоімпульсів прийнятої пачки. *Збірник наукових праць Харківського національного університету Повітряних Сил*. – 2018. – Вип. 3(57). – С. 115-121.
11. Yevseiev S., Kuznietsov O., Herasimov S., Horielyshev S., Karlov A., Kovalov I., Kolomiitsev O., Lukashuk O., Milov O., Panchenko V. Development of an optimization method for measuring the Doppler frequency of a packet taking into account the fluctuations of the initial phases of its radio pulses. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2021. 2/9 (110). P. 6-15.
12. Сейдж Э., Мелс Дж. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: Пер. с англ. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

13. Зингер Р.А. Оценка характеристик оптимального фильтра для слежения за пилотируемой целью. *Зарубежная радиоэлектроника*, 1971. – №8. – С. 40-57.
14. Кузьмин С.З. Цифровая радиолокация. – К.: КВЦ, 2000. – 430 с.
15. Теоретические основы радиолокации. / Под ред. Я.Д. Ширмана. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
16. Бартон Д.К., Вард Г.Р. Справочник по радиолокационным измерениям: Пер. с англ. – М.: Сов. радио, 1976. – 392 с.
17. Хисматулин В.Ш., Сачук И.И., Ковальчук А.А. Оценка вероятности надежного сопровождения аэродинамических целей многоканальной радиолокационной станцией. *Авиационно-космическая техника и технология*. – 2001. – Вып. 22. – С. 259-262.
18. Хисматулин В.Ш., Зубрицкий Г.М., Ставицкий О.М., Ковальчук А.О. Оценка устойчивости сопровождения по дальности и угловым координатам сверхманевренных летательных аппаратов многоканальной РЛС. *Системы обработки информации*. – 2009. – Вып. 4(78). – С. 130-133.
19. Канащенко А., Корчагин В., Меркулов В., Самарин О. Сверхманевренность и бортовые радиолокационные системы. *Радиотехника*. – 2002. – № 5. – С. 43-50.
20. Kovalchuk A.O., Oleshchuk M. M., Karlov V. D., Karpenko O. V., Besova O. V., Lukashuk O. V. Analysis of sensitivity of target tracking systems to external interference in multichannel radars with fixed parameters. NTU "KHPI". Сучасні інформаційні системи. КН.: NTU "KHPI". 2021. Т. 5. No. 1. pp. 82-86. doi: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2021.1.11>
21. Коломійцев О.В., Сачук І.І., Ковальчук А.О. та ін. Канал вимірювання радіальної швидкості літальних апаратів з оптико-електронним модулем для мобільної суміщеної вимірювальної системи G01 S 17/42, G01 S 17/66 // Патент України на корисну модель № 111452 – № u201604967; Заяв. 04.05.2016; Опубл. 10.11.2016; Бюл. № 21. 16 с.
22. Kuznietsov O., Kovalchuk V., Karlov D., Kovalchuk A., Vasylyshyn V., Yarovy S. Providing the Required Accuracy of Measurements of Spatial Coordinates of Aerial Objects // 2020 IEEE Ukrainian Microwave Week. On 2020 IEEE 6th International Symposium on Microwaves, Radar and Remote Sensing (MRRS), Kharkiv, 2020. V. 2. P. 226-229.
23. Коваленко А. А., Кучук Г. А. Методи синтезу інформаційної та технічної структур системи управління об'єктом критичного застосування. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 1. С. 22–27. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.1.04>
24. Свиридов А. С., Коваленко А. А., Кучук Г. А. Метод перерозподілу пропускної здатності критичної ділянки мережі на основі удосконалення ON/OFF-моделі трафіку. *Сучасні інформаційні системи*. 2018. Т. 2, № 2. С. 139–144. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2018.2.24>
25. Худов В.Г. Аналіз відомих методів сегментування зображень, що отримані з бортових систем оптикоелектронного спостереження / В.Г. Худов, Г.А. Кучук, О.М. Маковейчук, А.В. Крижний // Системи обробки інформації, 2016. – Вып. 9 (146). – С. 77-80.
26. Ткачов В. М., Коваленко А. А., Кучук Г. А., Ні Я. С. Метод забезпечення живучості високомобільної комп'ютерної мережі. *Сучасні інформаційні системи*. 2021. Том 5, № 2. С. 159-165. DOI: <https://10.20998/2522-9052.2021.2.22>
27. Карлов В.Д., Родюков А.О., Пічугін І.М. Статистичні характеристики радіолокаційних сигналів відбитих від місцевих предметів в умовах аномальної рефракції. *Наука і техніка Повітряних Сил Збройних Сил України*. 2015. Вып. 4 (21). С. 71-74.
28. Karlov Volodymyr Можливості врахування впливу тропосфери при вимірюванні кутових координат та висоти аеродинамічного об'єкта / Volodymyr Karlov, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Igor Krasnoshapka, Ivan Petrushenko, Oleh Strutsinskiy // Системи управління, навігації та зв'язку. Збірник наукових праць. – Полтава: ПНТУ, 2022. – Т. 3 (69). – С. 121-127. – doi:<https://doi.org/10.26906/SUNZ.2022.3.121>
29. Кузнецов, О., Коломійцев, О., Яровий, С., Олійник, Р., & Живець, Ю. (2021). Підвищення точності вимірювання кутових координат повітряних об'єктів при багатоканальному прийомі радіолокаційного сигналу. *Наукові праці Державного науково-дослідного інституту випробувань і сертифікації озброєння та військової техніки*, (9), 65-72. <https://doi.org/10.37701/dndivsovt.9.2021.09>.

Received (Надійшла) 25.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

### Providing the specified resistance of tracking of aerial objects by radial velocity in real conditions of radiolocation signal propagation and reflection

Andrii Kovalchuk, Oleksandr Kuznietsov, Oleksii Kolomiitsev, Anton Karlov

**Abstract.** Tracking of aerial objects is carried out by multi-channel radar stations and is provided by subsystems for determining range, radial velocity and angular coordinates. If the tracking objects are highly maneuverable, then there is a significant decrease in the accuracy and stability of the tracking relative to the area of lack of maneuvering, which is quite long. In the event of erroneous or outdated parameters of the tracking system's algorithms, there is a significant increase in the error of tracking the aircraft in the area of the maneuver, which can lead to the breakdown of tracking due to a significant dynamic component error. In order to assess the stability of tracking, it is proposed to use the equivalent size of the aperture of the discriminating characteristic. The influence of the parameters of the stochastic model of the aircraft movement, the observation model and the period of coordinate measurement on the stability of tracking according to the radial velocity was evaluated. As a result of the conducted research, it becomes possible to further evaluate the feasibility of adaptation to the maneuverability characteristics of aerial objects and provide recommendations regarding the selection of the coordinate measurement period in multi-channel radars. It is noted that the stability of the tracking process depends on the accuracy of the current measurement of the radial velocity of the object, which is mainly determined by the statistical characteristics of the fluctuations of the phase front of the radar signal wave. The influence of these fluctuations is due to the presence of turbulent inhomogeneities of the atmosphere, the nature of the object's maneuver and the reflection of radio waves from the earth's or sea's surface. Proposals are given to take into account the specified fluctuations and reduce their impact on the quality of solving the task of tracking air objects. Increasing the stability of tracking highly maneuverable air objects at radial speed can additionally be ensured by taking into account random distortions of the radar signal wave phase front by performing statistical optimization of its processing.

**Keywords:** extrapolation error variance, radial velocity, automatic tracking system, follow-up measurement, statistical characteristics, tracking, phase front fluctuations.

Л. О. Нікітіна, Н. В. Дженюк, Л. В. Борисова

Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

## ІТ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ У ПІДГОТОВЦІ ІНЖЕНЕРІВ З ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙ

**Анотація.** Розвиток телекомунікаційної галузі останніми роками йде у напрямку зростання кількості підключених до мережі пристроїв і абонентів. У формуванні телекомунікаційної галузі маємо програмно визначені мережі, віртуалізацію мережевих функцій, Інтернет речей і 5G. Сьогодні продуктивну роботу телекомунікаційних мереж та систем із забезпеченням належної якості сервісів неможливо уявити без застосування технологій та алгоритмів штучного інтелекту й використання відповідного програмного забезпечення. Освітні програми та навчальні плани з підготовки інженерів з телекомунікацій українських університетів мають оперативно враховувати сучасні тенденції розвитку та новації у телекомунікаційній галузі. На нашу думку, для підготовки висококваліфікованих та конкурентоспроможних спеціалістів з телекомунікацій необхідно внести певні зміни в навчальні плани, пов'язані з програмуванням, технологіями аналізу даних та машинного навчання, застосуванням моделей, методів та алгоритмів штучного інтелекту у телекомунікаційній галузі. У статті запропоновано варіант включення відповідних дисциплін до навчальних планів.

**Ключові слова:** телекомунікаційна інженерія, аналітика великих даних, машинне навчання, штучний інтелект, бездротова мережа, *імерсивне навчання*.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Телекомунікаційний сектор у світі стрімко оновлюється та розвивається. Відповідно до цього виникають нові виклики, пропонуються нові можливості та тенденції, на які варто звертати увагу у поточний період та у наступні роки [1].

Розвиток телекомунікацій в Україні повинен здійснюватися швидкими темпами. Закон України "Про телекомунікації" визначає основні засади і напрями розвитку телекомунікаційних мереж загального користування і концепцію розвитку телекомунікацій. Телекомунікаційні мережі та системи є невід'ємною частиною виробничої та соціальної інфраструктури України і призначені для забезпечення телекомунікаційними послугами користувачів різних категорій - фізичних та юридичних осіб, органів державної влади. "Науково-технічне забезпечення функціонування й розвитку телекомунікацій здійснюється шляхом організації наукових досліджень, впровадження нових технологій та засобів телекомунікацій" [2]. Впровадження інформаційних технологій, методів, моделей та алгоритмів штучного інтелекту у телекомунікації буде визначати подальший розвиток галузі. Тому відповідна підготовка висококваліфікованих спеціалістів у галузі телекомунікацій є важливою та актуальною задачею вищих навчальних закладів.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Розгляду питань викликів, нових можливостей та тенденцій у телекомунікаційному секторі присвячують свої публікації зарубіжні та вітчизняні автори [1–15].

**Постановка завдання.** Очікується, що розвиток основних тенденцій у сфері телекомунікацій (програмно визначені мережі (SDN), віртуалізація мережевих функцій (NFV), застосування технології 5G та штучного інтелекту (AI)) триватиме й надалі. Ці зміни мають бути відображені в навчальних програмах підготовки інженерів з телекомунікацій.

Навчальні програми вищої освіти з телекомунікацій повинні не тільки представляти сучасні телекомунікаційні технології, але й розвивати гнучкість сприйняття нового студентами, вміння реагувати на майбутні зміни та вирішувати міждисциплінарні задачі.

У цій статті ми обговорюємо найважливіші зміни, які відбуваються у галузі телекомунікацій, і пропонуємо, яким чином врахувати їх у освітніх програмах та навчальних планах для покращення знань та розвитку професійних навичок студентів.

### Виклад основного матеріалу

Телекомунікаційна мережа наступного покоління має мати єдину інфраструктуру і повинна ефективно та гнучко надавати різноманітні послуги, такі як розширений мобільний ширококутний зв'язок, наднадійний зв'язок із малою затримкою та зв'язок масового машинного типу. Вона також повинна підтримувати співіснуючий доступ за кількома стандартами, такими як 5G, LTE і Wi-Fi, і координувати гетерогенну мережу з різними типами базових станцій (BS), наприклад, макро, мікро, фемто, піко BS та різноманітні пристрої користувача та програми [1].

**1. Основні тенденції розвитку телекомунікацій. Технології SDN і NFV.** Програмно визначена мережа (SDN) представляє нову архітектуру, де керування мережею відокремлено від пересилання даних [7-9]. Мережа розділена на три рівні: (1) рівень площини даних, (2) рівень площини керування та (3) прикладний рівень. Рівень площини даних складається з програмованої мережевої інфраструктури, такої як комутатори та маршрутизатори. Рівень площини керування містить централізований контролер, який керує мережевими пристроями на основі запитів рівня додатків. Прикладний рівень – це місце, де мережеві служби, повністю реалізовані в програмному забезпеченні, працюють і спілкуються з централізованим контролером.

Віртуалізація мережевих функцій (NFV) – це нова технологія в телекомунікаційних мережах.

NFV віртуалізує та централізує деякі мережеві функції, такі як удосконалене Packet Core (EPC) або IP Multimedia Subsystem (IMS), для оптимізації використання інфраструктури (наприклад, апаратних ресурсів). Віртуалізовані функції працюють у центрі обробки даних на стандартному комерційному готовому обладнанні (COTS) замість розподіленого запатентованого обладнання. Основними рушійними силами впровадження SDN і NFV є гнучкість інфраструктури та орієнтовані на програмне забезпечення інновації, що призводять до вищої масштабованості, економії коштів і скорочення часу виходу на ринок нових послуг.

Таким чином, апаратне забезпечення розподіляється між різними мережевими функціями, повністю реалізованими програмним забезпеченням. Основною перевагою NFV є еластична та масштабована архітектура, що дозволяє не лише заощаджувати капітальні (CAPEX) та операційні витрати (OPEX), а й збільшувати дохід оператора мережі за рахунок швидшого виходу на ринок [7, 8].

Хоча NFV і SDN, є автономними технологіями, їх поєднання призводить до кількох синергетичних ефектів [9]. Наприклад, за допомогою централізованого мережевого інтелекту, який надає SDN, можна динамічно переміщувати мережеву функцію з одного центру обробки даних до іншого без переривання обслуговування. Крім того, мережеві ресурси, необхідні для відповідності деяким критичним параметрам (наприклад, швидкість передачі даних або затримка), можуть динамічно розподілятися за допомогою SDN на запит мережевої функції або програми.

**Технологія 5G** стане основною і перейде на пещу стадію використання. Нове покоління мобільних мереж, 5G, на відміну від інших етапів еволюції мобільних мереж, таких як 3G і 4G, 5G виходить за рамки вищих швидкостей передачі даних для мобільного Інтернету [13, 14]. 5G створює новий тип мережі, яка призначена для з'єднання практично всіх і всього разом, включаючи машини, об'єкти та пристрої.

Бездрова технологія 5G призначена для забезпечення вищої пікової швидкості передачі даних у кількох Гбіт/с, наднизької затримки, більшої надійності, великої пропускної здатності мережі, підвищеної доступності та більш однорідного досвіду для більшої кількості користувачів. Вища продуктивність і покращена ефективність створюють новий досвід для користувачів і підключають нові галузі.

5G запропонує засоби захисту від зростаючого попиту на розширення мобільних послуг із інтенсивним використанням пропускної здатності, таких додатків, як 3D, віртуальна реальність (VR), доповнена (AR) і змішана реальність (MR), відео високої чіткості та ін., забезпечення вимог до неймовірно надійних (M2M) повідомлень для таких послуг, як електронна охорона здоров'я тощо. Майбутні вимоги до системи 5G уже були визначені на кількох форумах.

Система зв'язку 5G будуватиметься на основі таких технологій: нарізка, віртуалізація, (мобільні) периферійні обчислення, масивна система з декількома входами та декількома виходами (MIMO), 3D

формування променя, надщільні мережі з невеликими комірками, масивний MIMO з комунікацією пристрій-пристрій (D2D), мультисв'язок, хмарні мережі радіодоступу (RAN), міліметрові хвилі, хмарні архітектури/обчислення тощо [13].

**Інтернет речей (IoT)** продовжить стрімко розвиватися, в основному завдяки технології 5G. IoT – ще одна головна тенденція телекомунікаційної галузі на 2023 рік, оскільки 5G також забезпечить нову хвилю програм і послуг IoT.

IoT належить до мережі фізичних пристроїв, підключених до Інтернету. Ці пристрої можуть спілкуватися один з одним і обмінюватися даними. Програми IoT, такі як розумні домашні пристрої та технології носимих пристроїв, вже використовуються сьогодні.

Важливість IoT полягає в можливості віддаленого доступу до базових станцій і центрів обробки даних. Більшість учасників телекомунікаційної індустрії посилять впровадження IoT, щоб використовувати переваги, які надає ця технологія.

Сприятлива роль у забезпеченні інфраструктури Інтернету речей, яку телекомунікаційна галузь має надавати найкращим чином, дозволить операторам структурувати власні послуги Інтернету речей і пропонувати їх постійно зростаючому ринку Інтернету речей. Той факт, що гравці телекомунікаційної галузі також є носіями підключення до Інтернету, означає, що галузь відіграватиме важливу роль у впровадженні та розгортанні IoT.

**Хмарні обчислення** продовжуватимуть домінувати на ринку. Хмарні обчислення стосуються зберігання та доступу до даних і програм через Інтернет. Вони мають багато переваг, таких як масштабованість і гнучкість. У 2023 році ще більше телекомунікаційних компаній перейдуть на хмару.

Незважаючи на те, що хмарні обчислення не є новою тенденцією, цю технологію все ще потрібно сприймати та впроваджувати інтенсивно й широко, щоб використовувати її переваги.

Телекомунікаційний сектор рухається до віртуальних мереж і відбувається стрімкий перехід постачальників послуг зв'язку (CSP) до хмари.

Навіть сьогодні більшість телекомунікаційних компаній покладаються на колосальну обчислювальну інфраструктуру для роботи з різними програмами, управління даними та стягнення плати за послуги. Перехід на хмару знижує вимоги до локального апаратного забезпечення та персоналу, зменшує інвестиції та операційні витрати, а отже, збільшує потоки доходів.

У 2023 році хмарні обчислення продовжуватимуть розвиватися і розповсюджуватися в галузі телекомунікацій.

**Кібербезпека.** Галузь телекомунікацій завжди була найбільш вразливою мішенню для кібератак, враховуючи величезні обсяги конфіденційних даних, що зберігаються в різних складних мережах. Технологія 5G створює нові загрози безпеці, і телекомунікаційні компанії повинні підготуватися до прямих чи непрямих кібератак. Це викликає необхідність створення адекватної IT-інфраструктури та



її поєднання з сервісами та процесами для підтримки безпеки. Ефективна кібербезпека повинна включати впровадження виявлення загроз, методів реагування на інциденти та методів запобігання.

Мережі з підтримкою Інтернету речей є більш вразливими до великих кібервотрнгень і злочинів. Недостатньо захищені пристрої, такі як ноутбуки, маршрутизатори, веб-камери, автомобілі, системи домашньої безпеки або машини Інтернету речей, можуть бути перетворені хакерами на зброю.

Тому для телекомунікаційних компаній важливо впровадити відповідні заходи кібербезпеки.

**Хмарні системи підтримки бізнесу (BSS)** і платіжні платформи повинні мати високу масштабованість і працювати з великими обсягами даних. Хмарні платіжні платформи – це зручний і ефективний вид білінгу, який дозволяє телекомунікаційним компаніям виставляти рахунки своїм клієнтам за послуги та програми, які використовуються в хмарі.

BSS пропонують телекомунікаційним компаніям інструмент для підтримки великої екосистеми, що розвивається, необхідний для розширення та швидкого розвитку телекомунікаційної галузі.

**Імерсивні технології у телекомунікаціях.** Застосування технологій віртуальної, доповненої та змішаної реальності в телекомунікаціях має змінити галузь. Сферами застосування імерсивних технологій у телекомунікаціях є [21, 22]:

- 1) навчання персоналу;
- 2) управління обслуговуванням на місцях;
- 3) віддалена підтримка;
- 4) інструкції з обладнання з використанням гарнітур доповненої реальності;
- 5) технічне обслуговування на основі історії технічного обслуговування обладнання;
- 6) аудиторські перевірки з використанням гарнітур;
- 7) створення інтерактивних контрольних записів для забезпечення дотримання всіх необхідних кроків під час перевірки;
- 8) інвентаризація, робота зі складом обладнання.

Оператори сучасної мобільної мережі (MNO) мають вирішувати складні завдання щодо ефективної експлуатації мережі, здатної забезпечити гнучкість, одночасно задовольняючи вимоги з надання різноманітних послуг. Проблеми забезпечення якісного обслуговування виникають при розширенні зони покриття, постійно зростаючих вимогах до потужності мережі, але при цьому фінансові фонди є обмеженими, а ресурси, такі як спектр, залишаються дефіцитними. Автоматизація різних об'єктів і функцій стільникових мереж була і буде однією з головних турбот операторів зв'язку щодо скорочення операційних витрат. З точки зору операційних витрат, телекомунікаційна система повинна бути розумною, самосвідомою, самоадаптивною та мати можливість економічно запускати мережеві послуги, а також автономно керувати та експлуатувати мережі.

За допомогою аналізу великих даних можна виконувати прогнозне та проактивне обслуговування елементів мережі. Великий об'єм даних, швидкість надходження даних, діапазон та тип джерел

даних можуть допомогти підрозділу з експлуатації та технічного обслуговування отримати варіанти рішень проблем і сформувані прогнози наслідків дій. Машинне навчання (ML) і штучний інтелект (AI) можуть допомогти розкрити невідомі властивості бездротових мереж, виявити кореляції та аномалії, які ми не можемо побачити під час перевірки, і запропонувати нові способи оптимізації розгортання та роботи мережі [13].

**Аналіз великих даних у телекомунікаціях.** Великі дані надають компаніям телекомунікаційної індустрії можливість отримати практичну інформацію та дізнатись приховані закономірності. Аналіз великих даних надає змогу операторам зв'язку не тільки зміцнити свої позиції на ринку, але й запропонувати користувачам якісний сервіс, орієнтований на клієнта.

Телекомунікаційні компанії мають найкращий потенціал для аналізу великих даних завдяки величезним обсягам даних, вони збирають через мережі операторів. Це інформація про профілі та пристрої користувачів, геолокацію, зразки поведінки та ін. Великі телекомунікаційні компанії (Lifecell, AT&T, CenturyLink, Swisscom, T-Mobile, Vodafone та ін.) вже впровадили аналітику великих даних у свою діяльність та розробку свого програмного забезпечення. Завдяки цьому вони можуть краще передбачати попит на послуги та відтік клієнтів, планувати оптимальне навантаження на свої мережі та глибше розуміти свій ринок.

Головним завданням оператора зв'язку у забезпеченні якості послуг є оптимізація мережі. На сьогодні переважаючим підходом є незалежна оптимізація окремих ключових показників ефективності (KPI) з використанням невеликої кількості джерел даних.

Рішення, які приймають MNO за допомогою різних інструментів аналізу даних, здебільшого залежать від ключових показників ефективності (KPI), накопичених у різних місцях і частинах мережі. Але MNO можуть мати доступ до величезної кількості даних зі своїх власних мереж і від абонентів. Аналіз великих даних, які беруться з багатьох джерел, дозволить отримати ширше розуміння різних невідомих значень та виявити раніше невідомі моделі та кореляції, і, як результат, запропонувати нові заходи для підвищення продуктивності різних рівнів бездротових мереж.

Основними напрямками застосування аналізу даних у телекомунікаціях є [15]:

- 1) скоринг – оцінка ризиків та ймовірностей настання події;
- 2) геоаналітика – аналіз трафіка та локації під відкриття нових об'єктів, розширення мережі магазинів, проведення коректної комунікації з потенційними клієнтами;
- 3) таргетингові комунікації – інформування цільової аудиторії щодо ваших сервісів, пропозицій та акцій;
- 4) антифрод – підвищення рівня безпеки клієнтів;

**IMSI Check** – сервіс перевірки унікального ідентифікатора абонента IMSI, який допомагає знизити ризик шахрайства, пов'язаного із заміною SIM-карт;

*перевірка переадресації* – сервіс, який інформує, чи на номері за запитом встановлена безумовна переадресація на інший номер телефону;

*давність активації номера* – система оцінки життя абонента в мережі, заснована на давності активації SIM-карти; надається у вигляді скорингу зі встановленими діапазонами;

*SIM-counter* – перевірка кількості унікальних номерів телефонів, які використовувалися в мобільному пристрої, де встановлена SIM-карта з номером за запитом; надається у вигляді скорингу зі встановленими діапазонами.

5) побудова портрета клієнта – портрет клієнта дозволить правильно сформулювати стратегію надання послуг

6) HLR Lookup – послуга ідентифікації належності абонентського номера одному з мобільних операторів України та ін.

Мобільні оператори мають доступ до великих обсягів даних, які можна розділити на *внутрішні* та *зовнішні* дані [13].

*Внутрішні дані* пов'язані з мережею та абонентами. Ці дані можуть бути структурованими та неструктурованими.

*Структуровані внутрішні дані* стосуються мережі (технічні збої, доступність з'єднання, затримка мережі, статус транзитного зв'язку, час встановлення з'єднання, тест-драйви, статистика потоку трафіку рівня даних, протокол і інтерфейс рівня керування, трафік за типом і за програмою, дані, розгортання, дані сенсорів) та абонентів (дані комунікації, облікові записи клієнтів, історія використання, розташування шаблонів викликів, моделі мобільності тощо).

*Неструктуровані внутрішні дані* стосуються транскриптів кол-центру, текстових повідомлень, даних особистого помічника тощо.

*Зовнішні дані* збираються від третіх сторін. Їх також можна розділити на дві категорії: *структуровані дані* (демографічні дані, картографічні дані – рельєф, внутрішні будівлі тощо, публічні дані – дорожній рух, погода) та *неструктуровані дані* (дані соціальних мереж - Facebook, Twitter, онлайн-форуми, текстові документи, Google+, блоги, електронні листи, відео тощо).

*Структуровані дані* зберігаються в реляційних базах даних у вигляді таблиць, в яких кожне поле (колонка) має назву, а зв'язки між таблицями є чітко визначеними. Неструктуровані дані (транскрипти кол-центру, повідомлення тощо) зазвичай не зберігаються в реляційних базах даних.

До великих даних можуть застосовуватися такі види аналізу:

- 1) описова аналітика:
  - продуктивність мережі,
  - перспективи абонентів,
  - перспективи RAN,
  - модель мобільності,
  - профіль трафіку,
  - вимірювання KPI, KQI;
- 2) діагностична аналітика:
  - відшукування першопричини,
  - визначення аномалій в мережі,

– виявлення невідповідних KPI та мережевих елементів,

– виявлення порушень роботи служб та сервісів;

3) предиктивна аналітика (машинне навчання):

– структурування трафіку та заторів,

– використання ресурсів,

– QoS,

– поведінка користувача,

– майбутнє розташування,

– несправні/проблемні елементи/області та їхній вплив на ефективність мережі;

4) прескриптивна аналітика (штучний інтелект):

– варіанти рішень та/або планування щодо нарізки, віртуалізації, периферійних обчислень і вплив кожного варіанта рішення та/або планування,

– план розширення мережі,

– план використання ресурсів,

– пропозиції щодо коригувальних дій.

Контролювання даних передбачає застосування процедур управління даними, аналізу даних, виконання відповідних дій.

Управління даними – збір даних, очищення даних, фільтрація даних, кореляція даних із багатьох джерел, пошук відповідних даних. Управління даними є основою для виконання аналізу даних.

Аналіз даних – аналіз на різних рівнях глибини для різних цілей. Наприклад, високого рівня (наскрізна продуктивність системи) або деталізації до певного елемента мережі, користувача, місця розташування, часу, KPI тощо. Аналіз даних є основою для прийняття рішень та виконання дій.

Виконання дії передбачає розуміння продуктивності мережі та якості досвіду (QoE), визначення мережевих аномалій, виконання оптимізаційних заходів, прогнозування продуктивності, збоїв та вимог, автоматизацію управління і роботи, тобто, виконання самоналаштування, самооптимізації, самовідновлення системи.

Інструменти та методології, які можна застосувати для аналізу великих даних у телекомунікаціях: методи визначення відповідності розміру даних та простору ознак, активно-інкрементне-множинно-імбалансне навчання на великих даних, моделювання невизначеності, відбір зразків, класифікація/кластеризація та ін.

**Штучний інтелект та машинне навчання у телекомунікаціях.** Штучний інтелект (AI) та машинне навчання (ML) відіграватимуть все більшу значну роль у телекомунікаціях [13, 16-19]. AI може виявляти проблеми з мережею, виконувати самовідновлення або захищати мережі від шахрайства.

AI також може пропонувати моделі використання та поведінки в роботі обладнання або взаємодії з клієнтами. Таким чином, це може допомогти ефективніше вирішувати проблеми потенційних апаратних дефектів або проблеми клієнтів, які можуть вплинути на роботу користувача.

Технології AI можуть допомогти автоматизувати завдання, покращити процес прийняття рішень і надавати персоналізовані послуги.

У 2023 році збільшиться кількість програм штучного інтелекту в телекомунікаційній галузі, особли-

во чат-ботів і віртуальних помічників клієнтів.

ML і AI – це два дуже потужні інструменти, які застосовуються для рішення задач керування великими обсягами даних, особливо для прогнозування та надання пропозицій на основі наборів даних. Інколи ML розглядається як підпростір штучного інтелекту, заснований на концепції, згідно з якою ми можемо дозволити машинам навчатися самостійно, надаючи їм доступ до великих обсягів даних. З іншого боку, AI – це розширене сприйняття машин, які стають здатними виконувати завдання інтелектуальним чином.

Порівняно з загальним штучним інтелектом (узагальнена система штучного інтелекту теоретично може виконувати будь-яке завдання), прикладний штучний інтелект більше підходить для систем зв'язку наступного покоління, оскільки прикладну систему штучного інтелекту можна розробити для вмілого керування та оптимізації бездротових мереж. На відміну від моделей ML, моделі штучного інтелекту можуть охоплювати оточуючий світ, пристосовуватися до змін і перебудовуватися. ML підходить для прогнозування аналітики, а штучний інтелект виходить за рамки прогнозів і пропонує плани/пропозиції для реалізації вигоди та оптимального досягнення мети.

Інструменти ML і AI можуть аналізувати різні джерела даних і знаходити те, що є актуальним. Вони також можуть виявити взаємозв'язки та залежності, які раніше не були ідентифіковані, оскільки їхні автоматизовані механізми мають можливість аналізувати та перевіряти дані більш інтенсивно та більш методично. Незважаючи на те, що людський досвід є незамінним у пошуку рішень і управлінні складними проблемами, він має обмежені можливості для пошуку нових рішень і розуміння.

Інструменти та методології, які аналітики великих даних операторів мобільного зв'язку можуть використовувати для обчислювальної обробки та аналізу наявних даних, це нечітка логіка, нейронні технології та алгоритми, роевий інтелект, еволюційні обчислення, стохастичні алгоритми, імунні алгоритми, методології теорії навчання, ймовірнісні методи.

Людина з відповідними знаннями та досвідом є незамінною у пошуку рішень і управлінні складними проблемами, але має певні обмеження при пошуку нових рішень і розумінні, тому Інструменти ML і AI відіграють все більш важливу роль у телекомунікації.

Виходячи з розглянутого вище, важливим питанням стає формування таких планів підготовки спеціалістів у галузі телекомунікацій, які враховували б поєднання суто "телекомунікаційних" дисциплін з дисциплінами, пов'язаними з технологіями машинного навчання, штучного інтелекту та аналізу даних.

**2. Урахування перспективних тенденцій розвитку телекомунікаційної галузі у навчанні спеціалістів з телекомунікацій.** Розглянуті вище тенденції в телекомунікаціях свідчать про те, що при підготовці висококваліфікованих спеціалістів з телекомунікацій вивчення дисциплін, що стосуються інформаційних технологій, інтелектуального аналізу даних, штучного інтелекту, машинного навчання, імерсивних технологій набуває особливого значення.

Зараз назріла необхідність сформувати нову концепцію освітньої програми бакалаврів зі спеціальності "Телекомунікації та радіотехніка" у НТУ "ХПІ". Метою цього стали такі чинники: тенденції розвитку сучасних телекомунікацій, відносний відтік абітурієнтів, вимоги стейкхолдерів до якості підготовки молодих спеціалістів, побажання студентів, що навчаються за цією спеціальністю.

Основним фокусом нової освітньої програми є теорія, моделі та принципи функціонування телекомунікаційних та радіотехнічних систем; принципи, методи та засоби забезпечення заданих експлуатаційних характеристик і властивостей телекомунікаційних та радіотехнічних систем; нормативно правова база України та вимоги міжнародних стандартів у сфері телекомунікацій та радіотехніки; сучасне програмно-апаратне забезпечення радіотехнічних та телекомунікаційних систем і мереж, застосування інформаційних технологій та технологій штучного інтелекту у телекомунікаціях.

Аналіз освітніх програм та навчальних планів зі спеціальностей "Телекомунікації та радіотехніка", "Електронні комунікації" вітчизняних та зарубіжних університетів показав, що дисципліни, пов'язані з сучасними тенденціями розвитку телекомунікацій, у тій чи іншій мірі присутні у навчальних планах. Але в них, на нашу думку, не вистачає концептуального підходу. Відгуки осіб, що приймають рішення у телекомунікаціях, представників фірм, що надають послуги та операторів зв'язку свідчать про те, що випускники не володіють достатнім спектром професійних навичок та вмінь, серед яких були названі навички з інформаційних та мережевих технологій, програмування та виконання аналітики.

З іншого боку, опитування студентів, що навчаються на нашій спеціальності, і випускників показало, що програма навчання перевантажена дисциплінами теоретичного спрямування, дисциплінами, що стосуються апаратного забезпечення та електронних компонентів, не вистачає дисциплін ІТ-спрямування та дисциплін, орієнтованих на розробку програмного забезпечення. Крім того, за думкою студентів, деякі дисципліни перевантажені складними темами, що спричинює складнощі у засвоєнні навчального матеріалу і, можливо, академічні борги.

Зараз назріла необхідність розробки нової освітньої програми та навчального плану, де ми маємо врахувати вимоги студентів та роботодавців, а також нові тенденції поєднання телекомунікаційних технологій з ІТ та технологіями AI, ML. На нашу думку, це зробить спеціальність більш привабливою для абітурієнтів, більш цікавою для студентів, дозволить майбутнім фахівцям отримувати необхідні фахові компетентності і стати конкурентоздатними на ринку телекомунікацій.

У цій статті ми зосередимося формуванні освітньої програми бакалавра з електронних комунікацій. Ми пропонуємо зробити акцент на поєднанні мережевих комунікаційних технологій у поєднанні з ІТ, AI, ML. У зв'язку з цим ми пропонуємо скоротити та перегрупувати деякі курси, пов'язані з теоретичними аспектами телекомунікацій та електронікою.

Нова освітня програма, на нашу думку, має складатися з кількох освітніх траєкторій (рис. 1):

1) загальної підготовки (ЗП),

2) фахової підготовки (ФП), до складу якої входять дисципліни з інформаційних технологій (програмування, розробка баз даних), технологій AI, ML, інтелектуального аналізу даних (DM), імерсивних технологій;

3) вибіркової складової (ДВВ - дисциплін вільного вибору студентів).

Дисципліни траєкторії 1 є традиційними і загальними для підготовки бакалаврів. Ці дисципліни дають базові знання, необхідні для вивчення спеціальних дисциплін та формування загальних компетентностей майбутніх спеціалістів. Вони читаються протягом восьми семестрів навчання бакалаврів.

Дисципліни траєкторії 2 є фаховими і скомпоновані відповідно до стандарту з телекомунікацій. Дисципліни цієї траєкторії орієнтовані на забезпечення підготовки фахівців у галузі телекомунікацій, здатних формулювати, узагальнювати та розв'язувати практичні задачі у своїй професійній діяльності на базі високого рівня професійної підготовки та наукового світогляду з використанням фундаментальних та спеціальних знань і системного підходу.

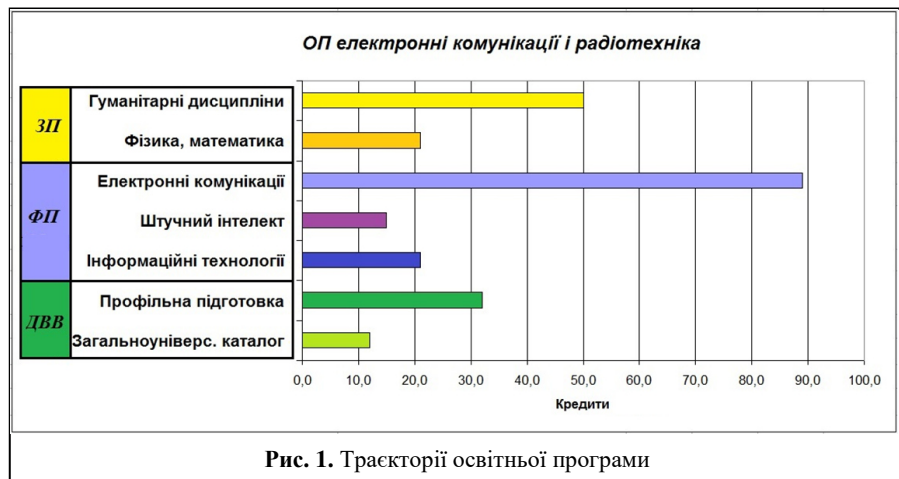
Дисципліни IT, AI, ML, DM послідовно входять до навчального плану протягом восьми семестрів навчання бакалаврів. Силабуси цих дисциплін мають мати прив'язку до специфіки електронних комунікацій. Особливу увагу при складанні силабусів слід звернути на прикладний аспект та практичні приклади застосування технологій зазначених технологій для вирішення задач у телекомунікаціях. Крім того, для більш ефективного навчання студентів ми плануємо залучати спеціалістів-практиків з телекомунікаційних організацій та сертифікованих інструкторів академії CISCO.

Дисципліни траєкторії 3 є вибірковыми. Студенти мають право на вибір навчальних дисциплін у межах, передбачених освітньою програмою та навчальним планом. Вибірковий блок складається з переліку дисциплін з галузі електронних комунікацій, технологій IT, AI, ML, DM та дисциплін, що входять до загально університетського каталогу.

У рамках індивідуалізації навчання студенти мають проходити обов'язкову професійну практику в організаціях наших галузевих партнерів та стейкхолдерів, виконувати курсові проекти та бакалаврські роботи.

Важливим питанням у якісній підготовці спеціалістів з електронних комунікацій є використання імерсивних технологій у навчальному процесі.

Протягом багатьох років освітня програма намагається застосовувати різноманітні технології, щоб залучити студентів, викликати інтерес до навчання, покращи-



ти розуміння тем, що викладаються у навчальних дисциплінах. Останнім часом зростає увага до застосування у навчанні імерсивних технологій, таких як віртуальна реальність (VR), доповнена реальність (AR), змішана реальність (MR) [20, 21]. Ці технології дозволяють втілити у тривимірному просторі ідеї матеріалу, що викладається, а це дає можливість студентам краще зрозуміти та засвоїти матеріал.

Використання потенціалу можливостей технологій VR, AR, MR допоможе візуалізувати абстрактні теоретичні концепції навчальних дисциплін з галузі інженерії телекомунікацій і покращити якість теоретичного навчання студентів, отримання ними практичних навичок та компетентностей, передбачених стандартом та освітньою програмою.

Питанням імерсивного навчання присвячено багато публікацій з прикладами застосування у різних сферах освіти. Імерсивне навчання - це навчання з ефектом занурення, методика навчання на основі досвіду, яка використовує реальність (VR, AR, MR) для моделювання сценаріїв реального світу та навчання студентів у безпечному та захоплюючому навчальному середовищі. Використання штучного середовища, максимально наближеного до справжнього життя, дозволяє не тільки усунути зовнішні відволікаючі фактори, але й позбутися одноманітності в процесі навчання, забезпечуючи стимулюючу візуалізацію.

Завдяки технологіям імерсивного навчання студенти можуть контролювати свої результати, пов'язуючи їх з реальним досвідом, управляти віртуальним світом, у якому вони перебувають. Технології імерсивного навчання дозволяють відтворити віртуально будь-яке фізичне середовище, до якого не було доступу в стінах аудиторії.

## Висновки

Стрімкий розвиток телекомунікаційної галузі вимагає суттєвих коригувань освітніх програм та навчальних планів у сфері телекомунікацій. Зокрема, у освітніх програмах необхідно надати більший акцент предметам, пов'язаним з інформаційними технологіями, та розробкою програмного забезпечення, технологіями AI, ML, DM, імерсивними технологіями і дещо скоротити теми, пов'язані з електронікою та апаратним забезпеченням. Такий підхід дозволить підготувати випускників з достатніми фаховими компетенціями та

професійними навичками для вирішення міждисциплінарних завдань у галузі електронних комунікацій відповідно до вимог нашого часу.

Ми пропонуємо використовувати технології іммерсивного навчання (VR, AR, MR) у навчальному процесі, оскільки це допоможе візуалізувати абстра-

ктні теоретичні концепції навчальних дисциплін з галузі інженерії телекомунікацій і покращити якість теоретичного навчання студентів, отримання ними практичних навичок та компетентностей, передбачених стандартом спеціальності та освітньою програмою.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Telecoms and technology outlook 2023. [https://www.eiu.com/n/campaigns/telecoms-in-2023/?utm\\_source=google&utm\\_medium=ppc&utm\\_campaign=industries-in-2023&gclid=Cj0KCQjwslejBhDOARIsANYqkD2Uq25RgUPD4Pevu-Lz3Cs38gtWPE7KqCATX2bVRRHyExHYmxSZ86EaAmBgEALw\\_wcB](https://www.eiu.com/n/campaigns/telecoms-in-2023/?utm_source=google&utm_medium=ppc&utm_campaign=industries-in-2023&gclid=Cj0KCQjwslejBhDOARIsANYqkD2Uq25RgUPD4Pevu-Lz3Cs38gtWPE7KqCATX2bVRRHyExHYmxSZ86EaAmBgEALw_wcB)
2. Закон України "Про телекомунікації" від 18.11.2003 № 1280-IV. <https://tax.gov.ua/zakonodavstvo/podatkove-zakonodavstvo/zakoni-ukraini/arhiv-zakoniv-ukraini/zakoni-ukraini-za-2003-rik/30850.html>
3. Latest Telecom Industry Trends in 2023: A Look into the Future. <https://tridenstechnology.com/telecom-industry-trends/>
4. Технології і концепції Industry 4.0 <https://www.it.ua/knowledge-base/technology-innovation>
5. Олійник В.М., Речембей В.В. Сучасні тенденції розвитку телекомунікаційних технологій. Математичні методи, моделі та інформаційні технології у економіці. Вип. 14/2018, с. 106-1022. [https://economyandsociety.in.ua/journals/14\\_ukr/145.pdf](https://economyandsociety.in.ua/journals/14_ukr/145.pdf)
6. Тюндер І.С. Концепція розвитку телекомунікацій в Україні. Вісник східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля № 1 (271) 2022, с.41-46
7. Y. Li and M. Chen, "Software-Defined Network Function Virtualization: A Survey," IEEE Access, vol. 3, pp. 2542–2553, 2015.
8. T. D. Nadeau and K. Gray, SDN: Software Defined Networks: An Authoritative Review of Network Programmability Technologies. O'Reilly Media, 2013.
9. Anand Nauyar, Пріті Награт, Бхавна Сінгла. Software Defined Networks: Architecture and Applications 1st Edition. Publisher: Wiley-Scrivener; 1st edition (June 28, 2022). 576 p.
10. S. Aleksic and I. Miladinovic, "Network virtualization: Paving the way to carrier clouds," in 2014 16th International Telecommunications Network Strategy and Planning Symposium (Networks), Sept 2014, pp. 1–6.
11. M. D. Ananth and R. Sharma, "Cost and performance analysis of network function virtualization based cloud systems," in 2017 IEEE 7th International Advance Computing Conference (IACC), Jan 2017, pp. 70–74.
12. J. Costa-Requena, J. L. Santos, V. F. Guasch, K. Ahokas, G. Premsankar, S. Luukkainen, O. L. Perez, M. U. Itzazelaia, I. Ahmad, M. Liyanage, M. Ylianttila, and E. M. de Oca, "SDN and NFV integration in generalized mobile network architecture," in 2015 European Conference on Networks and Communications (EuCNC), June 2015, pp. 154–158.
13. Big Data Analytics, Machine Learning and Artificial Intelligence in Next-Generation Wireless Networks <https://arxiv.org/pdf/1711.10089.pdf>
14. F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five Disruptive Technology Directions for 5G," IEEE Commun. Mag., vol. 52, no. 2, pp. 74-80, Feb. 2014.
15. Ефективні рішення на основі великих даних. [https://datacell.lifecell.ua/?gclid=CjwKCAjw1MajBhAcEiwAagW9MbaaZCnmgjortuaUT3AxQq\\_JJZXeoEm8P4mbr1poYxP\\_O5oQjBvBoCME8QAvD\\_BwE#benefits](https://datacell.lifecell.ua/?gclid=CjwKCAjw1MajBhAcEiwAagW9MbaaZCnmgjortuaUT3AxQq_JJZXeoEm8P4mbr1poYxP_O5oQjBvBoCME8QAvD_BwE#benefits)
16. Common uses of ai in telecommunications. <https://techsee.me/blog/artificial-intelligence-in-telecommunications-industry/>
17. AI for Telecom: Automatic, Adaptive, Autonomous. <https://softengi.com/blog/ai-is-the-telecom-industry-trend-automatic-adaptive-autonomous/>
18. Advancing AI In Telecommunications: Where Are You In Your Modernization Strategy? <https://www.forbes.com/sites/cindy-gordon/2022/01/25/advancing-ai-in-telecommunications-where-are-you-in-your-modernization-strategy/?sh=40d384664724>
19. The Role of ML in the Telecom Industry. <https://www.panlearn.com/articles/ai-machine-learning/the-role-of-ml-in-the-telecom-industry>
20. The role of immersive technologies in the telecom industry <https://insidetelecom.com/the-role-of-immersive-technologies-in-the-telecoms-industry/>
21. Using Immersive Virtual Reality in Field Service Telecom Engineers Training [https://www.researchgate.net/publication/352439204\\_Using\\_Immersive\\_Virtual\\_Reality\\_in\\_Field\\_Service\\_Telecom\\_Engineers\\_Training](https://www.researchgate.net/publication/352439204_Using_Immersive_Virtual_Reality_in_Field_Service_Telecom_Engineers_Training)

Received (Надійшла) 28.06.2023

Accepted for publication (Прийнята до друку) 06.09.2023

#### IT and technologies of artificial intelligence in the training of telecommunications engineers

L. Nikitina, N. Dzheniuk, L. Borysova

**Abstract.** The development of the telecommunications industry in recent years has been in the direction of increasing the number of devices and subscribers connected to the network. In the formation of the telecommunications industry, we have software-defined networks, virtualization of network functions, the Internet of Things and 5G. Today, it is impossible to imagine the productive work of telecommunication networks and systems ensuring the proper quality of services without the use of artificial intelligence technologies and algorithms and the use of appropriate software. Educational programs and curricula for the training of telecommunications engineers of Ukrainian universities should promptly take into account modern development trends and innovations in the telecommunications industry. In our opinion, in order to train highly qualified and competitive specialists in telecommunications, it is necessary to make certain changes in the curricula related to programming, data analysis and machine learning technologies, the application of models, methods and algorithms of artificial intelligence in the telecommunications industry. The article proposes the inclusion of relevant disciplines in the curricula.

**Keywords:** telecommunications engineering, big data analytics, machine learning, artificial intelligence, wireless networking, immersive learning.

## АЛФАВІТНИЙ ПОКАЖЧИК

Hashimov E.	171	Єрохін В. Ф.	176	Мироненко В. К.	10
Maharramov R.	171	Живило Є. О.	95	Михайліченко О. В.	120
Pashaev A.	171	Заковоротний О. Ю.	152	Невлюдов І. ІІІ.	128
Sabziev E.	171	Залужний О. В.	176	Невлюдова В. В.	134
Андрусенко Ю. О.	148	Запововський М. Й.	45	Нікітіна А. В.	111
Баленко О. І.	45	Захарченко Р. В.	64	Нікітіна Л. О.	189
Білоусов М. Ю.	128	Зозуля Л. А.	167	Носков В. І.	54
Бодянський С. В.	70	Іванов Ю. В.	86	Оліфір М. В.	45
Борисова Л. В.	189	Канівець Б.	103	Орлова Т. О.	152
Бороздін М. К.	64	Капітон А.	103	Очеретенко С. В.	123
Боряк Б. Р.	64, 120	Карлов А. Д.	181	Павленко П. М.	58
Буравченко К. О.	155	Кацман М. Д.	10	Педченко Н. М.	120
Вадурін К. О.	111	Качанов П. О.	41	Пелешок Є. В.	176
Важинський В. Б.	75	Клименко О. М.	128	Перекрест А. Л.	111
Вергал К. Ю.	86	Коваленко А. С.	155	Плехова Г. А.	123
Вжесневський М. О.	134	Ковальчук А. О.	181	Сабельнікова П. С.	144
Вінтенко Б. Ю.	155	Ковцур К. Г.	18	Самборський Є. І.	58
Гавриленко С. Ю.	54, 79	Колесніков О.	106	Самборський І. І.	58
Галай В. М.	64	Колій О. С.	5	Самченко Д. М.	167
Ганношина І. М.	25	Коломійцев О. В.	181	Скороделов В. В.	54
Гейко М. В.	54	Коростельов А. С.	111	Смірнов О. А.	155
Головка Г.	106	Костікова М. В.	123	Смірнов С. А.	155
Горбачов П. Ф.	5	Краснобаєв В. А.	144	Стародубцев М. Г.	134
Горносталь О. А.	79	Криховецький Г. Я.	58	Талибов Р.	103
Гученко М. І.	111	Кузнецов О. Л.	181	Тарасенко М. В.	41
Двірна О. А.	86, 120	Кузь В. С.	95	Тихенко О. М.	167
Деркач Т. М.	93	Кулягін А. І.	115	Ткачов В. М.	75
Дженюк Н. В.	189	Лактіонов О. І.	120	Фесенко Т. Г.	148
Дзюбан О.	103	Левтеров А. І.	123	Цибульник Н. Н.	167
Дмитренко А. О.	93	Лещинський В. О.	138	Чала О. С.	70
Дмитренко Т. А.	93	Любий Є. В.	5	Чалий С. Ф.	138
Дрючко О. Г.	64	Максимова С. С.	128	Шефер О. В.	64
Дубинець О. І.	32	Маранов О. В.	37	Шибанов С. В.	134
Ескожанова Н. Г.	18	Мацюк В. І.	10	Янко А. С.	144
Євсіна Н. О.	41	Мезенцев М. В.	45		

Наукове видання

## СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ, НАВІГАЦІЇ ТА ЗВ'ЯЗКУ

Збірник наукових праць

Випуск 3 (73)

Відповідальна за випуск *К. С. Нестеренко*

Технічний редактор *Т. В. Уварова*

Коректор *О. В. Морозова*

Комп'ютерна верстка *Н. Г. Кучук, І. Ю. Петровська*

Оформлення обкладинки *І. В. Льїна*

Свідоцтво про державну реєстрацію КВ № 19512-93/2ПР від 16.11.2012 р.

Підписано до друку 29.09.2023. Формат 60×84/8. Ум.-друк. арк. 24,5. Тираж 120 прим. Зам. 929-23

Адреса редакції: Україна, 36011, м. Полтава, Першотравневий проспект, 24, тел. (050) 302-20-71

Національний університет «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка»

Віддруковано з готових оригінал-макетів у цифровій друкарні Impress

61002, м. Харків, вул. Пушкінська, 56, тел. + 38 (057) 714-52-11

e-mail: [irina@impress.biz.ua](mailto:irina@impress.biz.ua)